

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА»

ВЕСТНИК

**ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА**

Том 13. № 4

**Vestnik Gosudarstvennogo universiteta
morskogo i rechnogo flota
imeni admirala S. O. Makarova**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2021. — Т. 13. — № 4. — 162 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

«Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации СМИ от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В Вестнике публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников **05.22.00 «Транспорт»** в разделах: «Эксплуатация водного транспорта, судовождение», «Водные пути сообщения и гидрография»; **05.08.00 «Кораблестроение»** в разделах: «Судостроение и судоремонт», «Судовые энергетические установки, системы и устройства»; **05.09.00 «Электротехника»** в разделе «Электротехнические комплексы и системы».

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте, публикуются на русском и английском языках. Статьи рецензируются независимыми экспертами. Кроме того, в Вестнике публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний, сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

Вестник включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

Индекс для подписки в каталоге «Газеты. Журналы» агентства Роспечать: 37276.



СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 451

Каретников В. В., Андриюшечкин Ю. Н., Прохоренков А. А. Лимитирующие гидрометеорологические факторы при использовании 3D электронных навигационных карт для проводки судов «река–море» плавания по внутренним водным путям 451

Ершов А. А., Михневич А. В., Крицкий А. И. Дополнение радиолокационной информации при решении задач безопасности судов 465

Триполец О. Ю. Обзор существующих методов расхождения безэкипажных судов 480

Чертков А. А., Каск Я. Н., Сабуров С. В. Автоматизация поиска маршрутов рентабельных грузоперевозок средствами целочисленного программирования MATLAB 496

Ююкин И. В. Корреляционно-экстремальная навигация по геофизическим полям на основе использования сплайновой технологии 505

Сампиев А. М. Применение бенчмаркинга для оценки работы морских перегрузочных комплексов 518

Галин А. В., Малыхин А. С. Модель оптимизации линейных маршрутов на основе генетического алгоритма 530

Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Семенов А. Д. Расчет флота и парка контейнерного оборудования судоходной линии 539

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 548

Царенко С. Н., Рак А. Н., Безлобенко Б. Н. Динамика валопровода гребного винта при разгонных режимах 548

Федоровская Н. К., Федоровский К. Ю. Оценка эффективности систем охлаждения судовых энергетических установок с учетом экологического фактора 559

Котов В. С., Кривошеев А. А., Резникова Р. К. Разработка схемы смесителя-гомогенизатора гидродинамического типа 569

Том 13. № 4

2021

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырк

д.т.н., проф.

NyrkowAP@gumrf.ru

С. Гуцма

Морская академии (г. Щецин, Польша), д.т.н., проф.

Г. В. Егоров

ген. директор ЗАО «Морское инженерное бюро — СПб», д.т.н., проф.

Р. Качиньски

проректор по развитию и сотрудничеству Технического университета (г. Белосток, Польша), д.т.н., проф.

А. И. Пошивай

заместитель руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов

д.т.н., проф.,

чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов

научный руководитель Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-54734 от 17.07.2013 г.

Адрес редакции: 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7.

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

**Члены
редколлегии:**

О. К. Безюков, д.т.н.
А. Т. Беккер, д.т.н.
Н. И. Ватин, д.т.н.
П. А. Гарибин, д.т.н.
Д. П. Голоскоков, д.т.н.
В. А. Жуков, д.т.н.
Ю. М. Искандеров, д.т.н.
О. Г. Каратаев, д.т.н.
В. В. Каретников, д.т.н.
А. В. Кириченко, д.т.н.
М. Н. Кирсанов, д.ф.-м.н.
М. А. Колосов, д.т.н.
Е. А. Королева, д.э.н.
И. И. Костылев, д.т.н.
А. Л. Кузнецов, д.т.н.
Е. А. Лаврентьева, д.э.н.
В. А. Логиновский, д.т.н.
В. Е. Марлей, д.т.н.
А. М. Никитин, д.т.н.
Т. А. Пантина, д.э.н.
Л. И. Погодаев, д.т.н.
В. И. Решняк, д.т.н.
В. В. Романовский, д.т.н.
А. В. Саушев, д.т.н.
С. В. Смоленцев, д.т.н.
А. Л. Степанов, д.т.н.
М. В. Сухотерин, д.т.н.
Е. Г. Трунин, к.э.н.
А. Л. Тезиков, д.т.н.
В. Б. Чистов, д.т.н.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....	575
<i>Брежнев В. И. Сетевое управление мощностным режимом винторулевой колонкой судна с электродвижением</i>	<i>575</i>
<i>Алмаки А. Н. Д., Мазалов А. А. Повышение эффективности технологии прямого управления потоком для асинхронного генератора с двойным питанием с использованием модифицированных алгоритмов суперскручивания.....</i>	<i>586</i>

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION451

Karetnikov V. V., Andryushechkin Yu. N., Prokhorenkov A. A. Limiting hydrometeorological factors when using 3D electronic navigational charts for pilotage of river-sea-going vessels on inland waterways451

Ershov A. A., Mikhnevich A. V., Kritsky A. I. Supplementing radar information to solve ship safety problems465

Tripolets O. Y. Overview of existing methods of autonomous vessels collision avoidance.....480

Chertkov A. A., Kask Ya. N., Saburov S. V. Automation of search for routes of profitable freight transportation by means of integer programming of MATLAB496

Yuyukin I. V. Correlation-extreme navigation through geophysical fields based on the use of spline technology.....505

Sampiev A. M. Benchmarking using for the marine terminal activity evaluation.....518

Galina A. V., Malykhin A. S. Genetic algorithm-based linear routes optimization model530

Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Semenov A. D. Assessment of container ship and equipment fleet size539

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR548

Tzarenko S. N., Rak A. N., Bezlobenko B. N. Propeller shaft line dynamics at acceleration mode548

Fedorovskaya N. K., Fedorovsky K. Yu. Estimating the efficiency of ship power plants cooling systems taking into account the environmental factor559

Kotov V. S., Krivosheev A. A., Reznikova R. K. Development of a hydrodynamic type mixer-homogenizer scheme569

Volume 13. № 4

2021

EDITOR-IN-CHIEF

S. O. Baryshnikov
doctor of technical Sciences, Prof.
rector@gumrf.ru

Deputy Editor-in-Chief

A. P. Nyrkov
doctor of technical Sciences, Prof.
NyrkovAP@gumrf.ru

S. Gutsma

Maritime Academy (g.Schetsin, Poland), doctor of technical Sciences, Prof.

G. V. Yegorov

General Director of "Marine Engineering Bureau - St. Petersburg", doctor of technical Sciences, Prof.

R. Kachin'ski

Vice-Rector for Development and Cooperation of the Technical University (Bialystok, Poland), doctor of technical Sciences, Prof.

A. I. Poshivay

Deputy Head of the Federal Agency of Sea and River Transport

A. Ye. Sazonov

doctor of technical Sciences, Prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences

M. Yusupov

scientific leader of "St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS", doctor of technical Sciences, Prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences

EDITORIAL STAFF:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

**Editorial
Collegium:**
O. K. Bezyukov,
 doctor of technical Sciences
A. T. Bekker,
 doctor of technical Sciences
N. I. Vatin,
 doctor of technical Sciences
P. A. Garibin,
 doctor of technical Sciences
D. P. Goloskokov,
 doctor of technical Sciences
V. A. Zhukov,
 doctor of technical Sciences
Y. M. Iskanderov,
 doctor of technical Sciences
O. G. Karatayev,
 doctor of technical Sciences
V. V. Karetnikov,
 doctor of technical Sciences
A. V. Kirichenko,
 doctor of technical Sciences
M. N. Kirsanov,
 doctor of phys.-math. Sciences
M. A. Kolosov,
 doctor of technical Sciences
Ye. A. Koroleva,
 doctor of economic Sciences
I. I. Kostylev,
 doctor of technical Sciences
A. L. Kuznetsov,
 doctor of technical Sciences
Ye. A. Lavrentyeva,
 doctor of economic Sciences
V. A. Loginovskiy,
 doctor of technical Sciences
V. Ye. Marley,
 doctor of technical Sciences
A. M. Nikitin,
 doctor of technical Sciences
T. A. Pantina,
 doctor of economic Sciences
L. I. Pogodayev,
 doctor of technical Sciences
V. I. Reshnyak,
 doctor of technical Sciences
V. V. Romanovskiy,
 doctor of technical Sciences
A. V. Saushev,
 doctor of technical Sciences
S. V. Smolentsev,
 doctor of technical Sciences
A. L. Stepanov,
 doctor of technical Sciences
M. V. Sukhoterin,
 doctor of technical Sciences
Ye. G. Truntin,
 candidate of economic Sciences
A. L. Tezikov,
 doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
 doctor of technical Sciences

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS.....575

Brezhnev V. I. Network power control of screw-steering column
 of electric propulsion vessels575

Almakki A. N. J., Mazalov A. A. Improving the efficiency of direct flux
 and torque control technology for doubly-fed induction generator with
 a robust control using modified super-twisting algorithms.....586



30 мая на 56 году жизни ушел из жизни доктор технических наук, профессор **Геннадий Вячеславович ЕГОРОВ** — ведущий проектировщик российского флота, создатель и идейный вдохновитель Морского инженерного бюро. За время своего существования под руководством Геннадия Вячеславовича Морское инженерное бюро прошло путь от небольшой фирмы, занимающейся расчетными задачами и научными исследованиями, выполняемыми по заказу классификационных обществ, до организации, осуществляющей практически весь спектр инжиниринговых работ для судоходства и судостроения.

По проектам Морского инженерного бюро под руководством Геннадия Вячеславовича за 25 лет построено 410 судов, в том числе «Мустай Карим» — речное круизное судно, грузопассажирское судно на 146 пассажиров «Адмирал Невельской» для Дальнего Востока, танкер для комплексной переработки отходов для Байкала «Георгий Москалев», траулер «Баренцево море». Геннадия Вячеславовича знали и любили не только в России, но и во многих странах мира. Британское Королевское общество корабельных инженеров (Royal Institution of Naval Architects) неоднократно включало проекты Морского инженерного бюро в число лучших судостроительных проектов мира. Геннадием Вячеславовичем подготовлено лично и в соавторстве более 1000 научных трудов, проведено большое количество лекций, уроков и вебинаров.

Геннадий Вячеславович Егоров был удостоен многих международных титулов и званий, являлся Почетным членом Британского Королевского общества корабельных инженеров; Членом Американского общества кораблестроителей и морских инженеров; Членом Международного Конгресса по конструкции корпусов судов и морских сооружений ISSC (на протяжении более 20 лет); Членом Президиума НТС Российского морского регистра судоходства; Членом Президиума Научно-технического совета Российского речного регистра; Членом Научно-технического совета Регистра судоходства Украины; академик Транспортной академии Украины; академиком Академии наук судостроения Украины; Лауреатом государственной премии Украины 2011 года; членом экспертного совета ВАК; Лауреатом Государственной премии Украины (2011).

Геннадия Вячеславовича Егорова будут вспоминать не только как ученого и руководителя, замечательного, доброго, жизнерадостного и умного человека, но и как любящего и любимого сына, мужа, папу, дедушку, друга.

Выражаем свои искренние соболезнования родным и близким Геннадия Вячеславовича Егорова.

По материалам из первоисточника: <http://meb.com.ua/>

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-451-464

LIMITING HYDROMETEOROLOGICAL FACTORS WHEN USING 3D ELECTRONIC NAVIGATIONAL CHARTS FOR PILOTAGE OF RIVER-SEA-GOING VESSELS ON INLAND WATERWAYS

V. V. Karetnikov, Yu. N. Andryushechkin, A. A. Prokhorenkov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The issue of operation of river vessels and river-sea-going vessels for navigation is considered. At the same time, it is emphasized that the safety of navigation, an integral part of which is the navigational safety of ships navigation, is ensured mainly due to the eye method for determining the position and movement of the vessel relative to the boundaries and directions of the fairway. This method is called pilotage. Attention to the fact that for sailing in constrained water specific for the Russian inland waterways, the degree of external factors influence on moving vessel increases is drawn. It is also noted that navigation along the Russian inland waterways is complicated by the presence of variable and heterogeneous currents, navigational hazards and shallow water. To increase the level of navigation safety in such conditions, the navigators may be required to use additional technical means of navigation and radio navigation devices. Thus, it is concluded that under significant external influences during navigation of vessels along the Russian inland waterways, the skills and abilities of navigators, including the use of modern navigational bridge equipment, play an important role in ensuring navigational safety. This problem is most acutely manifested in the piloting of modern river-sea-going vessels due to their size, as well as specific operational characteristics in comparison with typical river vessels. The aim of the work is to determine the capabilities of the navigator to ensure a high level of navigational safety of modern river-sea-going vessels when making voyages through the inner waterways of Russia, taking into account the negative impact of these factors and conditions, including hydrometeorological conditions, based on the use of promising 3D electronic navigation charts.

Keywords: navigational safety, 3D navigational charts, limiting hydrometeorological factors, inland waterways.

For citation:

Karetnikov, Vladimir V., Yuri N. Andryushechkin, and Andrey A. Prokhorenkov. "Limiting hydrometeorological factors when using 3D electronic navigational charts for pilotage of river-sea-going vessels on inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 451–464. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-451-464.

УДК 656.628

ЛИМИТИРУЮЩИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ 3D ЭЛЕКТРОННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ КАРТ ДЛЯ ПРОВОДКИ СУДОВ «РЕКА–МОРЕ» ПЛАВАНИЯ ПО ВНУТРЕННИМ ВОДНЫМ ПУТЯМ

В. В. Каретников, Ю. Н. Андрюшечкин, А. А. Прохоренков

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен вопрос эксплуатации речных судов и судов «река–море» плавания. При этом подчеркивается, что безопасность судоходства, неотъемлемой частью которой является навигационная

безопасность плавания судов, обеспечивается в основном за счет глазомерного метода определения местоположения и движения судна относительно границ и направлений судового хода. Данный метод получил название «лоцманский». Обращается внимание на то, что в стесненных условиях плавания, свойственных для внутренних водных путей Российской Федерации, степень воздействия внешних факторов на движущееся судно увеличивается. Отмечается также, что судоходство по внутренним водным путям осложнено наличием переменных и неоднородных течений, навигационных опасностей и мелководья. Для повышения уровня безопасности плавания в таких условиях от судоводителя может потребоваться применение дополнительных технических средств навигации и радионавигационных приборов. Таким образом, сделан вывод о том, что при значительных внешних воздействиях при плавании судов по внутренним водным путям Российской Федерации большую роль в обеспечении навигационной безопасности играют умения и навыки судоводителей, в том числе в вопросах современного оборудования ходового мостика. Отмечается, что данная проблема наиболее остро проявляется при проводке современных судов «река–море» ввиду их размера, а также специфических эксплуатационных характеристик по сравнению с типовыми речными судами. Целью работы является определение возможностей судоводителя для обеспечения высокого уровня навигационной безопасности современных судов плавания «река–море» при совершении рейсов по внутренним водным путям Российской Федерации с учетом негативного влияния указанных факторов и условий, в том числе гидрометеорологических, на основе применения перспективных 3D электронных навигационных карт.

Ключевые слова: навигационная безопасность плавания, 3D навигационные карты, лимитирующие гидрометеорологические факторы, внутренние водные пути.

Для цитирования:

Каретников В. В. Лимитирующие гидрометеорологические факторы при использовании 3D электронных навигационных карт для проводки судов «река–море» плавания по внутренним водным путям / В. В. Каретников, Ю. Н. Андрущечкин, А. А. Прохоренков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 451–464. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-451-464.

Введение (Introduction)

В настоящее время протяженность внутренних водных путей Российской Федерации (ВВП РФ) составляет более 100 000 км. Обеспечение на высоком уровне безопасности судоходства по внутренним водным путям (ВВП) базируется на профессиональной подготовке плавсостава. Основой судоводительской подготовки является изучение общей, а также специальной лоции бассейна или отдельного водного объекта, теоретических основ управления судами, правил плавания и особенностей движения судов в бассейне. Таким образом, проводка судна выполняется при использовании полученных знаний навигационно-гидрографических условий плавания, маневренных возможностей судна, а также глазомерной оценки местоположения и движения судна относительно границ и направлений судового хода. Знание большого количества информации об особенностях навигационного оборудования, применяемого в соответствующем бассейне водного пути, способов ориентирования, а также схем расстановки знаков навигационного оборудования в течение длительного периода времени являлось основой, обеспечивающей навигационную безопасность плавания судов по ВВП. Такие обширные знания, большая часть которых представляет собой пространственные визуальные данные, являются основой лоцманского метода судоходства по ВВП, позволяя судоводителю безошибочно определять местоположение судна даже при проводке судна в сложных гидрометеорологических условиях [1].

Увеличение размеров судов смешанного *река–море* района плавания привело к необходимости использования технических средств судоходства для получения численных значений навигационных параметров движения судна, т. е. послужило началом применения элементов штурманского метода проводки судна. Для осуществления полноценного контроля за движением судна на основании измерений, выполняемых с помощью технических средств, рекомендуется выполнение предварительных расчетов для получения аналитических параметров движения судна, которые необходимо сравнивать с фактическим движением. Так появился новый метод проводки судов, сочетающий в себе свойства штурманского и лоцманского методов, основанных на предварительной проработке маршрута, получивший название *расчетно-инструментального* [2], [3].

Вне зависимости от метода проводки судна, навигационная карта является источником навигационной информации, а также источником, связывающим различную информацию, который может использоваться в различных видах деятельности судоводителя как при подготовке к рейсу и выполнении предварительной проработки маршрута, так и в процессе проводки судна, при выполнении оперативной оценки местоположения судна относительно береговых и плавучих знаков навигационного оборудования.

Использование картографических систем, способных отображать 3D электронные навигационные карты (ЭНК), представляет новое направление в электронной картографии, потенциал которого используется в основном для обеспечения безопасности системы судоходства в морских водах [4]. Принципиально новые возможности для визуального восприятия окружающего пространства судоводителем достигаются в 3D ЭНК за счет множества функций, недоступных при использовании стандартных ЭНК, а именно:

- одновременное освещение надводной и подводной обстановки, позволяющее судоводителю оценивать возможность использования соответствующей навигационной информации и выбирать из нее наиболее достоверную для принятия решений на маневр;

- применение автоматических функций отображения области опасных глубин применительно к осадке судна и фактическому уровню воды, а также дискретность освещения подводной обстановки применительно к выбранному как генеральному масштабу карты, так и масштабу глубины в отдельности;

- получение навигационной информации, создаваемой знаками навигационного оборудования, без использования программных измерительных инструментов [5], [6].

Геометрические основы построения перспективы объемного изображения позволяют судоводителю, используя функции просмотра карты с точек, расположенных на мостике виртуального судна, в пределах корпуса или имеющих произвольное положение, а также изменяя углы обзора глазомерно, определять значения дистанций, направлений на знаки навигационного оборудования, дистанций и направлений со знака на знак [7]. При проводке судна через участки водных путей, в случае воздействия лимитирующих внешних факторов, судоводителю необходимо иметь представление о направлениях, создаваемых знаками навигационного оборудования, в первую очередь берегового.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Плаванию по ВВП свойственно сложное сочетание навигационно-гидрографических и гидрометеорологических условий, характерное для движения в узкостях и на мелководье, т. е. ограничения по габаритам на ВВП определяют предельные значения факторов внешнего воздействия, при которых возможно обеспечение должного уровня навигационной безопасности плавания, и, таким образом, влияние которых будет лимитирующим. К таким участкам относятся естественные и искусственные части каналов, участки свободных рек или фарватеров на озерах и водохранилищах с лимитирующими габаритами судового хода, где управление судами и составами является сложным для судоводителя и требует для обеспечения безопасности применения опыта и судоводительского мастерства. Принципиальное значение для безопасного плавания в этих условиях имеет правильная оценка судоводителем положения судна относительно границ и направлений судового хода, верный учет управляемости судна применительно к конкретным условиям плавания и оценка маневренных возможностей судна.

Влияние внешних факторов при одновременном воздействии на судно поддается определенному учету качественным образом. При следовании по прямолинейным участкам судового хода судоводитель визуально может точно оценить курсовые углы воздействия ветра и течения. Зная особенности образования ветрового момента и воздействия течения, судоводитель может управлять судном, компенсируя влияние момента от ветра и течения, и, таким образом, избегая опасного рыскания судна.

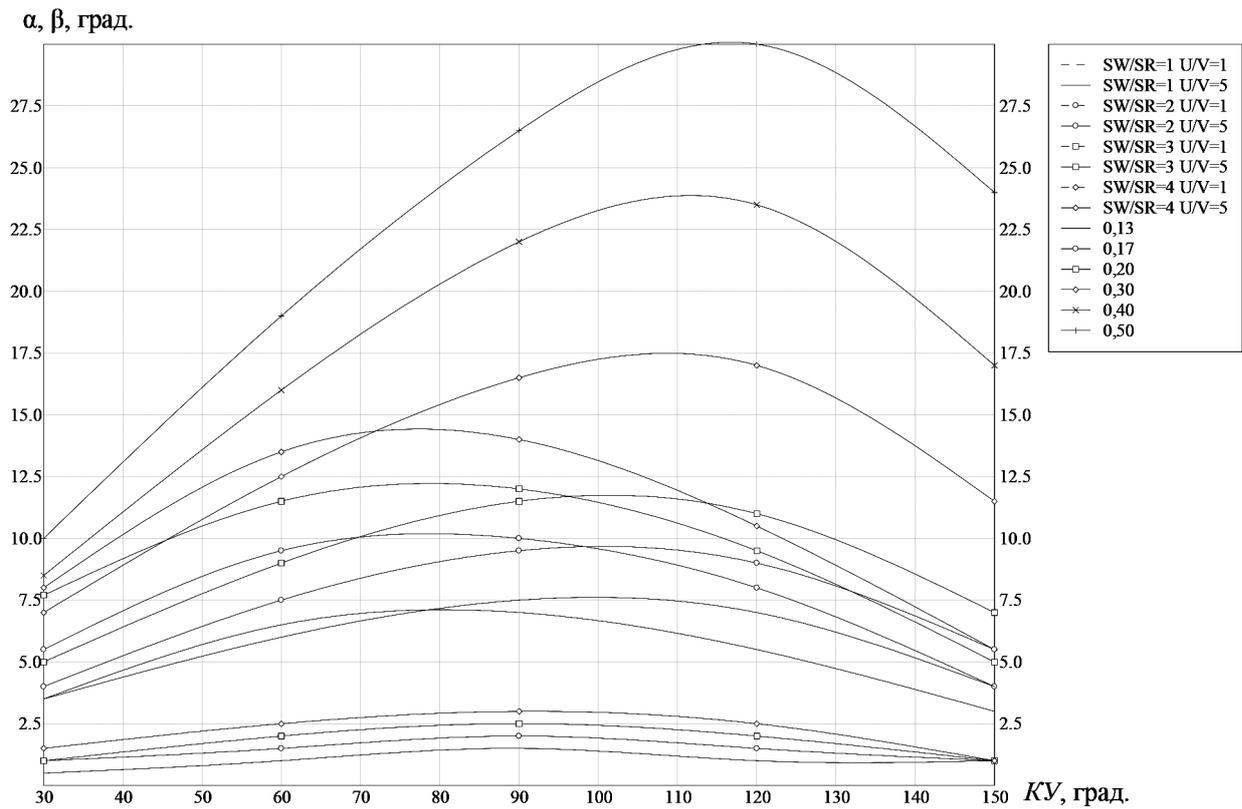


Рис. 1. Зависимости угла ветрового дрейфа α и угла сноса β от течения

Действие сил от воздействия ветра и течения обычно рассматривается как факторы, которыми судоводитель не может управлять. Однако эти две силы имеют неодинаковое воздействие на судно ввиду различия в их природе. При движении в условиях ветрового воздействия судно приобретает некоторую составляющую скорости относительно воды, направленную перпендикулярно диаметральной плоскости (ДП). При перемещении в этом направлении относительно воды подводная часть корпуса судна встречает сопротивление, в связи с чем возникает пара сил, стремящаяся развернуть судно носом на/под ветер. При воздействии течения судно также приобретает некоторую скорость в поперечном направлении, однако его надводная часть практически не испытывает сопротивления воздуха, поэтому вращающего момента не возникает. Несмотря на это, судно может ощущать вращающий момент от течения, например, при воздействии криволинейного течения на повороте.

Априорная количественная оценка влияния внешних факторов, основанная на выполнении математических расчетов, возможна, но будет связана со значительными трудозатратами, а также сложностью их практического применения ввиду изменчивости условий плавания. Для получения представления о количественном влиянии внешних факторов на судно были выполнены расчеты по стандартной методике [4], [7], результаты которых представлены на рис. 1 в виде зависимостей углов ветрового дрейфа (пунктирные линии) и углов сноса от течения (сплошные линии) в зависимости от курсовых углов (KU) истинного ветра и течения. Величины углов дрейфа будут определяться отношением площадей парусности надводного (SW) и подводного (SR) бортов, скоростей истинного ветра (U) и судна (V), а углы сноса — только соотношением скоростей течения и судна. Анализируя зависимости углов дрейфа от ветра и сноса от течения, можно отметить характерные особенности влияния как каждого из факторов в отдельности, так и совместного влияния. При незначительных внешних воздействиях для оценки и прогнозирования поведения судна нет необходимости в точном определении точек приложения аэро- и гидродинамической сил, а также их моментов. Определение равнодействующей силы выполняется судоводителем визуально и весьма приблизительно.

Особенностью действия течений на ВВП является изменчивость направления, проявляющаяся даже на отдельных частях прямолинейных участках, так что при следовании судна по участку, где свальное течение отсутствует, угол дрейфа может иметь один знак. При выходе судна на участок, где ощущается снос от течения, действующего в противоположном направлении, совместный угол дрейфа может резко изменить знак, что вызовет резкое отклонение судна от линии пути.

При условии соответствия точек приложения аэро- и гидродинамической сил общим закономерностям, известным из курса судовождения, точка приложения силы от течения будет смещена в носовую часть судна, поэтому при действии ветра и течения в один борт моменты от ветра и течения будут иметь разные знаки, при действии ветра и течения со стороны разных бортов вызванные ими моменты будут суммироваться, так что углы перекладки руля и угловые скорости при ветре и течении, действующие в противоположных направлениях, будут больше, чем в случае их действия по одному направлению.

Таким образом, движение судна в условиях воздействия лимитирующих внешних факторов будет характеризоваться значительными углами суммарного дрейфа и рыскливостью. Поскольку движение судна представляет собой совокупность поступательного и вращательного движений, это означает, что видимые с ходового мостика дистанции и направления на знаки навигационного оборудования будут меняться случайным образом, что создает значительные трудности как для ориентирования, так и для управления судном даже при условии наличия хорошей практики управления судном.

Результаты (Results)

Учет фактического уровня воды. При оценке эффективности применения 3D ЭНК [8], [9] для опровержения неблагоприятного влияния лимитирующих гидрометеорологических факторов, влияющих на возможность проводки судов по ВВП, первым рассматривается влияние уровня воды, поскольку оно определяет величины фактических габаритов судового хода, т. е. ширину, радиус закругления и глубину. Это связано с тем, что при движении судна на мелководье наблюдается увеличение осадки судна, что не только требует снижения скорости судна и, таким образом, приводит к возрастанию степени влияния других внешних факторов, но и создает опасность удара корпуса о грунт.

На ВВП основные навигационные опасности представляют собой пространственные опасности в виде изобат, ограничивающие водное пространство, которое может быть использовано для движения судна, называемое *судовым ходом*. С точки зрения геометрии судового хода представляет собой фигуру неправильной геометрической формы даже при условном разделении на прямолинейные и криволинейные участки. Резкие колебания уровня воды отражаются неблагоприятно на условиях судоходства, так как вызывают большие изменения в очертаниях водной поверхности реки, величине глубин, а также скорости течения. Влияние формы русла и сопротивлений в нем на характер изменения высоты уровня воды выражается в том, что при прочих одинаковых условиях в суженных местах долины и русла реки происходят более высокие и резкие подъемы уровня, а в расширенных — более плавные и пониженные. Ограниченная ширина и глубина изменяют характер влияния гидромеханических сил на корпус судна и усложняют управление.

Когда судоводителю удается удерживать судно вблизи оси судового хода, гидродинамическое взаимодействие между оконечностями и рельефом дна не оказывает значительного влияния на судно, поскольку оно балансируется равным давлением по обоим бортам. При движении судна по участкам с резко меняющимися габаритами, такими как крутые колена, места разветвления русла и другие факторы, за счет влияния сил гидродинамического взаимодействия между корпусом судна и дном реки на корпус судна будут действовать гидродинамические силы, способствующие зарыскиванию носовой части судна в сторону больших глубин, или, наоборот, при значительном сближении судна с кромкой судового хода вызывать зарыскивание в сторону берега. При возникновении гидродинамического взаимодействия судно приобретает вращательное движение, в результате которого будет действовать ускорение, вызванное действием сил гидродинамического взаимодействия [10], [11].

При проводке судна по прямолинейным участкам судоводители стараются удерживать судно на оси судового хода, а в случае, если это невозможно по путевым условиям, то ориентируются на положение судна относительно опасной изобаты, отображаемой стандартной ЭНК. При прохождении криволинейных участков судового хода судоводители также могут ориентироваться на общие правила о том, что вогнутый берег, как правило, обрывист, возле него обычно располагаются наибольшие глубины и наблюдаются большие скорости течения. Выпуклый берег, наоборот, имеет пологие очертания рельефа, обычно небольшие глубины около них и слабые течения. При выполнении поворота достаточно контролировать положение судна по знакам плавучего навигационного оборудования выпуклой кромки, поскольку при этом маневре «раскатка» кормы происходит в противоположную сторону.

Стандартные ЭНК содержат минимально необходимые данные о глубинах, анализируя которые получить представление об их изменении, достаточное для прогнозирования зарыскивания судна, не представляется возможным. Если судоводитель не ожидает рыскания, то, как правило, запаздывает предпринять соответствующие действия, что снижает контроль над ситуацией и проявляется в резкой тенденции носовой оконечности ухода в направлении больших глубин, усиления присасывания кормы к мелководью и разворота судна поперек судового хода до тех пор, пока удаление кормовой оконечности от кромки судового хода не снизит гидродинамический эффект. Действие гидродинамических сил в таких случаях может быть достаточно сложно компенсировать несмотря на перекладку руля на борт и полный ход вперед.

Отображение информации о глубинах за счет градиентной заливки [11], как показано на рис. 2, позволяющее использовать функцию масштабирования для детализированного отображения подводного рельефа при проводке судна по судовым ходам рек, водохранилищ, озер, каналам, дает судоводителю дополнительную информацию, которую можно получить как при непосредственном просмотре участка, по которому предстоит проводка судна в течение ходовой вахты, так и при проводке судна, когда требуется точная оценка положения и движения судна относительно пространственных навигационных опасностей. Такая оценка позволяет избежать резких изменений курса судна при следовании по прямолинейным участкам, необходимость в которых может возникнуть при оценке движения судна по одиночным знакам навигационного оборудования. Перед прохождением поворотов, ориентируясь по стандартной ЭНК, судоводитель может выделить общие закономерности изменения глубин в зависимости от кривизны судового хода. Как правило, любое резкое изменение одной из этих характеристик влечет за собой резкое изменение другой, а плавному изменению кривизны соответствует также плавное изменение глубин.

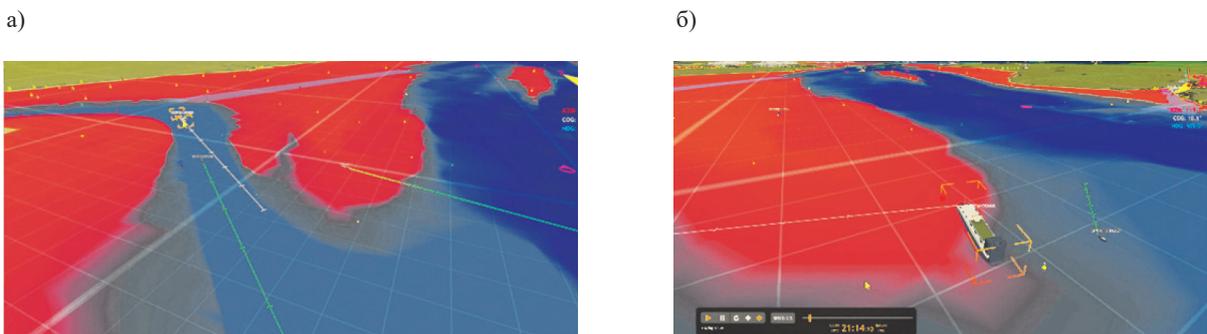


Рис. 2. Пример отображения области опасных глубин:
а — при движении судна в средней части фарватера;
б — при чрезмерном сближении судна с кромкой фарватера

При подходе судна к повороту, а также в процессе прохождения судном поворота ориентирование по 3D ЭНК (см. рис. 2) позволяет судоводителю оценивать общее пространство, доступное для движения, наметить общую траекторию движения, а также контролировать прохождение оконечностей судна относительно области опасных глубин, вне зависимости от схемы ограждения

знаками навигационного оборудования. При правильном управлении в момент начала поворота при переключке руля может происходить резкое увеличение угловой скорости, а как только руль отводится, угловая скорость также резко уменьшается за счет влияния сил гидродинамического взаимодействия. Поэтому наблюдение за движением судна по 3D ЭНК в процессе выполнения поворота позволяет тщательно контролировать расстояния до навигационных опасностей и удерживать величину угловой скорости в нужном пределе.

Одной из сложностей, возникающей при проводке судна с предельной осадкой по водному пути, имеющему габариты, сопоставимые с размерами судна, является *инерционное движение судна*. Маневренность судна резко изменяется при изменении соотношения глубины и осадки. При снижении этого соотношения до 1,3–1,5 судно может стать менее устойчивым относительно своего курса и двигаться рывками. Если соотношение глубины и осадки продолжает снижаться, то судно более четко следует намеченному курсу до тех пор, пока запас глубин под килем становится очень малым (соотношение глубины и осадки достигает значения 1,05–1,10) и судно маневрирует очень медленно [12]. Такое улучшение стабильности судна относительно курса является преимуществом на прямолинейных участках, однако низкая маневренность судна может явиться причиной возникновения проблем, связанных с его управлением, поэтому необходимо дополнительное пространство для маневрирования.

При прохождении криволинейных участков следует принимать во внимание влияние как радиуса закругления, так и течения на ширину маневровой полосы, занимаемой судном. Расчетные данные применимы для использования только в общем виде и проявляются в виде принципов, в соответствии с которыми с увеличением радиуса кривизны судового хода ширина, необходимая для прохождения судна, уменьшается, причем особенно интенсивное уменьшение наблюдается при небольших отношениях радиуса кривизны к длине судна (состава); разность между необходимой шириной маневровой полосой при движении вниз и вверх уменьшается; с уменьшением скорости движения судна относительно воды эта разность возрастает. Визуальное ориентирование по 3D ЭНК позволяет оценивать фактические радиусы применительно к габаритам судна и фактическим параметрам его движения.

Учет влияния течения. Из практики судовождения по ВВП известно, что течение воды, направленное под углом к диаметральной плоскости (ДП) судна, одновременно изменяет как скорость, так и траекторию движения судна. Значение истинной скорости движения судна зависит от суммы / разности скорости течения и судна, значение угла сноса — от направления течения относительно ДП судна, скорости течения и скорости движения судна (чем больше угол между течением и ДП судна и меньше скорость движения судна, тем больше величина сноса).

Скорость течения на судовом ходе в слое воды, равном осадке судна, называется *эксплуатационной скоростью течения*. Данные об эксплуатационных скоростях течения помещаются в навигационно-гидрографических очерках атласов водных путей и лоциях в виде зависимостей от расхода воды, отнесенных к определенным горизонтам воды на водомерных постах. Правильный учет течений особенно важен в затрудненных для плавания местах: на перекатах, в проходах под мостами, вблизи искусственных сооружений и различных навигационных опасностей. Причинами, обуславливающими неравномерность течения и турбулентный режим речного потока, являются непрерывное изменение во времени и по длине реки расхода протекающей воды, изменение уклонов, формы и размеров поперечного сечения русла и его шероховатости.

Величины поперечных уклонов на средних и малых реках могут быть столь значительны, что иногда превышают величину продольного уклона реки. Подобно течениям, обусловленным силой Кориолиса, течения, вызванные центробежной силой в сумме с поступательным движением, образуют винтовое движение струй на изгибе, причем, в соответствии с направлением кривизны русла, они направлены то по часовой стрелке, то против.

Фрагменты 3D ЭНК, представленной на рис. 3, показывают навигационную подводную обстановку вокруг судна в общем масштабе и при использовании масштабирования по вертикали. Оценить подводную обстановку можно визуальным сравнением форм рельефа речного русла

в масштабе осадки судна [12]. Управление судном на течении позволяет оценивать характеристики течений применительно к отображаемым особенностям речного русла, выбирать оптимальный курс относительно направления течения и устанавливать соответствующий режим работы двигателей. При прохождении по участкам с сильным свальным течением можно выбирать безопасную траекторию движения с большой поправкой на течение (в сторону течения) или траекторию, проходящую через область больших глубин, позволяющих значительно увеличивать скорость движения.

а)



б)



Рис. 3. Пример отображения подводной обстановки на 3D ЭНК при использовании функции вертикального масштабирования: а — общий масштаб; б — крупный масштаб по вертикали

В руслах рек, кроме основного продольного поступательного движения воды, существуют внутренние циркуляционные течения, которые в совокупности с продольными образуют сложные формы винтообразных течений [13], [14]. Происхождение таких течений обуславливается наличием подводных русловых образований рельефа, оказывающих влияние на направление течения. Установлено, что верхние струи следуют общему направлению течения, а нижние — изгибам речного дна. В руслах рек встречаются многочисленные и разнообразные отложения наносов и углубления, образовавшиеся в период половодья. Эти русловые образования при низких уровнях воды в реке оказывают влияние на донные течения, отклоняя их в направлениях, не совпадающих с уклонами водной поверхности и направлениями поверхностных течений.

В соответствии с очертаниями рельефа русла направление течений, как и скорость, подвержено значительным изменениям. Особенно резкие местные изменения течений происходят в половодье. Для общей оценки направлений течения применяются глазомерные способы и косвенные признаки

(например, вид поверхности воды, очертания русла, плывающие по реке случайные предметы или пена после прохождения дождей и т. п.). При некоторых формах рельефа речного русла и соответствующих гидрологических условиях в речном потоке образуются местные неблагоприятные и даже опасные для судоходства течения. К ним относятся навалы (прижимные), затяжные и свальные течения и водовороты.

Навалы течения, действие которых выражено сильным сносом судка в сторону берега или какого-либо объекта, возникают под действием центробежной силы на изгибе русла. *Затяжные течения* направлены из главного русла реки в протоки, особенно в прорывы, в период половодья, так как уклоны и скорости течения в таких местах значительно больше, чем в главном русле реки. *Свальные течения*, вызываемые поперечным уклоном водной поверхности и пересекающие ось судового хода под некоторым углом, наблюдаются на перекатных участках рек, расположенных на изгибах русла при переходе стрежня от одного берега к другому. Наибольшая интенсивность поперечных течений, вызванных центробежной силой, наблюдается несколько ниже по течению реки относительно вершины кривой, т. е. точки наибольшей кривизны, а здесь под вогнутыми берегами, обычно наблюдаются и наибольшие глубины. Затухание поперечных течений и наименьшая глубина находятся на перевале от одного берега к другому, несколько ниже точки нулевой кривизны.

3D ЭНК освещает подводную обстановку достаточным образом для получения представления об особенностях всех видов течений и обуславливающих их причинах как искусственного характера (например, навалы течения, действующих близ устоев мостов, дамб, причалов), так и естественных (например, свальных течений, направленных на подводные косы, нечистые яры и затопленные во время половодья меженные берега реки). Такие течения, не совпадающие с общим потоком и направленные через мелководье, имеют большую скорость, так что проходящие суда под их действием смещаются с оси судового хода и могут сблизиться с мелью на малые расстояния или быть посажены на мель.

Учет влияния ветра. Хорошо известно, что ветровой дрейф судна приводит к изменению ширины маневренной полосы движения, которая будет изменяться от минимального значения, равного ширине судна, до некоторого максимального значения, равного длине судна. При этом, если максимальное значение ширины маневренной полосы движения судна будет соизмеримо или превышать допустимую полосу движения (ширину судового хода), предусмотренную существующими правилами плавания, то это приведет к появлению опасной навигационной ситуации выхода любой оконечности движущегося судна за допустимые границы движения с возможным касанием дна из-за необеспеченности допустимых глубин при заданных параметрах осадки.

Естественно, что помимо изменчивости углов дрейфа судна на безопасность прохода судна будет влиять также и боковое смещение, которое зависит от качества управления судном и способности удерживать центр величины на оси судового хода при управлении судном. Таким образом, при проводке судна по ВВП вопрос компенсации неблагоприятного влияния ветра при проводке по прямолинейным участкам и его учет при прохождении поворотов может стать определяющим.

При проводке судна в условиях ветра судоводителю необходимо решать две основные задачи по управлению судном: учет дрейфа судна и работа рулем для компенсации ветрового момента. Наибольший дрейф судна будет вызывать ветер, направленный под близким к прямому углу к ДП судна, в то время как наибольший момент возникает при действии ветра со стороны кормовых курсовых углов. Приближение ветрового воздействия к лимитирующим значениям характеризуется непостоянством как силы, так и направления. Действие ветровых сил значительной изменчивости приведет к изменчивости углов дрейфа и значительной рыскливости судна, вызванной меняющимися составляющими силы сопротивления при прохождении сужений и расширений судового хода. Пример отображения собственного судна в области просмотра 3D ЭНК при следовании по судоводному каналу неправильной геометрической формы представлен на рис. 4 [13]. В таких условиях контроль за движением судна будет представлять значительные трудности как при следовании по прямолинейным участкам, так и при прохождении поворотов.

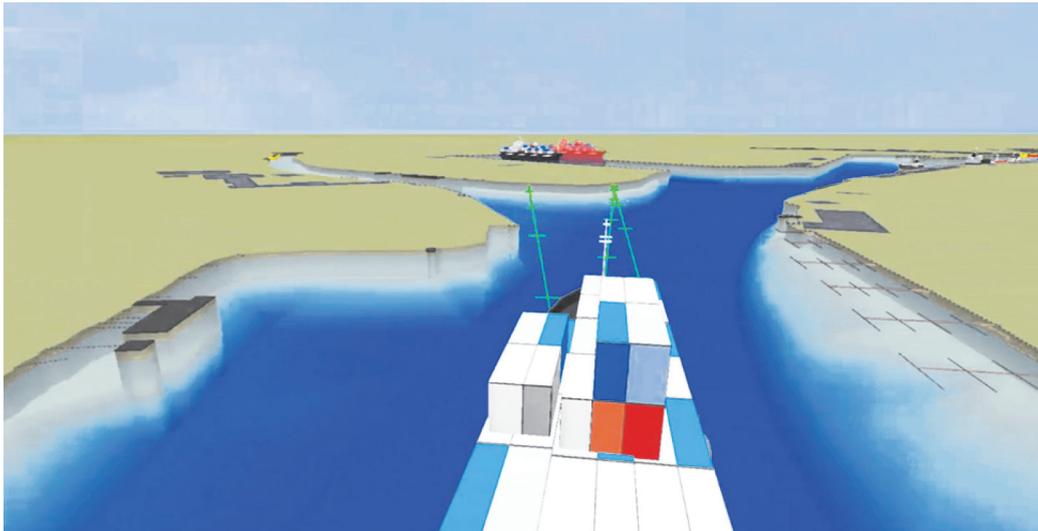


Рис. 4. Вид собственного судна в области просмотра 3D карты при следовании по судоходному каналу неправильной геометрической формы

При следовании по прямолинейным участкам для удержания курса потребуются выбор ориентиров и постоянная работа рулем для удержания курса и его изменения в условиях изменчивого влияния ветра. Следует учитывать также, что начиная с некоторого угла перекладки руля коэффициент подъемной силы будет снижаться, а, следовательно, будет снижаться и возможность судоводителя обеспечивать необходимые параметры движения судна. Это проявляется в том, что несмотря на величину перекладки руля и продолжительность ее периода угловая скорость управляемого рулем судна будет меняться медленно, что приводит к задержкам при изменении курса и сближению с кромкой судового хода не только под воздействием ветра, но и течения. При совместном действии ветра и течения наихудшим является случай, когда течение и ветер действуют со стороны разных бортов, что связано с увеличением относительной скорости судна, которая вызывает возрастание гидродинамической силы и, соответственно, момент, создаваемый этой силой, также увеличивается.

Таким образом, очевидно, что судоводителю необходимо иметь некую эталонную траекторию движения, параметры которой известны заранее, чтобы иметь данные для сравнительного анализа [15]. Наличие данных об эталонной траектории, которые могут быть получены при выполнении предварительной проработки маршрута перехода и использованы при проводке судна расчетно-инструментальным методом, представляющим собой совокупность штурманского и лоцманского методов проводки. Однако под действием лимитирующих внешних факторов судно может значительно отклоняться от намеченной траектории, так что данные, полученные при выполнении предварительной проработки маршрута, использовать будет нельзя и судоводителю потребуется дополнительная оперативная навигационная информация.

В условиях значительных ветровых воздействий, когда заблаговременно рассчитать и оценить прохождение судна с меньшими дистанциями до опасных изобат практически невозможно, навигационная информация, отображаемая 3D ЭНК, позволяет судоводителю оперативно выполнять оценку местоположения и движения судна относительно направлений и границ судового хода, ориентируясь как по знакам плавучего навигационного оборудования, так и по пространственной подводной обстановке. Дальнейшее увеличение угла дрейфа может привести к уменьшению водного пространства между носовой и кормовой частями судна и кромками судового хода, вследствие чего будет наблюдаться эффект гидродинамического взаимодействия, особенно кормовой части судна. Такое маневрирование, без оценки пространственной подводной обстановки, связано со значительными рисками и является опасным.

При проводке судна по криволинейным участкам при ветрах различных направлений судоводитель использует общие принципы оценки изменения траектории движения судна. Так, воздействие ветра встречных направлений характеризуется уменьшением величины выбега и некоторым увеличением диаметра циркуляции, так что траектория циркуляции смещается в подветренную сторону. При попутных ветрах в большинстве случаев наблюдается значительное увеличение выбега и диаметра циркуляции. При наличии сильного бортового ветра параметры циркуляции при повороте *на ветер* значительно лучше, чем при повороте *под ветер*.

Настраивать 3D ЭНК можно применительно к габаритам судоходного пути и размерам собственного судна так, чтобы одновременно отображать совокупность плавучих навигационных, наблюдение которых существенно для прохождения поворота применительно к конкретным обстоятельствам и условиям плавания, а также когда их положение становится важным для управления судном [16].

Обсуждение (Discussion)

При проводке судна по ВВП в условиях воздействия лимитирующих гидрометеорологических факторов судну может потребоваться значительно больше пространства для движения, что обусловлено как изменчивостью действия внешних факторов, так и ухудшением его управляемости, что приводит как к отклонению судна от курса и смещению с траектории движения, так и к значительным углам суммарного дрейфа. Значительное возрастание ширины маневровой полосы и смещение с траектории движения требуют от судоводителя вести судно с минимальными запасами к ширине маневровой полосы. 3D ЭНК при управлении судном в стесненных навигационных условиях плавания, характерных для ВВП, позволяет учитывать такие параметры, как фактическая ширина и глубина судового хода, ориентируясь по пространству между бортами судна и кромкам судового хода, наблюдаемыми с ходового мостика судна.

Визуальное наблюдение по 3D ЭНК дает возможность оценивать отдельно движение носовой и кормовой оконечности, что может быть использовано для принятия упреждающих действий и компенсации неблагоприятного влияния лимитирующих соотношений габаритов судового хода к соответствующим размерениям судна, ветрового воздействия, неправильных и криволинейных течений, действующих на различных участках. Проводка судна с использованием 3D ЭНК позволяет отображать навигационную ситуацию вокруг судна, изменяя положение в пространстве и угол точки обзора, что дает возможность поддерживать наблюдение и ориентирование относительно совокупности знаков навигационного оборудования. Использование этих данных совместно с информацией о маневренных характеристиках судна и данных о положении органов управления позволяет оценить имеющееся водное пространство и траекторию движения судна на некоторое время вперед, достаточное для принятия следующих решений по управлению судном. Такое количество навигационной информации является достаточным для проводки судна, для которого запасы по глубине и ширине являются предельными.

Особенности отображения навигационной информации в 3D ЭНК при проводке судов по ВВП при лимитирующих внешних воздействиях дают существенные преимущества для контроля за движением судна за счет увеличения количества информации и упрощения ее представления, так что судоводитель имеет возможность учитывать новую информацию при предварительном ознакомлении с участком, по которому предстоит проводить судно, т. е. позволяет принимать упреждающие решения как на основании картографической информации, так и оперативного регулирования параметров движения судна с учетом фактического влияния лимитирующих внешних факторов и в первую очередь уровня воды.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что под действием лимитирующих внешних факторов судно может значительно отклоняться от намеченной траектории, так что данные, полученные при выполнении предварительной проработки маршрута, использовать будет нельзя и судоводителю потребуется дополнительная оперативная навигационная информация.

Использование 3D ЭНК при проводке судов по ВВП дополняет данные о параметрах движения судна, полученные при выполнении предварительной проработки маршрута перехода и, таким образом, расширяет практику применения расчетно-инструментального метода проводки. Так что наблюдая за движением судна визуальным и отображением параметров его движения, можно переходить от управления судном по курсу при незначительном влиянии внешних факторов к управлению судном по скорости с учетом фактического уровня воды, вплоть до управления вектором скорости судна, когда влияние внешних факторов возрастает и необходимо точно выдерживать траекторию движения судна.

Рассмотренные особенности получения новой информации судоводителем на основании применения 3D ЭНК в работе повышают эффективность и безопасность проводки судов по ВВП в условиях воздействия лимитирующих внешних факторов как за счет новой информации при непрерывном наблюдении за обстановкой, складывающейся вокруг судна, так и за счет предварительного планирования и выполнения отдельных маневров. Дополнительная информация, получаемая визуальным, позволяет судоводителю принимать во внимание большое количество внешних факторов, а именно: свободное пространство со стороны каждого из бортов и запас под килем с учетом подводного рельефа, что повышает класс управления судном и уровень выполнения ключевых судовых операций, поэтому высокое качество подготовки судоводительского состава является одним из основных требований современных отраслевых стандартов безопасности.

Внедрение на судах смешанного *река–море* плавания 3D ЭНК, вырабатывающих новую навигационную информацию, которая может использоваться для принятия как долгосрочных, так и оперативных решений по управлению судном в условиях лимитирующих внешних факторов, предоставляет судоводителю новые возможности для решения задач управления судном, тем самым повышая навигационную безопасность плавания в условиях лимитирующих гидрометеорологических факторов. Навигационная информация, доступная судоводителю при управлении судном, позволяет повысить точность действий как при следовании по прямолинейным участкам, так и при прохождении поворотов, вызывающих затруднения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев В. И.* Справочник капитана / В. И. Дмитриев, В. В. Каретников. — М.: Моркнига, 2020. — 735 с.
2. *Ланидус В. М.* Расчетно-инструментальный метод проводки судов по внутренним судоходным путям / В. М. Ланидус, О. И. Мокрозуб. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2002. — 81 с.
3. *Ланидус В. М.* Рекомендации по управлению судном на ВВП с использованием РЛС, САРП / В. М. Ланидус, О. И. Мокрозуб. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2004. — 119 с.
4. *Каретников В. В.* Динамика методологии управления судном в узкости при использовании 3D навигационных карт / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, К. И. Ефимов // *Морская радиоэлектроника*. — 2019. — № 3 (69). — С. 44–49.
5. *Goralski R.* Applications and benefits for the development of cartographic 3D visualization systems in support of maritime safety / R. Goralski, C. Ray, C. Gold // *TransNav-International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2011. — Vol. 5. — No. 4. — Pp. 423–431.
6. *Lataire E.* Navigation in Confined Waters: Influence of Bank Characteristics on Ship-Bank Interaction / E. Lataire, M. Vantorre, E. Laforce, K. Eloit, G. Delefortrie // *2nd International Conference on Marine Research and Transportation, Naples, Italy*. — 2007. — Pp. 135–143.
7. *Каретников В. В.* Применение 3d электронных навигационных карт при авариях, связанных с посадкой на мель, и для их предотвращения в стесненных условиях плавания / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, Ю. Г. Андреев, О. И. Мокрозуб // *Морская радиоэлектроника*. — 2020. — № 2 (72). — С. 22–28.
8. *Ng H. F.* A computation effective range-based 3D mapping aided GNSS with NLOS correction method / H. F. Ng, G. Zhang, L. T. Hsu // *The Journal of Navigation*. — 2020. — Vol. 73. — Is. 6. — Pp. 1202–1222. DOI: 10.1017/S037346332000003X.
9. *Hirtle S.* Navigation in electronic environments / S. Hirtle, M. Sorrows // *Applied Spatial Cognition*. — Psychology Press, 2020. — Pp. 103–126.
10. *Kobayashi H.* Analysis of Techniques for Ship Handling / H. Kobayashi // *Techniques for Ship Handling and Bridge Team Management*. — New York: Routledge, 2019. — Pp. 23–78.

11. Усов В. Д. Управление судном при плавании в узкостях / В. Д. Усов, А. А. Волков. — Астрахань: ИПК «Волга», 2008. — 133 с.
12. Прохоренков А. А. Использование трехмерных навигационных карт для повышения безопасности судовождения по внутренним водным путям / А. А. Прохоренков // *International Journal of Advanced Studies*. — 2019. — Т. 9. — № 1. — С. 26–49. DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-26-49.
13. Моргунов В. К. Общая логия внутренних водных путей: учеб. пособие / В. К. Моргунов. — Новосибирск: Новосиб. госуд. акад. вод. трансп., 2005. — 170 с.
14. Барышников Н. Б. Руслвые процессы: учеб. / Н. Б. Барышников. — СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. — 439 с.
15. Zaikov V. I. Mathematical Model for Ship Controlled Motion in Manoeuvring under the Conditions of Shallows, Winds and Flows / V. I. Zaikov // *Computer Technique & Advanced Scientific Instrumentation in Ship Hydrodynamics. Proceedings of the 13-th SMSSH*. — Varna, 1984. — Vol. 1. — Report #95. — Pp. 1–5.
16. Прохоренков А. А. Повышение эффективности решения задач управления судном в стесненных условиях при использовании морских 3-D электронных навигационных карт / А. А. Прохоренков // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технические науки*. — 2019. — № 4. — С. 76–85.

REFERENCES

1. Dmitriev, V. I., and V. V. Karetnikov. *Spravochnik kapitana*. M.: Morkniga, 2020.
2. Lapidus, V. M., and O. I. Mokrozub. *Raschetno-instrumental'nyi metod provodki sudov po vnutrennim sudokhodnym putyam*. SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 2002.
3. Lapidus, V. M., and O. I. Mokrozub. *Rekomendatsii po upravleniyu sudnom na VVP s ispol'zovaniem RLS, SARP*. SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 2004.
4. Karetnikov, V. V., A. A. Prokhorenkov, and K. I. Efimov. “Dynamics of ship handling methodology in narrows by using 3d navigation charts.” *Marine Radio-electronics* 3(69) (2019): 44–49.
5. Goralski, Rafal, Cyril Ray, and Chris Gold. “Applications and benefits for the development of cartographic 3D visualization systems in support of maritime safety.” *TransNav-International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 5.4 (2011): 423–431.
6. Lataire, E., M. Vantorre, E. Laforce, K. Eloit, and G. Delefortrie. “Navigation in Confined Waters: Influence of Bank Characteristics on Ship-Bank Interaction.” *2nd International Conference on Marine Research and Transportation, Naples, Italy*. 2007. 135–143.
7. Karetnikov, V. V., A. A. Prokhorenkov, Yu. G. Andreev, and O. I. Mokrozub. “Application of 3d electronic navigation charts for prevention and in case of groundings in restricted waters.” *Marine Radio-electronics* 2(72) (2020):22–28.
8. Ng, Hoi-Fung, Guohao Zhang, and Li-Ta Hsu. “A computation effective range-based 3D mapping aided GNSS with NLOS correction method.” *The Journal of Navigation* 73.6 (2020): 1202–1222. DOI: 10.1017/S037346332000003X.
9. Hirtle, Stephen, and Molly Sorrows. “Navigation in electronic environments.” *Applied Spatial Cognition*. Psychology Press, 2020. 103–126.
10. Kobayashi, Hiroaki. “Analysis of Techniques for Ship Handling.” *Techniques for Ship Handling and Bridge Team Management*. New York: Routledge, 2019. 23–78.
11. Usov, V.D., and A. A. Volkov. *Upravlenie sudnom pri plavanii v uzkostyakh*. Astrakhan': IPK “Volga”, 2008.
12. Prokhorenkov, Andrei Aleksandrovich. “Use of three-dimensional navigation charts to improve inland waterways navigation safety.” *International Journal of Advanced Studies* 9.1 (2019): 26–49. DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-26-49.
13. Morgunov, V. K. *Obshchaya lotsiya vnutrennikh vodnykh putei: Uchebnoe posobie*. Novosibirsk: Novosib. gosud. akad. vod. transp., 2005.
14. Baryshnikov, N. B. *Ruslovye protsessy: Uchebnik*. SPb.: Izd. RGGMU, 2008.
15. Zaikov, V. I. “Mathematical Model for Ship Controlled Motion in Manoeuvring under the Conditions of Shallows, Winds and Flows.” *Computer Technique & Advanced Scientific Instrumentation in Ship Hydrodynamics. Proceedings of the 13-th SMSSH*. Vol. 1. Varna, 1984. Report #95. 1–5.
16. Prokhorenkov, Andrei A. “Improving the efficiency of solving the tasks of shiphandling in narrows when using marine 3-d electronic navigation charts.” *Modern Science: actual problems of theory and practice. A series: Natural and Technical Sciences* 4 (2019): 76–85.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович —

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru,
spguwc-karetnikov@yandex.ru

Андрюшечкин Юрий Николаевич —

кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: andryushechkin_y@mail.ru,
kaf_svvp@gumrf.ru

Прохоренков Андрей Александрович —

кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: a.a.prokhorenkov@mail.ru,
kaf_svvp@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karetnikov, Vladimir V. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru,
spguwc-karetnikov@yandex.ru

Andryushechkin, Yuri N. —

PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: andryushechkin_y@mail.ru,
kaf_svvp@gumrf.ru

Prokhorenkov, Andrey A. —

PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: a.a.prokhorenkov@mail.ru,
kaf_svvp@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 7 июня 2021 г.

Received: June 7, 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-465-479

SUPPLEMENTING RADAR INFORMATION TO SOLVE SHIP SAFETY PROBLEMS

A. A. Ershov A. V. Mikhnevich, A. I. Kritsky

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The issue of increasing the navigation intensity when navigating in narrow areas, in limited water areas, as well as in the areas of ship traffic control systems operation, including in storm conditions, requires masters and the operator of the ship traffic control system to make decisions quickly and correctly to assess the collision situation and choose the option of maneuvering ships to prevent accidents. The solution of these tasks can be achieved by supplementing the information of radar stations, as well as the means of automatic radar laying with information on the maneuvering of ships, as well as information on the dangers of storm navigation when the ship course and speed change. An addition to the information of radar stations and automatic radar laying facilities is proposed. The addition makes it possible to effectively solve the tasks of assessing the risk of collision and safe maneuvering of ships without additional time spent on “playing” the maneuver in various navigation conditions, including a storm. It is noted that in accordance with the provisions of this article the parameters of the vessel movement zones can be set for 1 min of maneuvering with a rudder shift angle of 15 degrees. Such a maneuver may occur as a result of a breakdown of the steering device or erroneous maneuvering and should be taken into account when assessing the possibility of safe movement of the vessel. These data in the form of additional information from the means of automatic radar laying and radar stations allow you to quickly and accurately monitor the safety of ship traffic and assess the risk of collision. Attention is drawn to the fact that sailing in stormy conditions is accompanied by such a dangerous phenomenon as resonance for various types of pitching, which can lead to dangerous phenomena, such as loss of stability and capsizing of the vessel. Additional information for the means of automatic radar laying and radar stations according to the resonance conditions can help the skipper to avoid these dangerous phenomena by changing the course of the vessel. This information can be used both on existing means of automatic radar laying and radar stations, and on promising navigation devices, including for the vessels operated without human intervention. The methods proposed in this paper, based on the use of additional information about the maneuverability characteristics and movement of the vessel to solve the problems of ensuring the safety of movement in narrow spaces and the problems of vessels divergence in various navigation conditions, including a storm, can be used on existing navigation devices and at the creation of new navigation equipment installed on ships with and without a crew on board.

Keywords: accounting for ship maneuvering, development of navigation technology, ensuring the safety of ships in narrows and when sailing in a storm.

For citation:

Ershov, Andrey A., Andrey V. Mikhnevich, and Andrey I. Kritsky. “Supplementing radar information to solve ship safety problems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.4 (2021): 465–479. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-465-479.

УДК 655.62.052.4

ДОПОЛНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВ

А. А. Ершов, А. В. Михневич, А. И. Крицкий

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен вопрос увеличения интенсивности судоходства при плавании в узкостях, на ограниченных акваториях, а также в зонах действия систем управления движением судов, в том числе в условиях шторма, требующий от судоводителей и оператора системы управления движением судов скорости и безошибочности принятия решений в оценке ситуации столкновения и выборе варианта маневрирования судов

для предотвращения аварийных ситуаций. Решение данных задач может быть достигнуто дополнением информации, полученной от радиолокационных станций, средств автоматической радиолокационной прокладки информацией по маневрированию судов, а также информации по опасностям штормового плавания при изменении курса и скорости судна. Предлагается дополнение к информации радиолокационных станций и средств автоматической радиолокационной прокладки, позволяющее эффективно решать задачи оценки опасности столкновения и безопасного маневрирования судов без дополнительных затрат времени на «проигрывание маневра», в различных условиях плавания, включая шторм. Отмечается, что в соответствии с положениями настоящей статьи могут быть установлены параметры зон движения судна за 1 мин осуществления маневра с углом перекладки руля 15 град. Такой маневр может возникнуть в результате поломки рулевого устройства или ошибочного маневрирования и должен учитываться при оценке возможности безопасного движения судна. Эти данные в виде дополнительной информации средств автоматической радиолокационной прокладки и радиолокационных станций позволяют быстро и безошибочно осуществлять контроль безопасности движения судов и оценивать опасность столкновения. Обращается внимание на то, что плавание в штормовых условиях сопровождается таким опасным явлением, как резонанс по различным видам качки, который может приводить к опасным явлениям, таким как потеря остойчивости и опрокидывание судна. Дополнительная информация для средств автоматической радиолокационной прокладки и радиолокационных станций в зависимости от условий резонанса может помочь судоводителю избежать этих опасных явлений путем изменения курса судна. Данная информация может использоваться как на существующих средствах автоматической радиолокационной прокладки и радиолокационных станциях, так и на перспективных навигационных приборах, в том числе для судов, управляемых без участия человека. Предлагаемые в настоящей статье способы, основанные на использовании дополнительной информации о маневренных характеристиках и движении судна для решения задач обеспечения безопасности движения в узкостях и задач расхождения судов в различных условиях плавания, включая шторм, могут найти применение в существующих навигационных приборах и использоваться при создании новой навигационной техники, которая может быть реализована как на судах с экипажем, так и без экипажа на борту.

Ключевые слова: учет маневрирования судна, развитие навигационной техники, обеспечение безопасности судов в узкостях и при плавании в шторм.

Для цитирования:

Ершов А. А. Дополнение радиолокационной информации при решении задач безопасности судов / А. А. Ершов, А. В. Михневич, А. И. Крицкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 465–479. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-465-479.

Введение (Introduction)

Увеличение интенсивности судоходства при плавании в узкостях, на ограниченных акваториях, а также в зонах действия систем управления движением судов (СУДС), в том числе в условиях шторма, требуют от судоводителей и оператора СУДС скорости и безошибочности принятия решений по оценке ситуации столкновения и выбора варианта маневрирования судов для предотвращения аварии. Решение данных задач может быть достигнуто дополнением информации радиолокационных станций (РЛС), а также средств автоматической радиолокационной прокладки (САРП) информацией по маневрированию судов, а также опасностям штормового плавания при изменении курса и скорости судна

Научно-обоснованным подходам к решению данных задач в узкостях посвящены работы [1]–[5], однако отсутствие учета возможного маневрирования своего судна и судна-цели при оценке опасности столкновения и решении задач расхождения судов делают данные работы неприменимыми для реализации ранее указанных задач. Частично недостатки работ [1]–[5] устранены в работах [6], [7], в которых предлагается использование специально рассчитываемых зон маневрирования судов для решения ряда задач обеспечения безопасности движения судов в узкостях. В работах [8]–[12] рассматривались маневры во избежание опасных ситуаций в различных условиях плавания. В работах [13]–[16] предлагается использование искусственного интеллекта и нейронных сетей для решения задач мореплавания. В работе [17] предлагается способ учета параметров маневрирования судна при решении задач обеспечения безопасности судов в узкостях, который может быть использован САРП, РЛС также другими средствами электрон-

ной навигации. В работах [18], [19] предлагаются способы во избежание опасностей штормового плавания при помощи специальных диаграмм опасностей, которые также могут использоваться в составе современных и перспективных САРП и РЛС.

В настоящей статье предлагается дополнение к информации РЛС, САРП, позволяющее эффективно решать задачи оценки опасности столкновения и безопасного маневрирования судов без дополнительных затрат времени на «проигрывание маневра» в различных условиях плавания, включая штормовые.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для обеспечения собственного движения с заданными курсом и скоростью, а также при выполнении маневров судно занимает определенную часть акватории, на которой выполняет движение или маневрирование. Размер этой части акватории, отсутствие внутри нее опасностей в виде мелей, других судов или морских сооружений предоставляют возможность судну осуществить безопасное движение или расхождение с другими судами. В работе [17] учет возможности безопасного движения и маневрирования предлагается производить с использованием зон движения судна (ЗДС) и/или зон экстремального и безопасного маневрирования (ЗЭМ и ЗБМ).

В соответствии с положениями работы [17] ЗЭМ может быть представлена в упрощенной форме для решения задач на существующих САРП и РЛС. Наиболее удобно представлять ее в виде простых геометрических фигур, ограничивающих ЗЭМ на существующих САРП, РЛС и/или электронных картах, включающих функции РЛС и САРП (рис. 1) из «Таблицы маневренных характеристик судна».

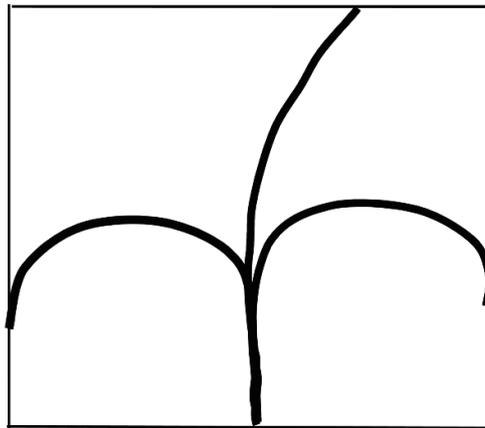


Рис. 1. Упрощенное представление полной зоны экстремального маневрирования для использования в РЛС и САРП

В соответствии с положениями работы [17] могут быть установлены параметры ЗДС за 1 мин выполнения маневра с углом перекладки руля 15 град. Такой маневр может возникнуть в результате поломки рулевого устройства или ошибочного маневрирования и должен учитываться при оценке возможности безопасного движения судна. Согласно результатам систематических расчетов в соответствии с [17], параметры ЗДС для абсолютного большинства судов имеют значения, приведенные на рис. 2. Это позволяет использовать их для САРП и РЛС в виде дополнительной информации к векторам движения судна.

Дополнительная информация о ЗДС и ЗЭМ на существующих САРП и РЛС и современных электронных картах позволит использовать их параметры для оценки опасности столкновения, как это показано на рис. 1 и 3. Использование теоретических положений [17] предоставляет возможность учета в ЗЭМ факторов, влияющих на движение судна, а именно: мелководья, ветра, волнения, течения, гидродинамического взаимодействия и т. п.

$S(1)$

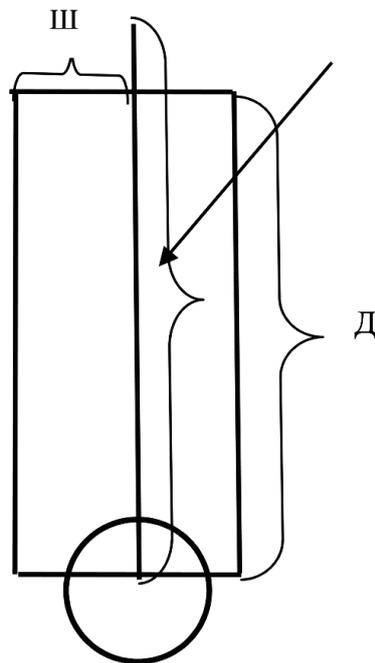


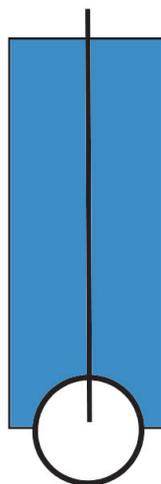
Рис. 2. Параметры ЗДС при маневре с углом перекладки 15 град. левого или правого борта за 1 мин выполнения маневра:

$S(1)$ — расстояние, проходимое судном за 1 мин без маневра;

Ш — ширина ЗДС при маневре 15 град. левого борта за 1 мин выполнения маневра ($Ш = (0,1-0,3) S(1)$);

Д — длина ЗДС при маневре 15 град правого борта за 1 мин выполнения маневра ($Д = (0,7-0,9) S(1)$)

а)



б)



Рис. 3. Упрощенное представление зон движения судна при маневре 15 град. левого (а) или правого (б) борта за 1 мин его выполнения

Пример учета влияния мелководья на ЗЭМ. В соответствии с положениями [17] наличие мелководья приводит к увеличению диаметра циркуляции и к изменениям ЗЭМ из «Таблицы маневренных характеристик судна» согласно следующему принципу: *ЗЭМ визуально будет «расширяться» в зависимости от параметров мелководья* (рис. 4).

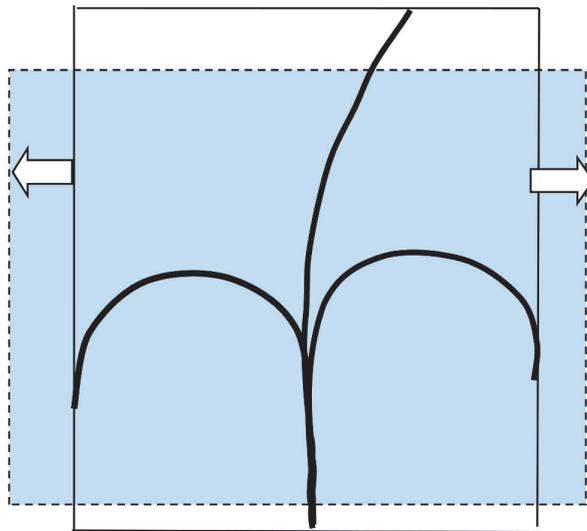


Рис. 4. Учет влияния мелководья в полной зоне экстремального маневрирования и ее расширение в зависимости от уровня мелководья

Пример учета ветра, влияния волнения и течения на ЗЭМ (рис. 5). В соответствии с положениями [17], наличие ветра, волнения и течения приводит к смещению циркуляции и параметров реверса в сторону под действием волнения и течения. Влияние ветра, волнения и течения ведет к изменениям ЗЭМ согласно следующему принципу: ЗЭМ визуально будет «смещаться» в зависимости от направления и скорости ветра, направления волнения и течения.

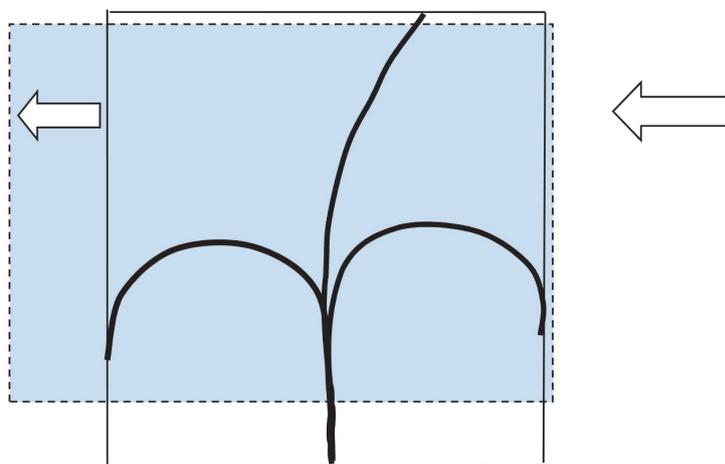


Рис. 5. Учет влияния ветра, волнения и течения в полной зоне экстремального маневрирования (смещение в сторону под действием ветра, волнения и течения)

Пример учета влияния гидродинамического взаимодействия на ЗЭМ из «Таблицы маневренных характеристик судна». В соответствии с положениями [17] наличие гидродинамического взаимодействия приводит к смещению параметров циркуляции и реверса в сторону судна или другого объекта, находящегося в зоне гидродинамического взаимодействия. Влияние гидродинамического взаимодействия ведет к изменениям ЗЭМ согласно следующему принципу: ЗЭМ визуально будет «смещаться» в сторону другого судна или объекта, находящегося в зоне гидродинамического взаимодействия. Наличие близости или пересечения ЗЭМ может приводить к возникновению гидродинамического взаимодействия и возможному навалу на судно и/или другие объекты (рис. 6).

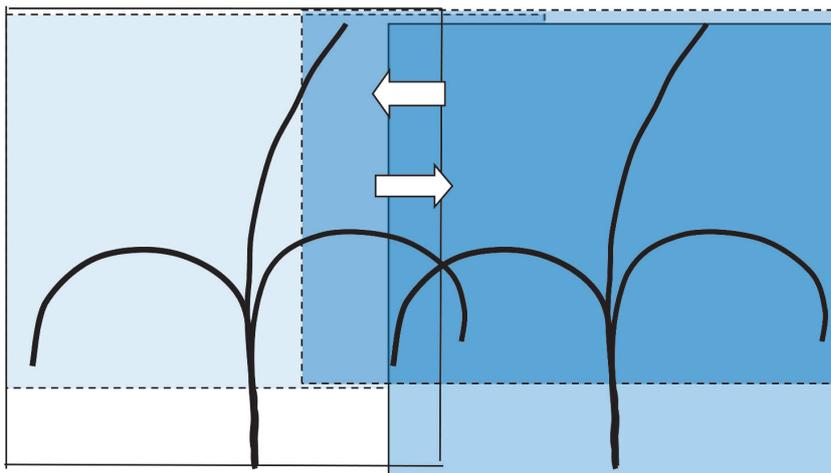


Рис. 6. Учет влияния гидродинамического взаимодействия в ЗЭМ, ее смещение в сторону, возможный навал на суда и/или другие объекты, находящиеся в зоне гидродинамического взаимодействия

Использование теоретических положений [17] предоставляет возможность учета в ЗДС за 1 мин осуществления маневра факторов, влияющих на движение судна: мелководья, ветра, волнения, течения и гидродинамического взаимодействия.

Пример учета влияния мелководья на ЗДС (рис. 7). В соответствии с положениями [17] наличие мелководья приводит к увеличению диаметра циркуляции и к изменениям ЗДС согласно следующему принципу: ЗДС визуальнo будет «расширяться» в зависимости от параметров мелководья.

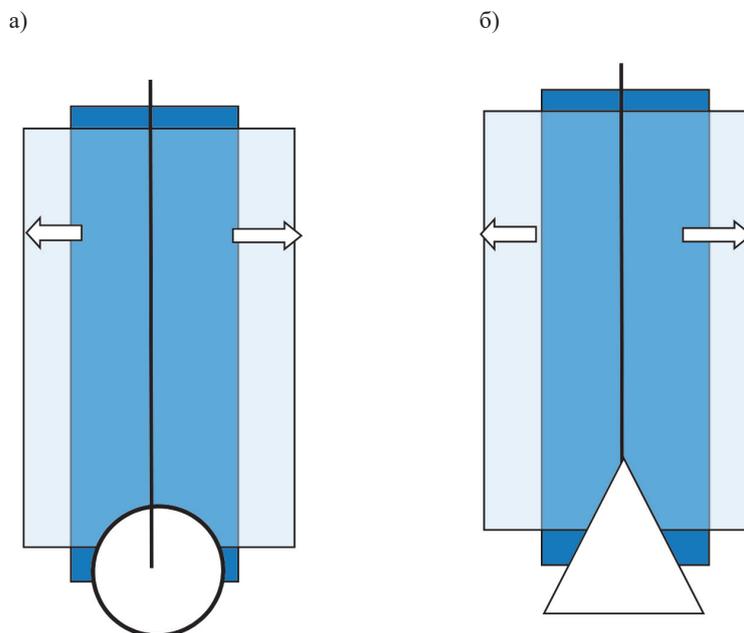


Рис. 7. Учет влияния мелководья на параметры ЗДС (а) и ее «расширение» в зависимости от уровня мелководья (б)

Пример учета ветра, влияния волнения и течения на ЗДС (рис. 8). В соответствии с положениями [17] наличие ветра, волнения и течения приводит к смещению элементов циркуляции в сторону под действием волнения и течения. Влияние ветра, волнения и течения ведет к изменениям ЗДС согласно следующему принципу: упрощенное представление ЗДС визуальнo будет «смещаться» в зависимости от направления и скорости ветра, направления волнения и течения.

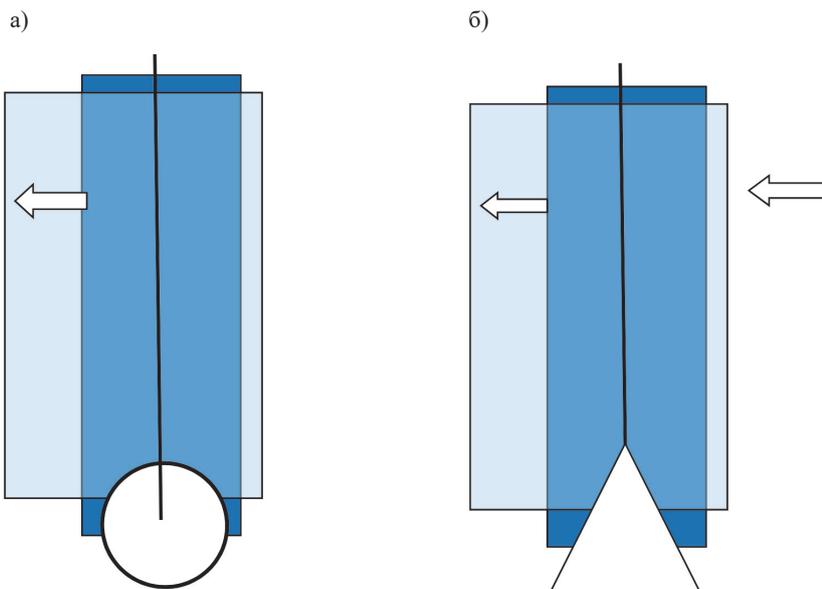


Рис. 8. Учет влияния ветра, волнения и течения в параметрах зоны движения судна (а) и ее смещение в сторону под действием ветра, волнения и течения (б)

Пример учета влияния гидродинамического взаимодействия на ЗДС (рис. 9). В соответствии с положениями [17] наличие гидродинамического взаимодействия приводит к смещению параметров циркуляции в сторону судна или другого объекта, находящегося в зоне гидродинамического взаимодействия. Влияние гидродинамического взаимодействия ведет к изменениям ЗДС согласно следующему принципу: *ЗДС визуально будет «смещаться» в сторону другого судна или объекта, находящегося в зоне гидродинамического взаимодействия*. Наличие близости или пересечения ЗДС может приводить к возникновению гидродинамического взаимодействия и возможному навалу на суда и/или другие объекты.

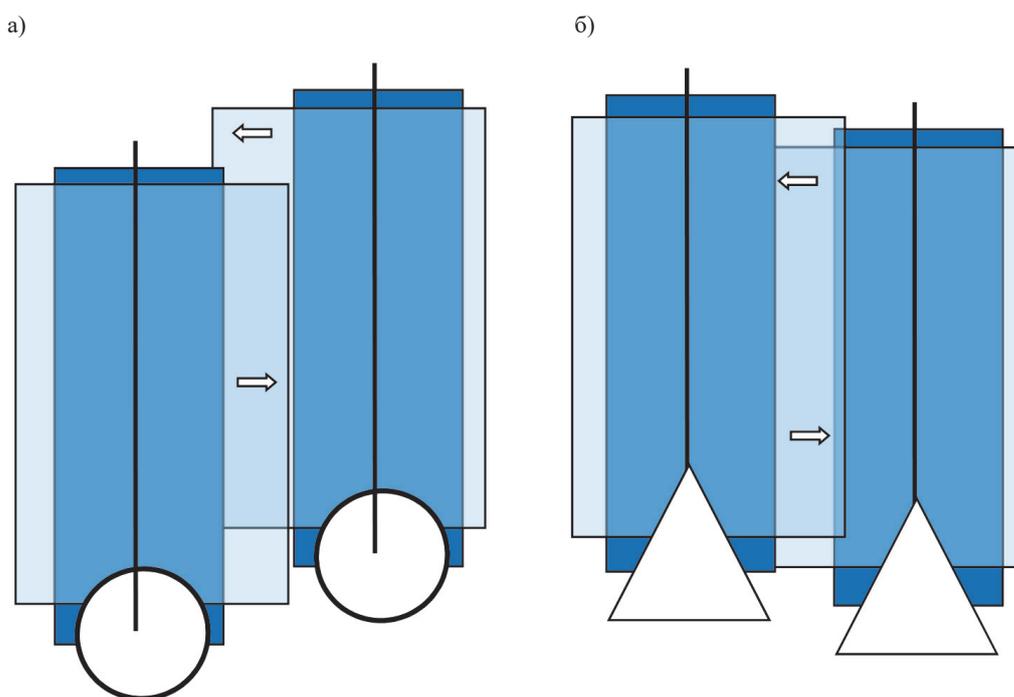


Рис. 9. Учет влияния гидродинамического взаимодействия в ЗДС (а), ее смещение в сторону и возможный навал на суда и/или другие объекты, находящиеся в зоне гидродинамического взаимодействия (б)

Возможность использования ЗДС других судов при решении задач оценки опасности столкновения в современных САПП и РЛС. В примере, приведенном на рис. 10, наше судно является обгоняющим по отношению к двум другим судам, так как его вектор скорости больше вектора скоростей других судов. При обгоне особое внимание следует уделить контролю за судном, находящимся слева от нашего судна, так как любые ошибки маневрирования могут привести к сближению с ЗДС других судов и возможному столкновению или навалу.

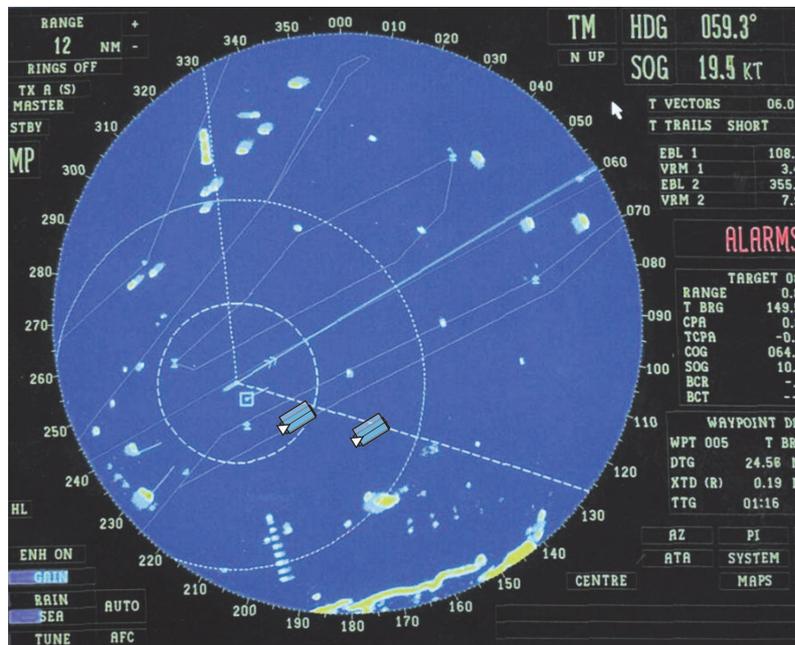


Рис. 10. Возможность использования зон движения других судов при решении задач оценки опасности столкновения на современных САПП и РЛС

Возможность использования ЗБМ своего других судов при решении задач оценки опасности столкновения в современных САПП и РЛС. В примере, приведенном на рис. 11, наше судно является обгоняющим по отношению к другому судну. На данный момент ситуация опасности столкновения отсутствует, так как при любых вариантах маневрирования ЗБМ судов не пересекаются.

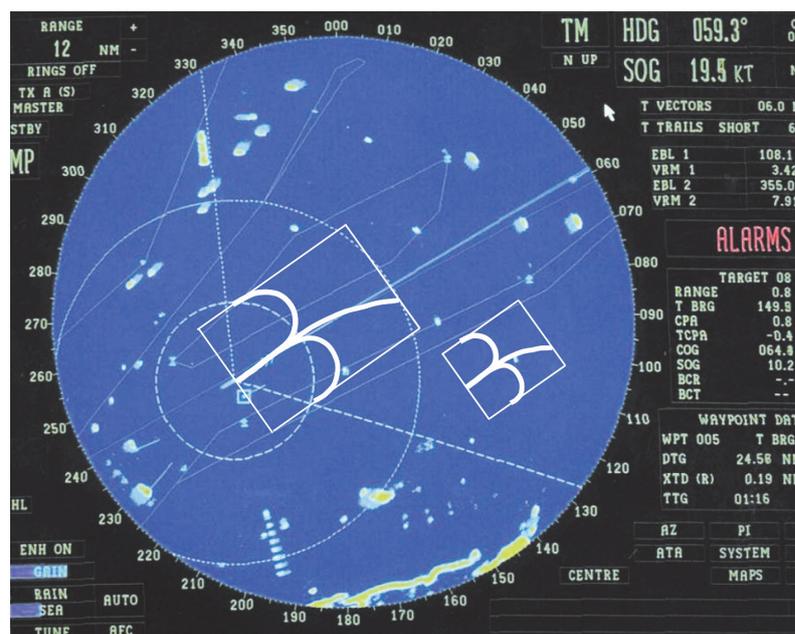


Рис. 11. Возможность использования зон безопасного маневрирования своего и других судов при решении задач оценки опасности столкновения на современных САПП и РЛС

В том случае, если САРП и РЛС входят в состав системы управления движением судов (СУДС), то использование ЗБМ позволяет визуально оценивать безопасные интервалы и дистанции между судами, движущимися в потоках в зоне действия СУДС, как это показано на рис. 12. В качестве примера на рис. 12, а суда во встречных потоках находятся на безопасной дистанции друг от друга, на рис. 12, б суда, следующие в одном потоке, находятся на безопасном расстоянии друг от друга. При использовании ЗБМ задача определения опасности столкновения, а также безопасного расхождения решается быстро, наглядно и без ошибок. Аналогичные задачи могут решаться также с использованием ЗДС.

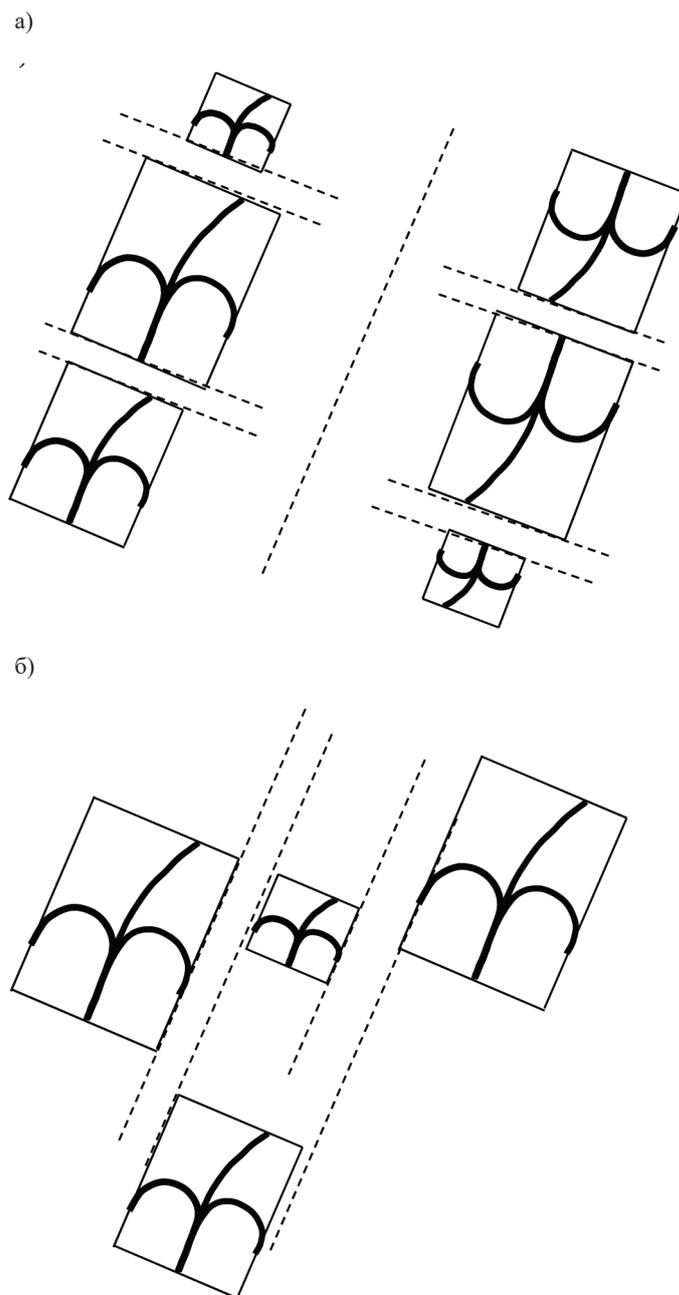


Рис. 12. Возможность использования зон экстремального маневрирования для быстрого решения задач оценки опасности столкновения (а) и определения безопасного интервала между судами при движении в потоке (б)

Использование дополнительной информации для САРП и РЛС при плавании в условиях шторма может быть представлено следующим образом. Плавание в штормовых условиях сопровождается

таким опасным явлением, как резонанс по различным видам качки, который может приводить к таким опасным явлениям, как потеря остойчивости и опрокидывание судна. Дополнительная информация по условиям резонанса может оказать помощь судоводителю во избежание этих опасных явлений путем изменения курса судна. В качестве примера, во избежание резонанса по вертикальной качке и последующей возможной потере остойчивости судна, может быть использована дополнительная информация (диаграмма опасностей) для РЛС и САРП, представленная на рис. 13, которая может применяться как на существующих, так и на перспективных навигационных приборах.

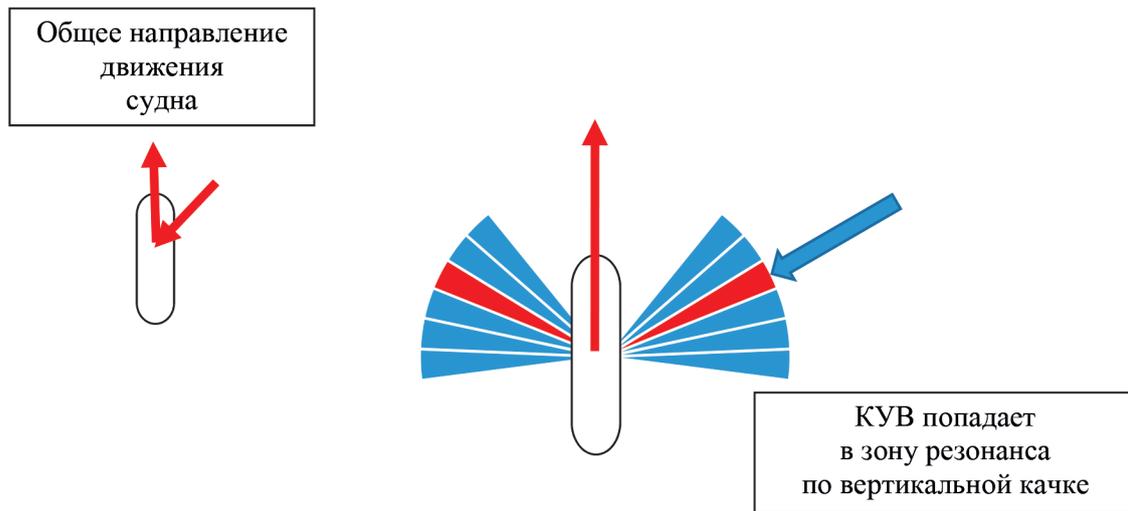


Рис. 13. Диаграмма опасностей резонансных зон по вертикальной качке судна при данной высоте волны
Условные обозначения:
красные стрелки — общее направление движения судна;
синяя стрелка — направление волнения

Расчет и применение дополнительной информации для САРП и РЛС в штормовых условиях может включать следующие этапы:

1-й этап — с использованием предварительной прокладки с учетом предстоящего прогноза погоды определяется опасность возникновения вертикальной качки судна в условиях штормовой погоды на предстоящем переходе судна;

2-й этап — с использованием прогноза погоды на переход судна определяется прогнозируемая высота волнения предстоящего шторма;

3-й этап — для данной высоты волны и предполагаемой скорости движения судна рассчитывается диаграмма опасностей для данного судна и предстоящего шторма в соответствии с материалами [18]–[19] или с использованием диаграммы Ю. В. Ремеза;

4-й этап — с учетом предстоящего курса судна и направления волнения определяется курсовой угол волны (КУВ) предстоящего шторма;

5-й этап — с использованием рассчитанной диаграммы опасностей определяется попадание данного КУВ в опасную зону по вертикальной качке (см. рис. 13);

6-й этап — в случае попадания курсового угла волнения в опасную зону с использованием диаграммы опасностей определяется необходимое изменение курса судна для выхода курсового угла волнения из опасной зоны (рис. 14).

С использованием результатов, полученных с помощью диаграммы опасностей на экране РЛС или САРП, судоводитель может выбрать необходимое изменение курса с учетом конкретной навигационной обстановки. Пример использования диаграммы опасностей резонансных зон по вертикальной качке на РЛС приведен на рис. 15.

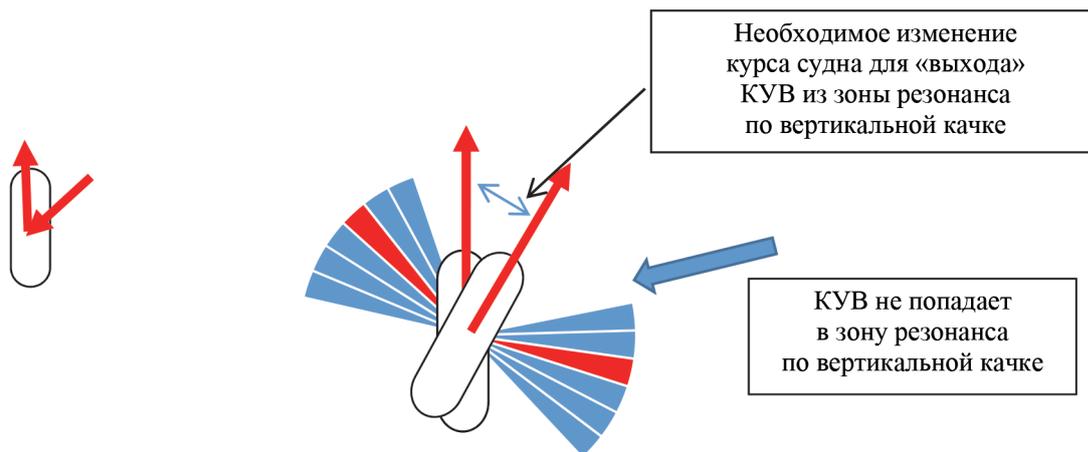


Рис. 14. Изменение курса с использованием диаграммы опасностей для выхода из резонансных зон по вертикальной качке судна

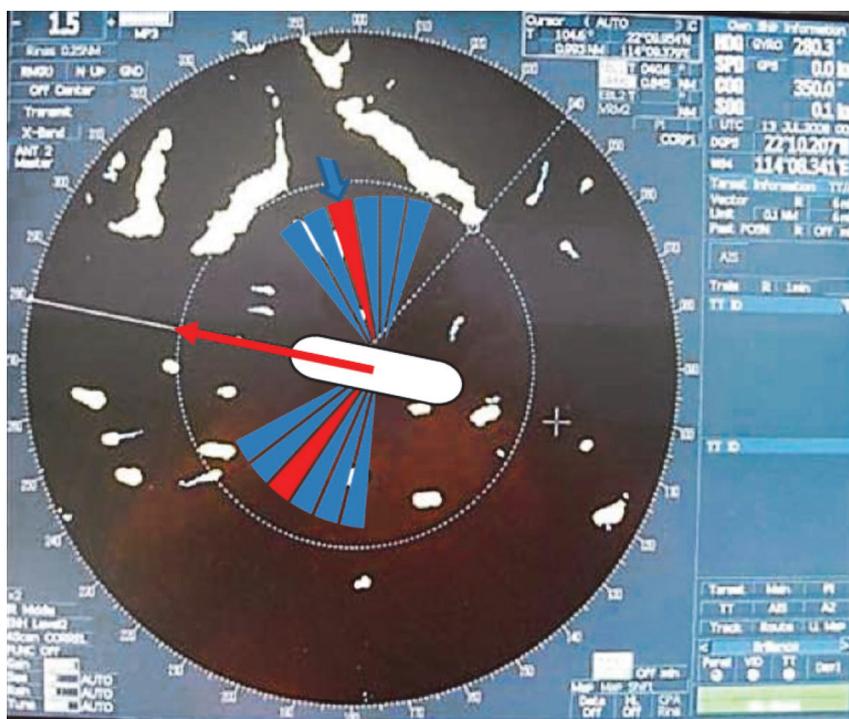


Рис. 15. Решение задачи изменения курса с использованием диаграммы опасностей резонансных зон по вертикальной качке судна на экране РЛС

Для решения задачи расхождения с опасностями в настоящее время могут учитываться данные рассчитанной диаграммы опасностей в виде прозрачной кальки, наложенной на центр экрана РЛС. Курсовой угол волнения может определяться визуально или по характерным отметкам на экране РЛС либо САРП. С включением данного метода в состав перспективной аппаратуры РЛС, САРП, ЭКНИС, а также других перспективных навигационных приборов данная задача может решаться в автоматическом режиме.

Результаты (Results)

В статье разработаны новые варианты использования дополнения к информации САРП и РЛС, связанные с использованием информации об их маневренных характеристиках, а именно:

- предложено использование упрощенных представлений ЗДС в существующих и перспективных САРП и РЛС;
- определена возможность упрощенного представления ЗЭМ на современных САРП и РЛС;
- показана возможность учета в зонах экстремального маневрирования ЗЭМ факторов, влияющих на движение судна: мелководья, ветра, волнения, течения, гидродинамического взаимодействия;
- показана возможность учета в зонах движения судна (ЗДС) за 1 мин осуществления маневра факторов, влияющих на движение судна: мелководья, ветра, волнения, течения, гидродинамического взаимодействия;
- показана возможность использования упрощенного представления ЗЭМ и ЗДС для решения задач на современных САРП и РЛС;
- показана возможность использования информации о ЗЭМ и ЗДС для решения задач оценки ситуации и быстрого и надежного принятия решений в зоне действия СУДС;
- показана возможность использования дополнительной информации для САРП и РЛС при плавании в условиях шторма во избежание различных опасностей штормового плавания.

В настоящее время существует возможность передачи параметров ЗЭМ на другие суда и операторам СУДС в составе информации АИС. Предлагаемый способ использования маневренных характеристик судна для оценки безопасности движения судов в узкостях и при штормовом плавании может быть использован в том числе для перспективных «беспилотных» судов, управляемых без участия человека на борту.

Обсуждение (Discussion)

Несмотря на развитие современных технологий и проникновение их практически во все сферы деятельности современного морского судна, оперативный контроль и принятие решений по предупреждению столкновений судов в узкостях в различных условиях плавания, включая плавание в шторм, с использованием РЛС и САРП, остаются в числе актуальных задач. Предлагаемые способы использования маневренных характеристик судна для оценки безопасности движения судов в узкостях и при штормовом плавании могут быть использованы как для существующих, так и для перспективных судов, в том числе «беспилотных», управляемых без участия человека на борту.

Заключение (Conclusion)

Предлагаемые в настоящей статье способы, основанные на использовании дополнительной информации о маневренных характеристиках и движении судна при решении задач обеспечения безопасности движения в узкостях, а также задач расхождения судов с применением РЛС и САРП в различных условиях плавания, включая шторм, могут быть реализованы в существующих навигационных приборах и применяться при создании новой навигационной техники, которая может быть использована на судах с экипажем и без экипажа на борту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев С. И. Полифакторный анализ процесса предупреждения столкновения судов / С. И. Кондратьев, А. Л. Боран-Кешишьян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 7–13.
2. Некрасов С. Н. Определение навигационных рисков при имитационном моделировании управления судном при проходе узкости / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 34–36.
3. Бурмака И. А. Управление группой судов в ситуации опасного сближения / И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 1–13.

4. Некрасов С. Н. Вычисление гарантированного курса расхождения при опасности сближения вплотную / С. Н. Некрасов, Д. В. Трененков, К. И. Ефимов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 1–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-1-15.

5. Некрасов С. Н. Навигационные риски буксировки судна в стесненных навигационных условиях / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 13–19.

6. Ершов А. А. Использование зон безопасного расхождения для движения судов на подходах к портам и внутренних водных путях / А. А. Ершов // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 6–13.

7. Паринов П. П. Новые способы обеспечения безопасного движения судов в Большом порту Санкт-Петербург и на подходах к порту: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19; защищена 21.12.2010; утв. 12.06.2011 / Петр Петрович Паринов. — СПб., 2010. — 120 с.

8. Ершов А. А. Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.19; защищена 19.11.2012; утв. 20.05.2013 / Андрей Александрович Ершов. — СПб., 2012. — 366 с.

9. Hasegawa K. On harbor maneuvering and neural control system for berthing with tug operation / K. Hasegawa, T. Fukutomi // Proc. 3rd International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft. — 1994. — Pp. 197–210.

10. Kijima K. A. Ship Manoeuvring Motion in the Proximity of Piers / K. Kijima, Y. Furukawa // Proceedings of the International Committee on Manoeuvring and Control of Marine Craft. — Southampton, UK, 1994. — Pp. 211–222.

11. Zubova A. A. Methodology for the Ship to Ship Hydrodynamic interaction Investigation Applying the CFD Methods / A. A. Zubova, D. V. Nikushchenko // Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2014). — Singapore, 2014. — Pp. 328–340.

12. Zubova A. A. Hydrodynamic interaction phenomena investigations during the ship overtaking maneuver for marine related simulators with the use of CFD methods / A. A. Zubova, D. V. Nikushchenko // Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability 2015 (MARSIM 2015). — Curran Associates, Inc., 2016. — Pp. 672–684.

13. Guliyev N. J. On the approximation by single hidden layer feedforward neural networks with fixed weights / N. J. Guliyev, V. E. Ismailov // Neural Networks. — 2018. — Vol. 98. — Pp. 296–304. DOI: 10.1016/j.neunet.2017.12.007.

14. Haykin S. S. Neural Networks and Learning Machines / S. S. Haykin. — Third Edition. — Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2009. — 906 p.

15. Дерябин В. В. Нейро-нечеткая модель счисления пути судна / В. В. Дерябин, А. Е. Сазонов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 1–16.

16. Дерябин В. В. Нейронная сеть как алгоритм прогноза скорости дрейфа судна // Вестник компьютерных и информационных технологий / В. В. Дерябин. — 2015. — № 6 (132). — С. 11–17. DOI: 10.14489/vkit.2015.06.pp.011-017.

17. Ершов А. А. Использование характеристик маневрирования для обеспечения безопасности движения судов в узкостях / А. А. Ершов, А. В. Михневич // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 897–910. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-897-910.

18. Ершов А. А. Учет опасностей штормового плавания при маневрировании судна / А. А. Ершов, А. И. Крицкий, С. Ю. Развозов // Приоритетные направления научных исследований. Анализ, управление, перспективы: сборник статей Международной научно-практической конференции. — Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2021. — С. 60–61.

19. Ершов А. А. Использование диаграмм опасностей при штормовом плавании / А. А. Ершов, А. И. Крицкий, С. Ю. Развозов // Приоритетные направления научных исследований. Анализ, управление, перспективы: сборник статей Международной научно-практической конференции. — Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2021. — С. 61–62.

REFERENCES

1. Kondrat'ev, S. I., and A. L. Boran-Keshish'yan. "Multifactorial analysis of ships collision prevention process." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(21) (2013): 7–13.
2. Nekrasov, S. N., K. I. Efimov, and D. V. Trenenkov. "Navigational risks calculation when modeling of sailing through the narrows." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 34–36.
3. Burmaka, I. A., and A. Yu. Bulgakov. "Management of the group of vessel in the situation of dangerous approach." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 1–13.
4. Nekrasov, S. N., D. V. Trenenkov, and K. I. Efimov. "Calculation of the guaranteed passing course at the danger of the close-quarters situation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 1–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-1-15.
5. Nekrasov, S. N., K. I. Efimov, and D. V. Trenenkov. "Navigation risks towing in cramped navigational conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 13–19.
6. Ershov, A. A. "Usage zones of safe passage in approaches to ports and inland waterways." *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2014. 6–13.
7. Parinov, P. P. *Novye sposoby obespecheniya bezopasnogo dvizheniya sudov v Bol'shom portu Sankt-Peterburg i na podkhodakh k portu*. PhD diss. SPb., 2010.
8. Ershov, A. A. *Razrabotka sistemy intellektualnoj podderzhki sudovoditelja dlja snizheniya opasnosti stolknovenij sudov*. Dr. diss. SPb., 2012.
9. Hasegawa, Kazuhiko, and T. Fukutomi. "On harbor maneuvering and neural control system for berthing with tug operation." *Proc. 3rd International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*. 1994: 197–210.
10. Kijima, K., and Y. Furukawa. "Ship Manoeuvring Motion in the Proximity of Piers." *Proceedings of the International Committee on Manoeuvring and Control of Marine Craft*. Southampton, UK, 1994: 211–222.
11. Zubova, A. A., and D. V. Nikushchenko. "Methodology for the Ship to Ship Hydrodynamic interaction Investigation Applying the CFD Methods." *Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2014)*. Singapore, 2014. 328–340.
12. Zubova, A. A., and D. V. Nikushchenko. "Hydrodynamic interaction phenomena investigations during the ship overtaking maneuver for marine related simulators with the use of CFD methods." *Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability 2015 (MARSIM 2015)*. Curran Associates, Inc., 2016. 672–684.
13. Guliyev, Namig J., and Vugar E. Ismailov. "On the approximation by single hidden layer feedforward neural networks with fixed weights." *Neural Networks* 98 (2018): 296–304. DOI: 10.1016/j.neunet.2017.12.007.
14. Haykin, S. S. *Neural Networks and Learning Machines*. Third Edition. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2009.
15. Deryabin, V. V., and A. E. Sazonov. "Neuro-fuzzy vessel's dead reckoning model." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 1–16.
16. Deryabin, V.V. "Neural Network Algorithm of Vessel's Drift Speed Prediction." *Herald of computer and information technologies* 6(132) (2015): 11–17. DOI: 10.14489/vkit.2015.06.pp.011–017.
17. Ershov, Andrey A., and Andrey V. Mikhnevich. "The use of characteristics of maneuvering to ensure the safety of vessel traffic in the narrows." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 897–910. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-897-910.
18. Ershov, A. A., A. I. Kritskii, and S. Yu. Razvozov. "Uchet opasnostei shtormovogo plavaniya pri manevrirovanii sudna." *Prioritetnye napravleniya nauchnykh issledovaniy. analiz, upravlenie, perspektivy: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ufa: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu «OMEGA SAINS», 2021. 60–61.
19. Ershov, A. A., A. I. Kritskii, and S. Yu. Razvozov. "Ispol'zovanie diagramm opasnostei pri shtormovom plavanii." *Prioritetnye napravleniya nauchnykh issledovaniy. analiz, upravlenie, perspektivy: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ufa: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu «OMEGA SAINS», 2021. 61–62.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ершов Андрей Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru

Михневич Андрей Викторович — аспирант
Научный руководитель:
Ершов Андрей Александрович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_mus@gumrf.ru

Крицкий Андрей Игоревич — аспирант
Научный руководитель:
Ершов Андрей Александрович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_mus@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov, Andrey A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru

Mikhnevich, Andrey V. — Postgraduate
Supervisor:
Ershov, Andrey A.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: kaf_mus@gumrf.ru

Kritsky, Andrey I. — Postgraduate
Supervisor:
Ershov, Andrey A.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: kaf_mus@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 23 марта 2021 г.

Received: March 23, 2021.

OVERVIEW OF EXISTING METHODS OF AUTONOMOUS VESSELS COLLISION AVOIDANCE

O. Y. Tripolets

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Collision avoidance is vital for safety of navigation at sea. At first scientists aimed at developing navigational assistance systems for supporting human operators in collision prevention and enhancing situational awareness. Nowadays the development of unmanned systems has gained appreciable amount of attention. The main purpose of modern researches is to solve collision avoidance problems. An overview of collision avoidance methods proposed by Russian and foreign researchers is offered in the paper. The authors offer different techniques for solving the collision avoidance problem, namely, Artificial Potential Fields, Ant Colony Optimisation, Velocity Obstacles and Velocity Resolution Method, Interval Programming, Fuzzy Logic, Neural Networks with different optimisation methods, Optimal Reciprocal Collision Avoidance, combined algorithms. However, some of the articles do not take into account using ship motion models, complying with the International Regulations for Preventing Collisions at Sea and collision avoidance with static objects. Some approaches consider only two-vessels collision avoidance, not all of them are capable of using engine maneuvers. Currents, tides, winds and seas are not considered in any method described in this paper. Many researches have simulation results carried out in computer-based systems, but only a few have results of natural trials. The reviewed researches are divided into three groups: approaches considering avoidance of static and dynamic objects, approaches considering collision avoidance in two-ship encounter situations and approaches considering multi-ship encounter situations. It is noted that the purpose of further researches will be developing the existing approaches, elimination of their deficiencies and supplementing them in order to solve the whole complex of existing problems.

Keywords: autonomous navigation, unmanned vessel, collision avoidance, collision prevention, neural networks, USV.

For citation:

Tripolets, Oleg Y. "Overview of existing methods of autonomous vessels collision avoidance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 480–495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495.

УДК 656.61.052

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСХОЖДЕНИЯ БЕЗЭКИПАЖНЫХ СУДОВ

О. Ю. Триполец

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе выполнен обзор различных методов расхождения безэкипажных судов, реализованных российскими и зарубежными специалистами. Авторы рассмотренных исследований для расхождения безэкипажных судов предлагают использование различных методов, среди которых методы искусственных потенциальных полей, методы оптимизации муравьиной колонии, подход скоростных препятствий, интервальное программирование, нечеткая логика, алгоритмы оптимального взаимного предотвращения столкновений, нейронные сети с различными методами оптимизации, комбинированные алгоритмы. Учет гидродинамических характеристик судна, соблюдение «Международных правил предупреждения столкновения судов в море» (МППСС-72) и обход статических препятствий рассматриваются не во всех исследованиях. В некоторых работах рассмотрены лишь ситуации расхождения двух судов, и кроме того, не все подходы позволяют использовать маневры скоростью. Обращается внимание, что во всех рассмотренных публикациях учет ветра, течений и морского волнения отсутствует. Многие из представленных исследований имеют результаты симуляций в компьютерной среде, но лишь в единичных случаях содержатся

данные о проведении натурных испытаний. Рассмотренные исследования разделены на три группы: подходы, рассматривающие расхождение со статическими и динамическими препятствиями, подходы, рассматривающие автоматизированное расхождение двух судов, и подходы, рассматривающие расхождение с группой судов. Составлена сводная таблица для наглядного сравнения приведенных методов. Отмечается, что целью дальнейших разработок в области беспилотных технологий должно явиться совершенствование уже существующих алгоритмов, устранение имеющихся недостатков и дополнение существующих алгоритмов для решения всего комплекса задач.

Ключевые слова: безэкипажное судовождение, автономные суда, предотвращение столкновений, расхождение морских судов, нейронные сети, безэкипажные суда, безэкипажные надводные суда

Для цитирования:

Триполец О. Ю. Обзор существующих методов расхождения безэкипажных судов / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 480–495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495.

Введение (Introduction)

Проблема предотвращения столкновений судов на водном транспорте является одной из классических. Анализ морских аварий показал, что большинство из них происходят по вине человека [1]. Многие навигационные системы были разработаны для поддержки вахтенных помощников: электронно-картографические навигационно-информационные системы (ЭКНИС), автоматические идентификационные системы (АИС), средства автоматической радиолокационной прокладки (САРП) и т. д. Однако для полного устранения человеческого фактора исследователи обратились к разработке автономных систем, которые могут найти безопасные решения в задачах расхождения судов без участия человека, таким образом полностью заменив его.

Разработки беспилотных систем в судовождении получили широкий интерес с ускорением развития технологий, появлением роботов и искусственного интеллекта. В 2017 г. Международной морской организацией (ИМО) было принято предложение о включении в повестку дня проблемы беспилотных судов. Стратегический план ИМО на 2018–2023 гг. имеет ключевое направление в вопросах внедрения новых и прогрессивных технологий в правовую базу [2]. В 2019 г. были приняты временные руководства для проведения испытаний автономных судов (MSC.1-Circ.1604).

На современном водном транспорте сложность решения проблемы разработки безэкипажных технологий заключается в нахождении наиболее безопасного, безотказного и универсального подхода, который позволит судам совершать безопасные переходы по заданным маршрутам, маневрируя для предотвращения столкновений согласно «Международным правилам предупреждения столкновения судов в море (МППСС-72)» (далее — Правила МППСС-72). Существующие методы предотвращения столкновений разделяются на системы помощи судоводителю и системы, в которых *человеческий фактор* полностью отсутствует. Для того, чтобы расхождение безэкипажных судов (БЭС) на водном транспорте стало возможным, необходимо создание надежного алгоритма, способного выполнять следующие задачи:

- обнаружение и классификация объектов, встречающихся на пути судна;
- расхождение с подвижными и статическими объектами на безопасной дистанции;
- обход зон, запрещенных для навигации, а также отмелей, подводных скал и т. д.;
- учет Правил МППСС-72 при маневрировании;
- маневрирование как курсом, так и скоростью;
- учет гидродинамических характеристик судна, ветра, волнения, течений;
- безопасное расхождение как с одним, так и с несколькими судами с учетом экономической эффективности выполняемых маневров;
- наличие результатов симуляций в компьютерной среде и натурных испытаний.

Рассмотренные в данной статье исследования предлагают различные подходы к решению поставленных задач, однако до сих пор возникающие проблемы до конца не решены. Среди изученных исследований были выделены те, которые относятся к описанию методов расхождения со статическими и динамическими объектами, проанализированы подходы, рассматривающие

расхождение безэкипажного судна с одним судном, а также исследования, в которых описаны ситуации расхождения с группой судов.

Целью данного исследования является обзор существующих методов расхождения безэкипажных судов.

Задачи данной работы:

1. Рассмотреть подходы, описывающие расхождение безэкипажных судов со статическими и динамическими препятствиями, с одним судном и группой судов.
2. Выявить достоинства и недостатки приведенных подходов.
3. Составить сводную таблицу для сравнения рассмотренных исследований.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Подходы, рассматривающие расхождение безэкипажных судов со статическими и динамическими препятствиями. Разработанная в подходе [3] модель представляет основанную на искусственных потенциальных полях (APFs — Artificial Potential Fields) систему предотвращения столкновений в реальном времени для морских судов, способную реагировать на статические и динамические препятствия поблизости. Модуль оценки риска, также представленный в исследовании, основан на стандартном методе кратчайшего расстояния сближения (CPA). Модуль принятия решений выбирает соответствующие правила, основанные на относительных курсах и позициях судов. В части обнаружения встроенные визуальная и основанная на лазере системы были разработаны для обеспечения сенсорной функциональности для множественных препятствий. Для внедрения в алгоритм Правил МППСС-72 был разработан специальный модуль принятия решений, который анализирует существование опасности столкновения между БЭС и препятствием. После анализа определяется подходящее правило, и затем система выясняет, какие из областей являются запрещенными для движения, затем создает виртуальные препятствия, которые генерируют отталкивающие положительно заряженные поля. Результаты симуляций показывают, что БЭС, ведомое алгоритмом, представленным в данном случае, способно успешно обходить движущиеся и статические препятствия, однако в некоторых симуляциях данный алгоритм попадал в локальный минимум и поэтому требует доработки. Кроме того, в данном алгоритме также не предусмотрен учет влияния погодных условий, а также маневренных характеристик различных судов; существует проблема сглаживания пути для предотвращения резких поворотов, и в настоящее время настройка этих параметров представляется затруднительной.

В статье [4] рассмотрен подход к проблеме предотвращения столкновений безэкипажных судов, основанный на оптимизации муравьиной колонии (ACO — Ant Colony Optimisation). ACO — алгоритм, выполненный на основе коллективного поведения групп насекомых (впервые предложен в 1999 г. в [5]). Муравьи используют особый механизм для отыскания кратчайшего пути между источником пищи и гнездом, при этом во время передвижения они оставляют на своем пути особые химические вещества — феромонные следы. В представленном исследовании группы агентов (БЭС) ACO, называемые *искусственными муравьями* (Artificial Ants), воплощают поведение прокладывания пути и следования по нему с помощью размещения виртуального феромонного следа (Pheromone Trail). В данном исследовании среда, в которой маневрируют суда, представляет собой множество E , включающее подмножества E_{free} (свободное пространство) и E_{obs} (препятствия: подвижные и неподвижные объекты, береговые линии, мели, фарватеры и т. д.).

После сбора данных САРП и АИС и расчета относительных скоростей, курсов и пеленгов выполняется проверка опасности целей и построение графика возможного движения муравьев (БЭС). В каждой путевой точке БЭС выбирает следующую на основе значения феромонного следа на близлежащих линиях. После того как муравьи завершили прохождение своего пути в данной итерации, происходит обновление феромонных следов, при этом неверные пути «забываются» посредством механизма «испарения» следов (Trail Evaporation), а наиболее благоприятные (кратчайшие) обновляются добавлением значений феромонов. Данный алгоритм выполнен в соответствии с Правилами МППСС-72 с учетом гидродинамических характеристик судна. В исследовании

приводятся результаты симуляции, выполненные в программной среде Matlab, которые показывают, что суда, управляемые при помощи данного алгоритма, расходятся на безопасном расстоянии в соответствии с правилами МППСС-72. При этом время расчетов не превышало 1 мин (в среднем составило около 30 с). Автор работы [4] обращает особое внимание на то, что маневр изменения скорости не принимался во внимание, а также не были учтены изменения скорости и курсов других судов. Кроме того, по мнению автора, время на выполнение расчетов необходимо уменьшить.

В исследовании [6] предлагается усовершенствованный подход скоростных препятствий (VO — Velocity Obstacles), впервые предложенный в [7] в 1998 г. Скоростные препятствия — это набор скоростей для БЭС, которые приведут к столкновению с другим БЭС в определенный момент времени при условии, что другое БЭС не маневрирует. Если БЭС выберет скорость внутри скоростного препятствия (изображается в виде конуса), то два БЭС столкнутся, однако если БЭС выберет скорость вне скоростного препятствия, то столкновения не произойдет. Этот подход имеет преимущества в том, что он позволяет просчитывать опасность столкновения на несколько шагов вперед, а также реагировать на неоднородный характер движения приближающихся судов: при изменении курса и/или скорости других судов подход скоростных препятствий отреагирует на эти изменения и перепланирует маршрут. В данном исследовании *подход скоростных препятствий* расширен за счет использования Правил МППСС-72 посредством внедрения искусственных препятствий на пути БЭС в ситуации, когда существует риск столкновения с другим судном.

Предлагаемый в данном исследовании алгоритм вначале выполняет проверку CPA/TCRA на предмет опасности столкновения и если она существует, то производится выбор правила МППСС-72, которому соответствует данная ситуация сближения, после чего в фигуре скоростных препятствий вначале создаются искусственные зоны, в которые БЭС не может заходить в соответствии с Правилами МППСС-72, и только затем БЭС приступает к выполнению маневра. Данный алгоритм был успешно испытан как в компьютерной среде, так и на воде с использованием БЭС Powervent. Отмечается, что из-за того, что постоянный расчет риска столкновения выполняется заранее, значительно возрастает вычислительная нагрузка. В условиях реальной окружающей среды при обнаружении подвижных и неподвижных препятствий могут возникать ошибки, вызванные различными помехами, и просчет траекторий движения других судов может содержать в себе погрешности (точность расчетов будет во многом зависеть от точности информации, поступающей с сенсоров).

В статье [8] предложен подход к решению проблемы расхождения безэкипажных судов с использованием нейронных сетей и глубокого обучения с подкреплением и созданием соответствующего алгоритма принятия решений для расхождения с препятствиями (DRLOAD — Deep Reinforcement Learning Obstacle Avoidance Decision-Making). Математической основой такого обучения является *марковский процесс принятия решений*. В ячейке памяти текущее состояние БЭС используется как вход в нейронную сеть. Таблица значений выполняемых действий Q — выход. Освоение поведенческой стратегии достигается тренировкой соответствующих максимальных значений Q . Согласно любому состоянию s , использование алгоритма, содержащего любое состояние s , позволит безэкипажному судну реализовать соответствующее поведение a . Модель среды, в которой проходил тестирование данный подход, представляет собой сеточную карту с двумя измерениями (2D Grid Map). Для каждой точки координат определены значения состояний от 0 до 1, где 0 — препятствие, 1 — пространство возможных движений. Наиболее важной частью алгоритма является функция вознаграждения за предотвращение столкновения (Avoidance Reward Function), которая может косвенно описать цель задания для БЭС. Представленный алгоритм DRLOAD, протестированный в программной среде MATLAB, показал удовлетворительные результаты расхождения как со статическими, так и с динамическими препятствиями, хорошую способность к обучению, и наличие возможности маневрирования скоростью.

Исследование [9] посвящено объединенному алгоритму удержания судна на пути и предотвращения столкновений. Для расхождения со статическими и динамическими препятствиями авторы

предложили использовать *метод разложения скоростей* (Velocity Resolution Method). Основанный на методе скоростных препятствий (Velocity Obstacle), он позволяет обнаруживать опасность столкновения в реальном времени и вычислять обходной маневр, а после расхождения — возвращаться на заданный путь. Данные с сенсоров судна используются алгоритмом расхождения, и маневр расхождения рассчитывается согласно запланированному пути следования; используется гидродинамическая модель движения судна, имеющая три степени свободы; существует возможность маневрирования скоростью. Предложенный подход, который был апробирован на БЭС Lanxin, показал работоспособность системы в плане расхождения со статическими и динамическими препятствиями. При этом следует отметить, что в данном подходе не учитываются Правила МППСС-72.

Подходы, рассматривающие автоматизированное расхождение двух судов. Авторы публикации [10] предлагают использовать нейронные сети для решения задачи предотвращения столкновений. Для формирования обучающей выборки использовалась информация с маневренного планшета: выборка состоит из обучающих пар, входами которых являются пеленг, курсы и скорости судов, выходами — изменения курса судна-оператора. Методика формирования каждой обучающей пары заключается в приведенной последовательности действий:

- формирование путем перебора с некоторым шагом для диапазонов входов перечня различных ситуаций, возникающих при расхождении судов;
- раскладка каждой отдельной ситуации на маневренном планшете;
- определение величины изменения курса судна-оператора с учетом Правил МППСС-72.

Для обучения нейронной сети использовался многослойный персептрон, а в качестве оптимизации применялся метод градиентного спуска, модифицированный ParTan, а также метод сопряженных градиентов, BFGS. Анализ результатов обучения показал, что для расхождения морских судов в зоне чрезмерного сближения наилучшей является нейронная сеть типа четырехслойный персептрон, имеющая 40–60 нейронов в первом скрытом слое и 100 нейронов во втором скрытом слое, использующая в качестве оптимизатора метод сопряженных градиентов. Данный подход, однако, не затрагивает ситуаций с участием более двух судов. Курс и скорость судна-цели в данном подходе считаются постоянными, отсутствуют данные о проведении симуляций или апробаций данного подхода.

Развитие предложенного ранее подхода нашло отражение в статье [11]. При этом нейронечеткая система расхождения в зоне чрезмерного сближения представляет собой адаптивную систему нечеткого логического вывода (алгоритм Мамдани), состоящую из пяти уровней. Данная система представляет собой многослойную искусственную нейронную сеть, характеризующуюся прямым распространением связей; параметрами сети являются параметры нечеткого логического вывода (НЛВ), а алгоритмом принятия решения нейронной сети — алгоритм НЛВ. Входной уровень адаптивной системы НЛВ является уровнем функции принадлежности. Во входном уровне адаптивной системы НЛВ устанавливаются нечеткие множества, соответствующие термам входных и выходных нечетких лингвистических переменных (НЛП).

Описываемая система расхождения включает четыре входные НЛП: пеленг на судно-цель, курс судна-оператора, курс судна-цели, скорость судна-цели, а также единственную выходную НЛП, которой является заранее рассчитанное на маневренном планшете значение изменения курса судна-оператора. Раскладка на маневренном планшете выполнялась с учетом Правил МППСС-72 и комментариев к ним, а также рекомендаций так называемой «хорошей морской практики». Авторы статьи [11], используя программное обеспечение Matlab, произвели имитационное моделирование нейронечетких систем расхождения и выявили, что для расхождения морских судов целесообразно воспользоваться нейронечеткой системой расхождения с использованием генерирования по методу решетки без кластеризации. Отмечается, что гибридный метод оптимизации дает результаты, значительно лучшие, чем алгоритм обратного распространения ошибки. Расчеты, выполненные на планшете, охватывают только ситуацию сближения двух судов, при этом отсутствует учет гидродинамических характеристик судна и внешних условий.

В статье [12] предлагается подход интервального программирования (IvP — Interval Programming) и многокритериальной оптимизации (Multi-Objective Optimisation) с учетом Правил МППСС-72. Каждое правило данного нормативного международного документа соответствует определенному поведению БЭС, которое создает объективную функцию управления принятия решений. Объективные функции учитывают не только ситуации, описанные в Правилах МППСС-72 (в пиковых зонах функций), но также захватывают их гибкость (в непиковых зонах). Каждая итерация в круге (модуле) управления судном включает создание и решение проблемы мультикритериальной оптимизации, где каждый модуль содержит одну функцию. Управление БЭС является результатом действия совокупности независимых специальных модулей, работающих совместно для выбора оптимального решения. Таким образом, предлагается решить проблему с выполнением нескольких правил МППСС-72 одновременно. Так, авторы статьи разработали несколько типов поведения, опирающихся на Правила МППСС-72: поведение, основанное на ситуации сближения на противоположных курсах (Head-on Behavior), типы поведения, основанные на ситуации пересечения курсов для *судна, уступающего дорогу* и *судна, которому уступают дорогу* (Crossing Behaviors). Например, Head-on behavior создает функцию, базирующуюся на CPA для предполагаемых маневров, отдавая предпочтение к изменению курса вправо, чтобы другое судно прошло по левому борту.

Аналогичные функции были созданы для ситуации пересечения курсов для судов с преимуществами и без них. Тестирование данных алгоритмов было успешно проведено как на компьютере, так и с использованием двух автономных судов-каяков. Однако в данном случае описываются только два правила МППСС-72. Предлагаемый подход рассчитан только на ситуацию сближения двух судов. При этом имеется возможность маневрирования скоростью.

В работе [13] предлагается подход к расхождению безэкипажных судов, основанный на нечеткой логике. Устройство процесса принятия решения предполагает выполнение следующих шести шагов:

1. Идентификация ввода нечетких функций принадлежности (FMFs — Fuzzy Membership Functions).

2. Идентификация выходов FMFs.

3. Создание FMF для каждого входа и выхода.

4. Создание нечетких правил «если-то» для управления системой.

5. Назначение приоритета нечетких правил для выполнения действия.

6. Комбинация правил и дефаззификация выходов.

Для этого исследования были определены следующие лингвистические термы: дистанция до столкновения, область столкновения, относительный угол столкновения и относительная скорость для входов, изменение курса и скорости судна-оператора для выходов. Использовалась модель Мамдани, основанная на правилах нечеткой логики. Дефаззификация была проведена с использованием метода центра тяжести (Center Of Gravity Method). В этом методе вычисляется центроид результирующей FMF и используется ее абсцисса как окончательный результат вывода.

Первый шаг в нечеткой системе вывода (Fuzzy Inference System) — это сбор данных о судне-цели. На следующем шаге вычисляются относительные траектория, скорость и курс судна-цели. Затем происходит фаззификация данных согласно информации о дистанции до столкновения, области столкновения, относительном угле столкновения и относительной скорости, затем вступают в силу нечеткие правила «если-то», разработанные в соответствии с Правилами МППСС-72. Выходами системы, основанной на этих правилах, являются следующие системы: *предупреждение о риске столкновения* (Collision Risk Warning) и *нечеткие решения* (Fuzzy Decisions). Эти решения впоследствии проходят дефаззификацию, и окончательным выходным значением является изменение курса или скорости судна-оператора. Данный подход прошел симуляцию в программной среде Matlab для ситуаций расхождения двух судов, где показал результаты успешного расхождения в соответствии с Правилами МППСС-72.

Подходы, рассматривающие автоматизированное расхождение с группой судов. В статье [14] рассматривается проблема безопасного расхождения групп безэкипажных судов в районах интенсивного судоходства. Для решения задачи безопасного расхождения в данном исследовании предлагается в множестве судов в заданной акватории выделить подмножества опасно идущих судов, привилегированных судов, судов, обязанных маневрировать и судов, представляющих ограничения для выбора решения. Для каждого судна выполняют оценку навигационной ситуации, в которую входит информация о существующей навигационной обстановке и ее прогнозы, о районе плавания и заданном маршруте данного судна, а также учитываются риски выхода на мелководье, навигационные опасности, зоны, запретные для плавания, и в соответствии с этими данными получается оценка риска для каждого судна, для которой используются шкалы RED, YELLOW, GREEN (*опасно, внимание и безопасно* соответственно). Для каждого из судов группы строится комплексная оценка безопасности, значение которой является критерием для включения судна в множество G (*опасно сближающиеся суда*). При этом в множестве G суда делятся на класс A (привилегированные по отношению к другим в соответствии с Правилами МППСС-72) и класс B (все остальные суда, обязанные предпринять маневр).

После распределения судов по классам происходит поиск решения, результатом которого является набор траекторий движения для судов, обязанных маневрировать. В случае отсутствия решения предлагается процедура смягчения ограничений за счет перемещения судов из одного множества в другое и повторного поиска решений. Представленный алгоритм позволяет группе судов безопасно маневрировать друг относительно друга, однако эта система требует устойчивой связи между судами и совместимого программного обеспечения, она не подходит для использования в смешанной среде (БЭС и экипажных судов). Для обеспечения возможности коллективного маневрирования между судами должен быть установлен обмен информацией. Подробно эта проблема рассматривается в [15].

В подходе, представленном в публикации [16], автоматическое управление судном предлагается разделить на два режима: «нормальный» и «расхождение» (Collision Avoidance). Используются нейронные сети и глубокое обучение с подкреплением, формализованное согласно марковскому процессу принятия решений. Был использован алгоритм глубокого Q -обучения, предложенный в [17], человеческий опыт внедрен в систему посредством введения судового буфера, судового домена, спрогнозированной зоны опасности, включая статические препятствия, а также контура и векторов движения судна для достижения цели. При попадании препятствия в зону судового буфера управление судном переключается в режим «расхождение». Для расхождения с судами на безопасной дистанции вокруг опасных целей строятся ограничительные многоугольники. Для внедрения в алгоритм Правил МППСС-72 были добавлены ограничительные линии, которые заставляют суда совершать маневры расхождения. Отмечается также, что в экстренных случаях алгоритм отступит от Правил МППСС-72 если в буфере судна будет обнаружено препятствие. Для проведения симуляции использовалась модель *Номото* [18], в которой принимаются во внимание характеристики руля для описания движений судов. Симуляция в испытательном бассейне для трех моделей судов с различными маневренными характеристиками показала хорошие результаты обучения нейронной сети и успешного расхождения всех трех моделей. Следует отметить, что на всех трех судах был установлен алгоритм расхождения, представленный в подходе.

Авторы статьи [19] создают систему поддержки принятия решений для судоводителя, предлагая использовать количественный анализ опасности столкновения для нескольких судов в реальном времени и модель принятия решений для предотвращения столкновений. Для расчета индекса риска столкновения используется *метод нечеткой логики*. В данном подходе требования Правил МППСС-72 и *хорошая морская практика* учитываются таким образом, что действия по предотвращению столкновений рассчитываются максимально эффективно. Рассматривается изменение как курса, так и скорости. Симуляции, проведенные в компьютерной среде, показывают, что данный подход позволяет судоводителю принимать верные решения для предотвращения столкновений в условиях сближения нескольких судов.

В статье [20] использована *доказательная теория рассуждений* (Evidential Reasoning Theory), описанная в работе [21] для расчета опасности столкновения, затем рассчитан список возможных действий для БЭС, сближающегося с несколькими судами; используется алгоритм оптимального взаимного предотвращения столкновений (ORCA — Optimal Reciprocal Collision Avoidance), являющийся расширенным алгоритмом скоростных препятствий для выбора действия, соответствующего Правилам МППСС-72. Кроме того, в данном случае учитываются возможные действия встречающихся судов. Подход был протестирован в компьютерной среде с участием четырех судов, включая судно-оператор, на котором был апробирован рассматриваемый алгоритм. Данные симуляций, представленные в статье, показывают, что подход работоспособен и эффективен и БЭС маневрирует для предотвращения столкновений в соответствии с Правилами МППСС-72. В будущем планируется ввести учет ветра, течений и влияния волн.

В подходе, представленном в [22], система предотвращения столкновений представляет собой эволюционные нейронные сети, построенные с помощью кодирования на ассемблере с эволюционирующими операциями (Assembler Encoding with Evolvable Operations) и кооперативных коэволюционных нейронных сетей (Cooperative Co-Evolutionary Neural Networks). Береговая линия, опасные глубины, суда и другие объекты в этой работе названы *угрозами* (threats). Количество секторов, в которых наблюдаются угрозы, выбрано равным семи. Входными данными для нейросети являются следующие: 1 — угол, на который судно должно повернуть, двигаясь к следующей поворотной точке (два значения: отрицательное представляет собой изменение курса влево, положительное — вправо); 2–8 — наличие угроз в секторах наблюдения с первого по седьмой (в зависимости от уровня риска столкновения значения выбираются из диапазона $[-1; 1]$). Для выходных параметров разработаны два решения: первое — выходные параметры — изменение курса (от -180° до 180°) и скорости (5–20 уз), второе — выходные параметры — семь маневров изменения курса (разработано для облегчения архитектуры нейросети). Для тестирования подхода было разработано 170 тренировочных сценариев с участием нескольких судов, в создании которых принимали участие судоводитель (40 сценариев), дилетант (70) и программа (60). После обучения нейросети успешно справлялись с задачами расхождения с множественными судами. Автором публикации [22] отмечается, что другие суда, представленные в симуляциях, не маневрировали, МППСС в подходе использованы не были и судно-оператор могло предпринимать любые маневры для предотвращения столкновений.

В источнике [23] предлагается использовать модернизированный алгоритм, созданный на основе модели поиска «усами жука» (BAS — Beetle Antennae Search), впервые предложенный в [24]. В основе решения — модель поведения жуков-усачей, использующих свои усы для поиска областей с максимальной концентрацией феромона и передвижения в соответствующую сторону. Для судна используется *модель гидродинамического поведения* с тремя степенями свободы для упрощения оптимизации. Дано описание предсказательной системы предотвращения столкновений, учитывающей ограничения Правил МППСС-72 (правила 13–15), и фактор экономии топлива. Подход был испытан компьютерными симуляциями в различных ситуациях, в том числе с участием трех судов, и показал удовлетворительную способность к предотвращению столкновений. Также по результатам симуляций отмечается, что эта модификация значительно эффективнее оригинального алгоритма BAS.

В работе [25] предлагается система поддержки принятия решений для предотвращения столкновений с участием нескольких судов на основе Правил МППСС-72. На каждом судне, участвующем в симуляции, функционирует данный алгоритм, и каждое судно действует «от первого лица». Перед принятием решения маневрирования алгоритм рассчитывает, насколько эффективным будет маневр путем расчета СПА на запланированной траектории. Такая проверка может проводиться для каждой цели по очереди, но не для всех сразу. *Модель Номото* [26] используется для описания маневренных характеристик судна. Имеется возможность маневра скоростью. Описываются модели принятия решения для судов, уступающих дорогу и сохраняющих курс и скорость в ситуациях, описанных правилами 13–15. В симуляциях, проведенных в среде MATLAB, рассматриваются

ситуации, когда другие суда соблюдают Правила МППСС-72 и нарушают их, но при этом во всех случаях судно-оператор успешно расходится с опасно приближающимися судами.

Авторы исследования [27] представили обновленную версию эволюционных наборов безопасных траекторий судов (Evolutionary Sets of Safe Ship Trajectories) — метод, который содержит эволюционные алгоритмы и некоторые предположения из теории игры для решения ситуаций сближения судов. Для данных позиций и параметров судов метод находит оптимальный набор безопасных траекторий для всех судов, вовлеченных в ситуацию, а не только для одного судна. Метод «работает» в реальном времени, и решение, соответствующее Правилам МППСС-72, выдается в течение одной минуты. Данный подход был протестирован в компьютерной среде и, согласно выполненному сопоставлению с другими эволюционными алгоритмами, также описанными в данной статье, показывает более высокие результаты. Описывается система расхождения со статическими объектами. Авторы отмечают, что перед тем как тестировать данный метод в реальной среде, необходимо ввести более усовершенствованную гидродинамическую модель судна; необходимо расширить соответствие алгоритма Правилам МППСС-72 (ввести поддержку схем разделения движения).

В статье [28] представлен алгоритм автоматического расхождения нескольких судов с использованием глубокого обучения. Зона препятствий по цели (OZT — Obstacle Zone by Target) используется для расчета зоны, где в будущем может произойти столкновение. Данные по OZT, полученные путем сканирования пространства сеточным сенсором (Grid Sensor), конвертируются в форму, которая может быть использована как входные данные в нейронную сеть с использованием алгоритма проксимальной оптимизации (Proximal Policy Optimization Algorithm — PPO). Пространство для обучения состоит из судов-целей, путевой точки и целевой зоны, которая является открытым морем без статичных препятствий. Для описания моделей движения судов использовались уравнения Номото. Разработаны два типа управления судном: *команды на руль* (выходные данные — угол поворота пера руля) и *команды на автопилот* (выходные данные — изменение курса). Нейросеть обучена по проблеме Имазу (Imazu Problem), которая является набором сценариев ситуаций сближений судов. Используется долгая краткосрочная память (LSTM—Long Short-Term Memory) с учетом Правил МППСС-72 (правила 13–15). Проведенные в компьютерной среде симуляции показывают, что данный подход успешно справляется с предложенными ему ситуациями опасного сближения судов из списка проблемы Имазу, в том числе при участии большего количества судов, чем было предписано заранее. Отмечается, что обученная модель имеет низкую стабильность курса, что может ввести в замешательство другие суда.

Авторы статьи [29] для решения проблемы расхождения БЭС предлагают использовать методы глубокого обучения со сверточной нейронной сетью (Convolutional Neural Network) и долгой краткосрочной памятью (Long Short-Term Memory) в комбинации с эвристическим планированием. Разработанная архитектура нейронной сети представлена в статье, в основе которой модифицированная архитектура GoogleNet. Нейронная сеть была обучена с использованием оптимизации ADAM (Adaptive Moment Estimation: представлена в [30]). Выходом нейросети является тренд следующей стратегии предотвращения столкновений, применяемый впоследствии для финального планирования пути с использованием эвристического планирования (применяется алгоритм электромагнетизма (Electromagnetism-like Mechanism)). Подход был смоделирован в компьютерной среде с участием трех–четырёх судов, затем было выполнено сравнение с оригинальными алгоритмами: судно, на котором был смоделирован метод, представленный в статье, успешно расходилось с опасными судами, однако предпринимало лишние маневры, и оригинальные алгоритмы справлялись с задачей более эффективно. Данный подход не учитывает требования Правил МППСС-72.

Модель планирования пути БЭС, описанная в работе [31], использует глубокий градиент детерминистической политики (Deep Deterministic Policy Gradient — DDCP-algorithm), глубокое обучение с подкреплением и искусственные потенциальные поля для обучения модели по историческим данным и постоянному взаимодействию с окружающей неизвестной средой. МППСС-72 (правила 13–15) трансформированы в зоны, закрытые для навигации БЭС. Рассматривается ситуация расхождения с несколькими судами, при том, что суда-цели не маневрируют. Нейросеть обучена по реальным данным движения судов, полученным с АИС в период с 1 по 15 августа 2018 г. на маршруте Да-

лянь-Яньтай. Согласно данным симуляций, проведенных в компьютерной среде, предлагаемый подход имеет более высокие показатели точности и производительности, чем в других классических методах, основанных на фундаментальном обучении с подкреплением. Авторы отмечают, что в подходе не была учтена гидродинамическая модель движения судна.

В статье [32] для решения проблемы автоматического расхождения нескольких судов используется алгоритм асинхронного преимущества *субъект-критика* (Asynchronous Advantage Actor-Critic (A3C) Algorithm), долгая краткосрочная память и Q -обучение. Последнее используется для адаптивного принятия решений между контроллером на основе обратной модели долгой краткосрочной памяти и безмодельной политикой A3C. Используется модель движения судна с тремя степенями свободы Абковица [33] и модель группы математических моделей (MMG — Math Model Group), а также модель риска столкновения для расчета индекса опасности столкновения. Для предотвращения столкновений нейронная сеть управляет только положением пера руля. Рассматривается ситуация расхождения с несколькими судами и только судно-оператор совершает маневры расхождений. По результатам проведенных в компьютерной среде симуляций авторами сделан вывод о том, что представленный комбинированный метод обучения «работает» быстрее и лучше, чем оригинальная A3C-модель с традиционными методами оптимизации. В данном подходе не учитываются требования Правил МППСС-72.

Для удобства основные данные по всем рассмотренным в статье исследованиям были помещены в сводную таблицу (с. 348), в которой нашли отражение следующие вопросы: учет Правил МППСС-72, учет гидродинамических характеристик судна, возможность маневрирования скоростью и расхождения со статическими препятствиями, наличие результатов симуляций в компьютерной среде и натурных испытаний, учет ветра, течений и морского волнения, а также основной метод, используемый в работе.

Заключение (Conclusion)

Разработка надежных систем предотвращения столкновений необходима для создания полностью автономных безэкипажных судов. Авторы проанализированных в исследовании статей для решения задачи расхождения судов предлагают использование различных методик, среди которых искусственные потенциальные поля, методы оптимизации муравьиной колонии, подход скоростных препятствий, интервальное программирование, нечеткая логика, алгоритмы оптимального взаимного предотвращения столкновений, нейронные сети, комбинированные алгоритмы и т. д.

Цель данной работы достигнута, выполнены следующие задачи: рассмотрены подходы, описывающие расхождение безэкипажных судов со статическими и динамическими препятствиями, с одним судном и группой судов. Достоинства и недостатки приведенных подходов обнаружены и отражены в сводной таблице для сравнения рассмотренных исследований.

Широкое распространение в решении задачи безопасного расхождения судов получили нейронные сети. Для этого нейросети обучают по сделанным на планшете выборкам ситуаций, используя алгоритмы глубокого обучения принятию решений с подкреплением для расхождения с препятствиями, Q -обучение, глубокое обучение с подкреплением, долгую краткосрочную память, алгоритмы проксимальной оптимизации, оптимизации ADAM и др. Среди подходов, использующих нейронные сети, следует выделить изложенные в работах [8], [10], [11], [16], [22], [28], [29], [31], [32].

Решение таких задач, как учет гидродинамических характеристик судна, соблюдение Правил МППСС-72 и обхождение статических препятствий, отходит как бы на второй план, и не во всех исследованиях им уделяется внимание. Так, учет гидродинамических характеристик судна отсутствует в работах [3], [6], [8], [10]–[12], [14], [19], [20], [22] и [31], требования Правил МППСС-72 не учитываются в работах [4], [8], [9], [22], [29], [32]. Некоторые работы рассматривают лишь ситуации расхождения двух судов, несмотря на то, что в реальных условиях гораздо чаще в расхождении участвуют три и более судов, имеющих различный навигационный статус; не все подходы позволяют БЭС использовать маневры скоростью; учет ветра, течений и морского волнения отсутствует во всех описанных подходах.

Данные исследованных в работе публикаций

Вид и источник рассматриваемого исследования	Учет Правил МППСС-72	Учет гидродинамических характеристик судна	Маневрирование скоростью	Расхождение со статическими препятствиями	Результаты симуляций в компьютерной среде / натуральных испытаний	Учет ветра, течений, морского волнения	Основной метод, используемый в работе
Подходы, рассматривающие расхождение со статическими и динамическими препятствиями	[3]	Да	Нет	Да	Да/Нет	Нет	Artificial Potential Fields
	[4]	Нет	Да	Да	Да/Нет	Нет	Ant Colony Optimisation
	[6]	Да	Нет	Да	Да/Да	Нет	Velocity Obstacles
	[8]	Нет	Нет	Да	Да/Нет	Нет	Deep Reinforcement Learning Obstacle Avoidance Decision-making
Подходы, рассматривающие расхождение двух судов	[9]	Нет	Да	Да	Да/Да	Нет	Velocity Resolution Method
	[10]	Да	Нет	Нет	Нет/Нет	Нет	Нейронные сети
	[11]	Да	Нет	Нет	Да/Нет	Нет	Нейронные сети
	[12]	Да	Нет	Да	Да/Да	Нет	Interval Programming, Multi-objective Optimisation
Подходы, рассматривающие расхождение с группой судов	[13]	Да	Да	Нет	Да/Нет	Нет	Нечеткая логика
	[14]	Да	Нет	Нет	Нет/Нет	Нет	Кооперативное маневрирование
	[16]	Да	Да	Да	Да/Да	Нет	Нейронные сети, Deep Reinforced Learning, Q-learning
	[19]	Да	Нет	Да	Да/Нет	Нет	Нечеткая логика
	[20]	Да	Нет	Нет	Да/Нет	Нет	Evidential Reasoning Theory, Optimal Reciprocal Collision Avoidance
	[22]	Нет	Нет	Да	Да/Нет	Нет	Cooperative Co-Evolutionary Neural Networks, Assembler Encoding with Evolvable Operations
	[23]	Да	Да	Да	Нет	Нет	Beetle Antennae Search
	[25]	Да	Да	Да	Да	Да/Нет	Linear extension algorithms
	[27]	Да	Да	Да	Да	Да/Нет	Evolutionary Sets of Safe Ship Trajectories
	[28]	Да	Да	Нет	Нет	Да/Нет	Obstacle Zone by Target, Proximal Policy Optimization Algorithm
[29]	Нет	Да	Да	Нет	Да/Нет	Convolutional Neural Network, Long Short-Term Memory	
[31]	Да	Нет	Да	Да	Да/Нет	Deep Deterministic Policy Gradient, Deep Reinforced Learning, Artificial Potential Fields	
[32]	Нет	Да	Нет	Нет	Да/Нет	Asynchronous Advantage Actor-Critic Algorithm, Q-learning	

Многие из представленных исследований имеют результаты симуляций в компьютерной среде, но лишь в единичных случаях имеются данные о проведении натуральных испытаний [6], [9], [12], [16]. Однако решение этих задач уже существует. Например, для описания гидродинамических характеристик судна можно использовать модель Номото или Абковица; интеграция МППСС-72 может быть выполнена с использованием искусственных потенциальных полей, скоростных препятствий, нечеткой логики, алгоритма оптимального взаимного предотвращения столкновений, интервального программирования или метода эволюционных наборов безопасных траекторий судов. Обход статических объектов и зон, запрещенных для навигации, может быть организован с использованием искусственных потенциальных полей. Однако даже представленные методы и алгоритмы имеют недостатки и ни одно из указанных ранее исследований не позволяет решить весь спектр существующих задач. Кроме того, решение совокупности этих задач потребует от процессоров БЭС высокой производительности.

Обзор указанных исследований показывает наличие только в некоторых из них результатов сравнения разработанных методов с более старыми алгоритмами. Однако при рассмотрении работ, где такие сравнения имеются, возникают вопросы о том, является ли тот алгоритм, с которым производилось сравнение, наиболее оптимальным решением задачи или существуют более усовершенствованные его варианты. Финальной целью применения всех ранее указанных технологий является полная автоматизация БЭС: совершенствование уже имеющихся методов, уменьшение ошибок вычислений, повышение уровня их надежности и возможность интеграции беспилотных судов в открытое морское пространство. На данный момент не существует алгоритмов, позволяющих решить все существующие задачи для того, чтобы безэкипажные суда могли войти в открытое морское пространство наравне с другими судами. Целью дальнейших разработок в области беспилотных технологий должно стать совершенствование уже существующих алгоритмов и устранение недостатков для решения всего комплекса задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chauvin C.* Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS / C. Chauvin, S. Lardjane, G. Morel, J. P. Clostermann, B. Langard // *Accident Analysis & Prevention*. — 2013. — Vol. 59. — Pp. 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.
2. *Autonomous shipping.* IMO [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx> (дата обращения 29.04.2021).
3. *Naeem W.* Collision avoidance of maritime vessels / W. Naeem, S. C. de Oliveira Henrique, M. Abu-Tair // *Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles*. — 2019. — Pp. 61–84. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch3.
4. *Lazarowska A.* Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation // *The Journal of Navigation*. — 2015. — Vol. 68. — Pp. 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.
5. *Bonabeau E.* *Swarm Intelligence. From Natural to Artificial Systems* / E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz. — Oxford University Press, 1999. — 307 p. DOI: 10.1093/oso/9780195131581.001.0001.
6. *Kuwata Y.* Safe Maritime Navigation with COLREGS Using Velocity Obstacles / Y. Kuwata, M. T. Wolf, D. Zarzhitsky, T. L. Huntsberger // 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. — IEEE, 2011. — Pp. 4728–4734. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094677.
7. *Fiorini P.* Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles / P. Fiorini, Z. Shiller // *International Journal of Robotics Research*. — 1998. — Vol. 17. — Is. 7. — Pp. 760–772. DOI: 10.1177/027836499801700706.
8. *Wang C.* Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environments / C. Wang, X. Zhang, L. Cong, J. Li, J. Zhang // *Evolving Systems*. — 2019. — Vol. 10. — Is. 4. — Pp. 649–658. DOI: 10.1007/s12530-018-9253-9.
9. *Fan Y.* An autonomous dynamic collision avoidance control method for unmanned surface vehicle in unknown ocean environment / Y. Fan, X. Sun, G. Wang // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. — 2019. — Vol. 16. — Is. 2. — Pp. 1729881419831581. DOI: 10.1177/1729881419831581.

10. *Седова Н. А.* Нейросетевое решение задачи расхождения двух судов в зоне чрезмерного сближения / Н. А. Седова, В. А. Седов // Перспективы развития информационных технологий. Труды Всероссийской молодежной научно-практической конференции. — Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2014. — С. 278–279.

11. *Седова Н. А.* Метод расхождения морских судов в зоне чрезмерного сближения на основе нейронечетких технологий / Н. А. Седова, В. А. Седов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. — 2018. — Т. 8. — № 4 (29). — С. 53–62.

12. *Benjamin M. R.* Navigation of Unmanned Marine Vehicles in Accordance with the Rules of the Road / M. R. Benjamin, J. A. Curcio, J. J. Leonard, P. M. Newman // Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. — IEEE, 2006. — Pp. 3581–3587. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642249.

13. *Perera L. P.* Autonomous Guidance and Navigation based on the COLREGs rules and regulations of collision avoidance / L. P. Perera, J. P. Carvalho, C. G. Soares // Proceedings of the international workshop advanced ship design for pollution prevention. — London, UK: Taylor & Francis Group, 2010. — Pp. 205–216. DOI: 10.1201/b10565-26.

14. *Смоленцев С. В.* Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море / С. В. Смоленцев, А. Е. Сазонов, Ю. М. Искандеров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.

15. *Rego F. C.* Cooperative path-following control with logic-based communications: Theory and practice / F. C. Rego, N. T. Hung, C. N. Jones, A. M. Pascoal, A. P. Aguiar, S. Sharma, B. Subudhi // Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles. — 2019. — Pp. 187–224. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch8.

16. *Shen H.* Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning / H. Shen, H. Hashimoto, A. Matsuda, Y. Taniguchi, D. Terada, C. Guo // Applied Ocean Research. — 2019. — Vol. 86. — Pp. 268–288. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.020.

17. *Mnih V.* Playing Atari with Deep Reinforcement Learning / V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. Graves, I. Antonoglou, D. Wierstra, M. Riedmiller // arXiv preprint arXiv:1312.5602. — 2013. — 9 p.

18. *Fossen T. I.* Guidance and control of ocean vehicles. Doctors Thesis; University of Trondheim, Norway / T. I. Fossen. — Chichester, England: John Wiley & Sons, 1999. — 494 p.

19. *Hu Y.* Multi-ship collision avoidance decision-making based on collision risk index / Y. Hu, A. Zhang, W. Tian, J. Zhang, Z. Hou // Journal of Marine Science and Engineering. — 2020. — Vol. 8. — Is. 9. — Pp. 640. DOI: 10.3390/jmse8090640.

20. *Zhao Y.* A real-time collision avoidance learning system for Unmanned Surface Vessels / Y. Zhao, W. Li, P. Shi // Neurocomputing. — 2016. — Vol. 182. — Pp. 255–266. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.12.028.

21. *Wang Y. M.* Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach / Y. M. Wang, J. B. Yang, D. L. Xu // European Journal of Operational Research. — 2006. — Vol. 174. — Is. 3. — Pp. 1885–1913. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.09.059.

22. *Praczyk T.* Neural anti-collision system for Autonomous Surface Vehicle / T. Praczyk // Neurocomputing. — 2015. — Vol. 149. — Pp. 559–572. DOI: 10.1016/j.neucom.2014.08.018.

23. *Xie S.* Ship predictive collision avoidance method based on an improved beetle antennae search algorithm / S. Xie, X. Chu, M. Zheng, C. Liu // Ocean Engineering. — 2019. — Vol. 192. — Pp. 106542. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106542.

24. *Jiang X.* BAS: Beetle antennae search algorithm for optimization problems / X. Jiang, S. Li // International Journal of Robotics and Control. — 2018. — Vol. 1. — No. 1. DOI: 10.5430/ijrc.v1n1p1.

25. *Zhang J.* A distributed anti-collision decision support formulation in multi-ship encounter situations under COLREGs / J. Zhang, D. Zhang, X. Yan, S. Haugen, C. G. Soares // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 105. — Pp. 336–348. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.06.054.

26. *Zhang J. F.* Ship trajectory control optimization on anti-collision maneuvering / J. F. Zhang, X. D. Yang, D. Zhang, S. Haugen // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2013. — Vol. 7. — Nr. 1. — Pp. 89–93. DOI: 10.12716/1001.07.01.11.

27. *Szlapczynski R.* On evolutionary computing in multi-ship trajectory planning / R. Szlapczynski, J. Szlapczynska // Applied Intelligence. — 2012. — Vol. 37. — Is. 2. — Pp. 155–174. DOI: 10.1007/s10489-011-0319-7.

28. Sawada R. Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces / R. Sawada, K. Sato, T. Majima // *Journal of Marine Science and Technology*. — 2020. — Pp. 1–16. DOI: 10.1007/s00773-020-00755-0.

29. Li Y. Deep learning structure for collision avoidance planning of unmanned surface vessel / Y. Li, J. Zheng // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. — 2021. — Vol. 235. — Is. 2. — Pp. 511–520. DOI: 10.1177/1475090220970102.

30. Kingma D. P. A method for stochastic optimization / D. P. Kingma, J. Ba // *The 3rd-International Conference for Learning Representations, San Diego, 2015. — ICLR, 2015.*

31. Guo S. An autonomous path planning model for unmanned ships based on deep reinforcement learning / S. Guo, X. Zhang, Y. Zheng, Y. Du // *Sensors*. — 2020. — Vol. 20. — Is. 2. — Pp. 426. DOI: 10.3390/s20020426.

32. Xie S. A composite learning method for multi-ship collision avoidance based on reinforcement learning and inverse control / S. Xie, X. Chu, M. Zheng, C. Liu // *Neurocomputing*. — 2020. — Vol. 411. — Pp. 375–392. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.05.089.

33. Abkowitz M. A. Measurement of hydrodynamic characteristics from ship maneuvering trials by system identification / M. A. Abkowitz // *Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers*. — 1981. — Vol. 88. — Pp. 283–318.

REFERENCES

1. Chauvin, Christine, Salim Lardjane, Gaël Morel, Jean-Pierre Clostermann, and Benoît Langard. “Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS.” *Accident Analysis & Prevention* 59 (2013): 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.

2. Autonomous shipping. Web. 29 Apr. 2021 <<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>>.

3. Naeem, Wasif, Sable Campbell, and Mamun Abu-Tair. “Collision avoidance of maritime vessels.” *Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles* (2019): 61–84. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch3.

4. Lazarowska, Agnieszka. “Ship’s trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimisation.” *The Journal of Navigation* 68.2 (2015): 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.

5. Bonabeau, Eric, Marco Dorigo, and Guy Theraulaz. *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Oxford university press, 1999. DOI: 10.1093/oso/9780195131581.001.0001.

6. Kuwata, Yoshiaki, Michael T. Wolf, Dimitri Zarzhitsky, and Terrance L. Huntsberger. “Safe maritime navigation with COLREGS using velocity obstacles.” *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2011. 4728–4734. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094677.

7. Fiorini, Paolo, and Zvi Shiller. “Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles.” *The International Journal of Robotics Research* 17.7 (1998): 760–772. DOI: 10.1177/027836499801700706.

8. Wang, Chengbo, Xinyu Zhang, Longze Cong, Junjie Li, and Jiawei Zhang. “Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environments.” *Evolving Systems* 10.4 (2019): 649–658. DOI: 10.1007/s12530-018-9253-9.

9. Fan, Yunsheng, Xiaojie Sun, and Guofeng Wang. “An autonomous dynamic collision avoidance control method for unmanned surface vehicle in unknown ocean environment.” *International Journal of Advanced Robotic Systems* 16.2 (2019): 1729881419831581. DOI: 10.1177/1729881419831581.

10. Sedova, N. A., and V. A. Sedov. “Neirosetevoe reshenie zadachi raskhozhdeniya dvukh sudov v zone chrezmernogo sblizheniya.” *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologii. Trudy Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kemerovo: Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni T. F. Gorbacheva, 2014. 278–279.

11. Sedova, N. A., and V. A. Sedov. “Ships Passing Method in the Heavy Traffic Zone on Neuro-Fuzzy Base.” *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering* 8.4(29) (2018): 53–62.

12. Benjamin, Michael R., J. A. Curcio, J. J. Leonard, and P. M. Newman. “Navigation of unmanned marine vehicles in accordance with the rules of the road.” *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006*. IEEE, 2006. 3581–3587. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642249.

13. Perera, L. P., J. P. Carvalho, and C. Guedes Soares. “Autonomous guidance and navigation based on the COLREGS rules and regulations of collision avoidance.” *Proceedings of the international workshop advanced ship design for pollution prevention*. London, UK: Taylor & Francis Group, 2010. 205–216. DOI: 10.1201/b10565-26.

14. Smolentsev, Sergey V., Anatolii E. Sazonov, and Yurii M. Iskanderov. "Cooperative maneuvering of unmanned ships for collision avoidance at sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.
15. Rego, Francisco C., Nguyen T. Hung, Colin N. Jones, António M. Pascoal, and A. Pedro Aguiar. "Cooperative path-following control with logic-based communications: Theory and practice." *Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles* (2019): 187–224. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch8.
16. Shen, Haiqing, Hirotsada Hashimoto, Akihiko Matsuda, Yuuki Taniguchi, Daisuke Terada, and Chen Guo. "Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning." *Applied Ocean Research* 86 (2019): 268–288. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.020.
17. Mnih, Volodymyr, Koray Kavukcuoglu, David Silver, Alex Graves, Ioannis Antonoglou, Daan Wierstra, and Martin Riedmiller. "Playing atari with deep reinforcement learning." *arXiv preprint arXiv:1312.5602*. 2013.
18. Fossen, Thor I. Guidance and control of ocean vehicles. Doctors Thesis; University of Trondheim, Norway. Chichester, England: John Wiley & Sons, 1999.
19. Hu, Yingjun, Anmin Zhang, Wuliu Tian, Jinfen Zhang, and Zebei Hou. "Multi-ship collision avoidance decision-making based on collision risk index." *Journal of Marine Science and Engineering* 8.9 (2020): 640. DOI: 10.3390/jmse8090640.
20. Zhao, Yuxin, Wang Li, and Peng Shi. "A real-time collision avoidance learning system for Unmanned Surface Vessels." *Neurocomputing* 182 (2016): 255–266. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.12.028.
21. Wang, Ying-Ming, Jian-Bo Yang, and Dong-Ling Xu. "Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach." *European Journal of Operational Research* 174.3 (2006): 1885–1913. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.09.059.
22. Praczyk, Tomasz. "Neural anti-collision system for Autonomous Surface Vehicle." *Neurocomputing* 149 (2015): 559–572. DOI: 10.1016/j.neucom.2014.08.018.
23. Xie, Shuo, Xiumin Chu, Mao Zheng, and Chenguang Liu. "Ship predictive collision avoidance method based on an improved beetle antennae search algorithm." *Ocean Engineering* 192 (2019): 106542. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106542.
24. Jiang Xiangyuan, and Shuai Li. "BAS: Beetle antennae search algorithm for optimization problems." *International Journal of Robotics and Control* 1.1 (2018). DOI: 10.5430/ijrc.v1n1p1.
25. Zhang, Jinfen, Di Zhang, Xinpeng Yan, Stein Haugen, and C. Guedes Soares. "A distributed anti-collision decision support formulation in multi-ship encounter situations under COLREGs." *Ocean Engineering* 105 (2015): 336–348. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.06.054.
26. Zhang, J.F., X. D. Yang, D. Zhang, and S. Haugen. "Ship trajectory control optimization in anti-collision maneuvering." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 7.1 (2013): 89–93. DOI: 10.12716/1001.07.01.11.
27. Szlapczynski, Rafal, and Joanna Szlapczynska. "On evolutionary computing in multi-ship trajectory planning." *Applied Intelligence* 37.2 (2012): 155–174. DOI: 10.1007/s10489-011-0319-7.
28. Sawada, Ryohei, Keiji Sato, and Takahiro Majima. "Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces." *Journal of Marine Science and Technology* (2020): 1–16. DOI: 10.1007/s00773-020-00755-0.
29. Li, Yun, and Jian Zheng. "Deep learning structure for collision avoidance planning of unmanned surface vessel." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 235.2 (2021): 511–520. DOI: 10.1177/1475090220970102.
30. Kingma, Diederik P., and Jimmy Ba. "A method for stochastic optimization." *The 3rd International Conference for Learning Representations, San Diego, 2015*. ICLR, 2015.
31. Guo, Siyu, Xiuguo Zhang, Yisong Zheng, and Yiquan Du. "An autonomous path planning model for unmanned ships based on deep reinforcement learning." *Sensors* 20.2 (2020): 426. DOI: 10.3390/s20020426.
32. Xie, Shuo, Xiumin Chu, Mao Zheng, and Chenguang Liu. "A composite learning method for multi-ship collision avoidance based on reinforcement learning and inverse control." *Neurocomputing* 411 (2020): 375–392. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.05.089.
33. Abkowitz, Martin A. "Measurement of hydrodynamic characteristics from ship maneuvering trials by system identification." *Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers* 10 (1980): 283–318.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Триполец Олег Юрьевич — аспирант
Научный руководитель:
Дерябин Виктор Владимирович — доктор
технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: tripolets.97@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tripolets, Oleg Y. — Postgraduate
Supervisor:
Deryabin, Viktor V. — Dr. of Technical Sciences,
associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: tripolets.97@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 18 мая 2021 г.
Received: May 18, 2021.*

AUTOMATION OF SEARCH FOR ROUTES OF PROFITABLE FREIGHT TRANSPORTATION BY MEANS OF INTEGER PROGRAMMING OF MATLAB

A. A. Chertkov, Ya. N. Kask, S. V. Saburov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The issue of providing high-efficiency traffic of freight by searching for profitable freight traffic on the basis of widespread introduction of digital and computer technologies in hardware and software technologies is considered. It is emphasized that the ability to manage high-tech traffic is provided on the platform of broad digitization of mathematical models of transport networks using intelligent systems and integrated complexes. It is shown that the main problem in automating the search for routes of profitable freight in transport networks is the development of mathematical models, adequate to real processes and economic conditions in the market, using methods of numerical optimization. These models should be flexible in reconfiguring to changing system conditions and tasks, as well as low time and resources to adapt to these conditions. In order to increase the efficiency of freight traffic in the transport network, one of the ways to find cost-effective routes in the logistics network based on the use of integer linear programming using MATLAB tools that provide maximum targeted functionality of dual transport task is explored in the paper. To this end, a computational algorithm and optimization procedure have been proposed; they allow you to fully automate the process of solving a dual transport problem and to obtain optimal assessments of variables, satisfying the condition of the balance of direct and dual transport tasks, according to which the values of their target functions are equal. This avoids manual iterative procedures for approaching the initial support plan to the optimal plan envisaged by the traditional heuristic methods. The concrete example has shown that with the help of integer programming tools in the MATLAB environment, it is possible to automate the search for cost-effective shipping routes at a qualitatively new level, for which the incremental value of the unit of transported products will be maximum.

Keywords: automation, computational algorithm, optimization procedure, model, modeling, target function, cost-effective routes, freight, transportation network.

For citation:

Chertkov, Alexandr A., Yaroslav N. Kask, and Sergey V. Saburov. "Automation of search for routes of profitable freight transportation by means of integer programming of MATLAB." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 496–504. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-496-504.

УДК 681.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА МАРШРУТОВ РЕНТАБЕЛЬНЫХ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК СРЕДСТВАМИ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ MATLAB

А. А. Чертков, Я. Н. Каск, С. В. Сабуров

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен вопрос обеспечения высокоэффективного трафика грузоперевозок путем поиска рентабельных маршрутов на основе широкого внедрения в аппаратно-программных средствах автоматизации данных процессов цифровых технологий, а также обеспечения высокоэффективного трафика. Подчеркивается, что возможность управления высокотехнологичным трафиком грузоперевозок обеспечивается на платформе широкой цифровизации математических моделей транспортных сетей с использованием интеллектуальных систем и интегрированных комплексов. Показано, что основной проблемой при автоматизации поиска маршрутов рентабельных грузоперевозок в транспортных сетях является разработка математических моделей, адекватных реальным процессам и экономической конъюнктуре на рынке, с применением методов численной оптимизации. Эти модели должны отличаться

гибкостью перенастройки к изменяющимся условиям работы системы и выполняемым задачам, а также малыми затратами времени и ресурсов на адаптацию к ним. С целью повышения эффективности трафика грузоперевозок в транспортной сети в статье рассмотрен один из способов поиска рентабельных маршрутов в логистической сети на основе применения целочисленного линейного программирования с использованием инструментальных средств MATLAB, обеспечивающих максимум целевого функционала двойственной транспортной задачи. С этой целью предложены вычислительный алгоритм и процедура оптимизации, позволяющие полностью автоматизировать процесс решения двойственной транспортной задачи и получить оптимальные оценки переменных, удовлетворяющих условию баланса прямой и двойственной транспортных задач, согласно которому значения их целевых функций равны. Это позволяет избежать выполнения ручных итеративных процедур приближения начального опорного плана к оптимальному плану, предусмотренных традиционными эвристическими методами. На конкретном примере показано, что с помощью инструментальных средств целочисленного программирования в среде MATLAB можно на качественно новом уровне автоматизировать поиск рентабельных маршрутов доставки грузов, для которых приращение ценности единицы перевозимой продукции будет максимальным.

Ключевые слова: автоматизация, вычислительный алгоритм, процедура оптимизации, модель, моделирование, целевая функция, рентабельные маршруты, грузоперевозки, транспортная сеть.

Для цитирования:

Чертков А. А. Автоматизация поиска маршрутов рентабельных грузоперевозок средствами целочисленного программирования MATLAB / А. А. Чертков, Я. Н. Каск, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 496–504. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-496-504.

Введение (Introduction)

В условиях глобальной цифровизации и интенсификации транспортных потоков автоматизация поиска наиболее эффективных решений потоковых задач позволяет оптимальным образом распределять имеющиеся финансовые и материальные ресурсы, необходимые для оптимального функционирования всех отраслей экономики на качественно новом технологическом уровне [1]–[3]. Одной из важных научных проблем, получившей прикладное значение на водном транспорте и в других отраслях отечественной экономики, является автоматизация поиска эффективных грузопотоков (трафика) в системах управления грузоперевозками на основе оптимизации стоимостных и материальных затрат с использованием компьютерных моделей [4].

Решение задач данной проблематики с учетом динамики развития логистических сетей и соответствующих структур управления рынком транспортных услуг, а также усиления требований к экономии материальных и финансовых ресурсов на платформе автоматизации поиска максимально рентабельных грузоперевозок имеет актуальное значение [2], [5]. С позиций системности важным механизмом автоматизации поиска оптимального трафика перевозки грузов могут служить *методы исследования операций* [6], [7] и построенные на их основе модели потоковых задач для сетей различного назначения: транспортных, логистических, энергетических, коммуникационных и др. Алгоритмы, реализующие оптимальное решение потоковых задач, должны базироваться на цифровой технологической платформе [8], [9], использующей инструментарий мощных программно-вычислительных оболочек. С точки зрения компьютерного моделирования и алгоритмизации потоковых задач управления грузоперевозками их оптимальное решение может быть получено *экстремальными методами* [10], [11], при условии сохранения баланса (равновесия) грузопотоков в узлах. Это обеспечит поиск оптимальных маршрутов грузоперевозок в транспортной сети независимо от условий ее функционирования.

В работе рассмотрен один из способов поиска рентабельных маршрутов в логистической сети на основе применения целочисленного линейного программирования с использованием инструментальных средств MATLAB, обеспечивающих максимум целевого функционала двойственной транспортной задачи. Сначала решается *прямая транспортная задача* оптимального планирования грузоперевозок для удовлетворения требуемого спроса потребителей на рынке путем моделирования грузопотоков от каждого поставщика (с учетом имеющихся запасов в нем) в каждый пункт

назначения (с учетом его потребности). Затем решается *двойственная транспортная задача* с целью вычисления потенциалов как поставщика (производителя), так и потребителя для определения максимальной ценности единицы перевозимой продукции. Потенциалы можно интерпретировать как стоимости единицы продукции у поставщиков и потребителей продукции, а ограничения на эти переменные служат транспортные расходы на доставку продукции. Для поиска оптимального варианта грузоперевозки составляется производственная матрица маршрутизации из разностей двойственных переменных, интерпретируемых как приращения ценности единицы продукции при перевозке грузов из i -го пункта отправления в j -й пункт назначения грузов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Покажем на примере классической транспортной задачи [12], заданной в виде канонической математической модели:

$$F = \min \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \right), \quad (1)$$

возможность решения и моделирования задачи поиска рентабельных маршрутов грузоперевозок средствами целочисленного программирования, реализуемыми с применением функциональных средств MATLAB, при условиях:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Представим модель двойственной задачи путем замены переменных x_{ij} в условии (2) на $u_1, u_2, u_3, \dots, u_m$ и переменных x_{ij} из условия (3) на $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$. С учетом однократного вхождения каждой переменной x_{ij} как в условия (2), (3), так и в целевую функцию (1) двойственная транспортная задача относительно прямой задачи формулируется следующим образом: нужно найти такие неотрицательные числа u_i ($i = 1, 2, \dots, m$) и v_j ($j = 1, 2, \dots, n$), которые бы обращали в максимум целевой функционал:

$$G = \max \left(\sum_{j=1}^n b_j v_j - \sum_{i=1}^m a_i u_i \right),$$

при условии

$$v_j - u_i \leq c_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n). \quad (4)$$

Переменные u_i, v_j двойственной задачи называются *потенциалами поставщика и потребителя* и интерпретируются как стоимости единицы продукции у поставщиков и потребителей продукции соответственно. В систему ограничений на эти переменные, как следует из условия (4), входят $m \times n$ неравенств, правыми границами которых служат транспортные расходы на доставку продукции.

Необходимым условием оптимальности пары допустимых решений $X^* = \{x_{ij}^*\}$ и $Y^* = \{u_1, \dots, u_m, v_1, \dots, v_n\}$ прямой и двойственной транспортных задач, соответственно, как следует из теоремы равновесия решений этих задач, является удовлетворение следующих соотношений:

- если $x_{ij}^* > 0$, то $v_j - u_i = c_{ij}$;
- если $v_j - u_i < c_{ij}$, то $x_{ij}^* = 0$.

Эти соотношения являются необходимыми и достаточными условиями оптимальности решений *транспортной задачи*.

Покажем на конкретном примере решение двойственной транспортной задачи средствами целочисленного программирования MATLAB. Полагаем известной из табл. 1 матрицу тарифов по доставке единицы груза от каждого поставщика в каждый пункт назначения груза.

Таблица 1

Стоимость перевозки в пункты потребления ед. груза (в уд. е)

Предприятия	Пункты потребления				Запасы a_i
	1	2	3	4	
1	$C_{11} = 5$	$C_{12} = 2$	$C_{13} = 4$	$C_{14} = 9$	2720
2	$C_{21} = 2$	$C_{22} = 3$	$C_{23} = 5$	$C_{24} = 7$	3180
3	$C_{31} = 8$	$C_{32} = 1$	$C_{33} = 3$	$C_{34} = 6$	3000
Потребности b_j	1070	2930	2360	2640	

Необходимо минимизировать суммарные транспортные расходы по перевозке продукции. Решение. Проверим необходимое и достаточное условия разрешимости задачи:

$$\sum_{i=1}^3 a_i = 2720 + 3180 + 3000 = 8900;$$

$$\sum_{j=1}^4 b_j = 1070 + 2930 + 2360 + 2640 = 9000.$$

Как видно, суммарная потребность груза в пунктах назначения меньше запасов груза на базах. Следовательно, модель исходной транспортной задачи является «открытой». Чтобы получить «закрытую» модель, введем дополнительный (фиктивный) пункт доставки с потребностью, равной 100 (9000–8900). Тарифы перевозки единицы груза из базы во все магазины полагаем равными нулю. Занесем исходные данные в распределительную табл. 2.

Таблица 2

Дополненная фиктивным поставщиком тарифная матрица

Пункты отправления	Пункты потребления				Запасы a_i
	1	2	3	4	
1	5	2	4	9	2720
2	2	3	5	7	3180
3	8	1	3	6	3000
4	0	0	0	0	100
Потребности b_j	1070	2930	2360	2640	

Сначала решим прямую задачу получения оптимального плана перевозки грузов в пункты потребления, используя для этой цели математический аппарат целочисленного линейного программирования, который в кодах MATLAB реализуется с помощью функции *intlinprog* пакета Optimization Toolbox программно-вычислительной среды MATLAB. Подготовка данных и ввод информации осуществляются при соблюдении синтаксиса функций.

Использование в предлагаемом алгоритме функции целочисленного программирования позволяет задавать ограничения трафика назначением целочисленных значений как искомым переменных, так и критерия качества для всех разрешенных маршрутов в сети, что является его *существенным отличием* от известных алгоритмов. Ее аргументы задаются векторами и матрицами, входящими в состав ограничений трафика перевозок, и определяют условия поиска области допустимых значений:

- $A \cdot x \leq b$ — линейные неравенства (A — матрица, b — вектор);
- $A_{eq} \cdot x = b_{eq}$ — линейные уравнения (A_{eq} — матрица, b_{eq} — вектор);
- $lb \leq x \leq ub$ — ограничения на координаты (lb — вектор нижних границ и ub — вектор верхних границ).

Целевая функция f^*x в `intlinprog` задается вектором коэффициентов f , а `intcon` — вектором целых положительных чисел, являющихся компонентами вектора x .

Форма обращения к этой функции:

`[x, J]=intlinprog(f, intcon, A, b, Aeq, beq, lb, ub),`
где J — значение целевого функционала.

Для обращения к функции `intlinprog` подготовим входную информацию:

– вектор коэффициентов целевой функции:

`f=[5 2 4 9;2 3 5 7;8 1 3 6;0 0 0 0]%тыс. руб.`

– матрица коэффициентов системы линейных ограничений по поставкам:

`A=[ones(1,4) zeros(1,4) zeros(1,4) zeros(1,4);
zeros(1,4) ones(1,4) zeros(1,4) zeros(1,4);
zeros(1,4) zeros(1,4) ones(1,4) zeros(1,4);
zeros(1,4) zeros(1,4) zeros(1,4) ones(1,4)];`

– вектор объемов поставок (производства):

`b=[2720;3180;3000;100];`

– матрица коэффициентов системы линейных ограничений по потреблению:

`Aeq=[eye(4) eye(4) eye(4) eye(4)];`

– вектор объемов потребления (емкостей складов):

`beq=[1070 2930 2360 2640]';`

– вектор нижних границ переменных:

`lb=zeros(16,1);`

– компоненты вектора x :

`intcon=[1:16].`

Результаты решения прямой транспортной задачи:

`>> chetz3.m`

```
f =
     5     2     4     9
     2     3     5     7
     8     1     3     6
     0     0     0     0
```

Optimal solution found.

```
fval =
    11490

x =
     0    2720     0     0
    610    210    2360     0
    460     0     0    2540
     0     0     0    100
```

`>>`

Сформулируем задачу, двойственную задаче, рассмотренной в данном примере. Для формулировки двойственной задачи к любой прямой задаче необходимо руководствоваться следующими правилами:

1. Если прямая задача является задачей максимизации, то двойственная будет задачей минимизации и наоборот.

2. Каждому ограничению типа стандартного неравенства прямой задачи соответствует неотрицательная двойственная переменная двойственной задачи и наоборот.

3. Каждому ограничению типа равенства прямой задачи соответствует двойственная переменная без ограничения на знак и наоборот.

4. Коэффициенты целевой функции прямой задачи становятся свободными членами ограничений двойственной задачи и наоборот.

5. Матрицу ограничений двойственной задачи получают транспонированием матрицы ограничений прямой задачи.

Для целочисленного моделирования двойственной транспортной задачи в кодах MATLAB, обращаемся к той же функции *intlinprog*, но уже используя составные аргументы:

```
[y, qval]=intlinprog([b; beq], intcon,-[A' Aeq'],-f,[],[], lb,[])
```

В коде используется тот же метод *intlinprog* применительно к прямой транспортной задаче, но в отличие от него в двойственной транспортной задаче аргументы правой части функции *intlinprog* *b* и *A* являются составными из аргументов функции *intlinprog* прямой транспортной задачи *b* и *beq*, а также *A* и *Aeq* соответственно. В векторе переменной *y* будут находиться значения неизвестных двойственной задачи, а в переменной *qval* — значение целевой функции двойственной задачи. Необходимо также скорректировать вектор нижних границ, который с учетом числа ограничений (переменных *y*) имеет вид:

```
lb = zeros (8,1).
```

С учетом указанных правил и замечаний обращение к функции *intlinprog* в двойственной задаче примет вид:

```
intcon=[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8];
[y, qval]=intlinprog([b; beq], intcon,-[A' Aeq'],-f, [], [], lb, []);
u=[y(1) y(2) y(3) y(4)];
v=[y(5) y(6) y(7) y(8)].
```

Результаты (Results)

По результатам моделирования получим следующие значения двойственных переменных и целевой функции:

```
>> chetz3a
Optimal solution found.
y =
     3
     0
     2
     7
     2
     3
     5
     0

qval =
    37590

u =
     3     0     2     7

v =
     2     3     5     0

>>
```

Обсуждение (Discussion)

Экономическая интерпретация полученных результатов. Разность $v_j - u_i$ можно рассматривать как приращение ценности единицы продукции при перевозке из i -го пункта в j -й пункт. Поэтому если

$$v_j^* - u_i^* < c_{ij} \text{ и } x_{ij}^* = 0,$$

то перевозка из i -го пункта в j -й пункт нерентабельна.

Если $x_{ij}^* > 0$ (согласно оптимальному плану), то условию

$$v_j^* - u_i^* = c_{ij}$$

будет соответствовать рентабельная перевозка из i -го пункта в j -й пункт.

Находим разности потенциалов для всех значений $x_{ij}^* > 0$ (согласно оптимальному плану), полученных в прямой задаче:

$$v_1 - u_2 = 2, v_2 - u_1 = 0, v_3 - u_2 = 5, v_4 - u_3 = -2;$$

$$v_1 - u_3 = 0, v_2 - u_2 = 3, v_4 - u_4 = -7.$$

Условию оптимальности переменных двойственной задачи удовлетворяют следующие разности:

$$v_1 - u_2 = c_{21} = 2, x_{21}^* = 610 > 0;$$

$$v_2 - u_2 = c_{22} = 3, x_{22}^* = 210 > 0;$$

$$v_3 - u_2 = c_{23} = 5, x_{33}^* = 2360 > 0.$$

Отсюда видно, что максимально рентабельной является перевозка продукции из второго пункта производства в третий пункт потребления, для которой приращение ценности единицы перевозимой продукции, т. е. разность $v_3 - u_2 = c_{23} = 5$ при $x_{33}^* = 2360 > 0$, будет максимальной.

Проверим, соответствует ли найденное оптимальное решение двойственной задачи условию баланса прямой и двойственной транспортных задач, согласно которому значения их целевых функций составляют

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}^* = \sum_{j=1}^n b_j v_j^* - \sum_{i=1}^m a_i u_i^* \text{ или } F = G.$$

Экономическая интерпретация условия баланса: суммарные транспортные затраты при оптимальном плане перевозок равны оптимальному изменению суммарной стоимости продукции при полном удовлетворении спроса.

В рассматриваемом примере для наиболее рентабельной перевозки по условию равновесия для оптимальных значений $x_{23}^* = 2360$, $v_3^* = 5$ и $u_2^* = 0$ при известных значениях $c_{23} = 5$ и $b_3 = 2360$ должно выполняться равенство:

$$c_{23} x_{23}^* = b_3 v_3^* - a_2 u_2^*, \text{ или } 11800 = 11800.$$

Таким образом, суммарные транспортные затраты при оптимальной перевозке из второго пункта производства в третий пункт потребления равны оптимальному изменению суммарной стоимости продукции при полном удовлетворении его спроса.

Заключение (Conclusion)

Выполнено моделирование двойственной транспортной задачи средствами целочисленного программирования и получены оценки потенциалов как производителей, так и потребителей продукции, приращения которых позволили определить маршруты наиболее рентабельных грузоперевозок. Таким образом, предложен вычислительный алгоритм и процедура оптимизации,

позволяющие полностью автоматизировать процесс решения двойственной транспортной задачи и получить оптимальные оценки переменных, удовлетворяющие условию баланса прямой и двойственной транспортных задач, согласно которому значения их целевых функций равны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахаров В. В. Автоматизация поиска оптимальных маршрутов и грузовых потоков в транспортных сетях средствами целочисленного линейного программирования / В. В. Сахаров, И. А. Сикарев, А. А. Чертков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 647–657. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-647-657.
2. Сахаров В. В. Алгоритм графика перевозки грузов с обеспечением минимума транспортной работы / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, А. А. Дмитриев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 180–188. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-180-188.
3. Чертков А. А. Автоматизация выбора кратчайших маршрутов судов на основе модифицированного алгоритма Беллмана – Форда / А. А. Чертков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.
4. D'Ambrossio C. Mathematical programming techniques in water network optimization / C. D'Ambrossio, A. Lodi, S. Wiese, C. Bragalli // European Journal of Operational Research. — 2015. — Vol. 243. — Is. 3. — Pp. 774–778. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.12.039.
5. Гольштейн Е. Г. Задачи линейного программирования транспортного типа / Е. Г. Гольштейн, Д. Б. Юдин. — М.: Либроком, 2014. — 184 с.
6. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. — М.: КноРус, 2010. — 208 с.
7. Таха Х. А. Введение в исследование операций / Х. А. Таха. — 7-е изд. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. — 912 с.
8. Гузаиров М. Б. Моделирование транспортной сети поставок в строительной индустрии / М. Б. Гузаиров, В. А. Тарасова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2008. — Т. 10. — № 2. — С. 58–63.
9. Мэтьюз Д. Г. Численные методы. Использование MATLAB / Д. Г. Мэтьюз, К. Д. Финк. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. — 720 с.
10. Reich D. A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints / D. Reich // European Journal of Operational Research. — 2013. — Vol. 230. — Is. 3. — Pp. 487–494. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.04.049.
11. Кочетов Ю. А. Методы локального поиска для дискретных задач размещения: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Юрий Андреевич Кочетов; 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». — Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения РАН, 2009. — 269 с.
12. Кормен Т. Х. Алгоритмы: построение и анализ; пер. с англ. / Т. Х. Кормен [и др.]. — 2 изд. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. — 1296 с.

REFERENCE

1. Saharov, Vladimir V., Igor A. Sikarev, and Alexander A. Chertkov. "Automating search optimal routes and goods flows in transport networks means the integer linear programming." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 647–657. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-647-657.
2. Saharov, Vladimir Vasilevich, Alexandr Alexandrovich Chertkov, and Alexandr Alexandrovich Dmitriev. "Ensuring minimum transport work algorithm for goods traffic". *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 180–188. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-180-188.
3. Chertkov, Alexander A. "Automation selection shortcuts routes of ships on the basis of modified Bellman-Ford Algorithm." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.

4. D'Ambrosio, Claudia, Andrea Lodi, Sven Wiese, and CristianaBragalli. "Mathematical programming techniques in water network optimization." *European Journal of Operational Research* 243.3 (2015): 774–788. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.12.039.
5. Gol'shtein, E. G., and D. B. Yudin. *Zadachi lineinogo programmirovaniya transportnogo tipa*. M.: Librokom, 2014.
6. Venttsel', E. S. *Issledovanie operatsii. Zadachi, printsipy, metodologiya*. M.: KnoRus, 2010.
7. Takha, Kh. A. *Vvedenie v issledovanie operatsii*. 7th ed. M.: Izd. Dom «Vil'yams», 2005.
8. Guzairov, M. B., and V. A. Tarasova. "Modelirovanie transportnoi seti postavok v stroitel'noi industrii." *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* 10.2 (2008): 58–63.
9. Mathews, John H., and Kurtis D. Fink. *Numerical Methods Using MATLAB*. 3rd Edition. Prentice Hall College Div, 1998.
10. Reich, Daniel. "A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints." *European Journal of Operational Research* 230.3 (2013): 487–494. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.04.049.
11. Kochetov, Yu. A. *Metody lokal'nogo poiska dlya diskretnykh zadach razmeshcheniya*. Dr. diss. Institut matematiki im. S. L. Soboleva Sibirskogo otdeleniya RAN, 2009.
12. Cormen, Thomas H., Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, and Clifford Stein. *Introduction to algorithms*. Second Edition. The MIT Press, 2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чертков Александр Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Каск Ярослав Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rgam2010@yandex.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Сабуров Сергей Валерьевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_osnivr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chertkov, Alexandr A. — Dr. of Technical Sciences,
associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Kask, Yaroslav N. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: rgam2010@yandex.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Saburov, Sergey V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_osnivr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 30 мая 2021 г.
Received: May 30, 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517

CORRELATION-EXTREME NAVIGATION THROUGH GEOPHYSICAL FIELDS BASED ON THE USE OF SPLINE TECHNOLOGY

I. V. Yuyukin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

It has been assumed about the hypothetical possibility of independent control of the ship isolinear movement in the presence of special equipment on board that can constantly determine the values of the parameters of the navigation isoline, taking into account the changing of geometric characteristics. It is possible that the sequence of approximated navigation data can be an argument for calculating continuous values of the true course with synchronous transmission of commands to the steering wheel to ensure adaptive self-regulating movement of the vessel. The need to use the approximation of navigation functions is justified by the expert ability for the fast calculation the functionals of analytical inflections of spline isolines, interpreted in mathematics as characteristic points of changing the signs of derivatives, but corresponding in practical application to the signals of automatic command submission to ship controls in the form of a rudder and a telegraph. The technology of using spline functions for navigation through geophysical fields is considered on the specific example of reconstructing the chart of the anomalous gravity field in Peter the Great Bay from the data of trajectory measurements of an autonomous uninhabited underwater vehicle. Computer simulation of gravimetric procedures based on a hybrid algorithm of two-dimensional B-spline approximation as a reference geophysical field for matching with the data of measurement studies is performed. As a proof of the efficiency of the proposed approach, a three-dimensional synthesis of a fragment of the field of gravity anomalies in the Japanese Sea region is implemented. It is noted that computer visualization of the 3D format of the programmed ship movement provides the possibility of intellectual assistance to the navigator in the strategy of instantaneous determination of the ship position under any circumstances of navigation. The approved spline algorithms can serve as harmonized support for the sefarer's staff when making a competent decision on the management of the vessel in any emergency situation. The theoretical possibility of practical application of the theory of spline functions to the approximation of the newest isolines, the introduction of which in the navigation of the future is associated with the innovations of technical means of navigation, is predicted. It is assumed that isolinear passages through geophysical fields can be effectively used in the unpredictable conditions of modern shipping, under various force majeure circumstances and natural disasters, and become a real autonomous alternative to the satellite navigation.

Keywords: adaptive self-regulating ship movement, the spline isoline, trajectory measurements, autonomous uninhabited underwater vehicle, two-dimensional B-spline approximation, isolinear programming navigation.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Correlation-extreme navigation through geophysical fields based on the use of spline technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 505–517. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517.

УДК 656.61.052 656

КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПОЛЯМ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЛАЙНОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

И. В. Ююкин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Сделано предположение о гипотетической возможности независимого контроля изолинейного перемещения судна при наличии на борту специальной аппаратуры, способной постоянно определять значения параметров навигационной изолинии с учетом меняющихся геометрических характеристик. Допускается

возможность того, что последовательность аппроксимированных навигационных данных может быть аргументом для вычисления непрерывных значений истинного курса с синхронной передачей команд на авторулевой для обеспечения адаптивного саморегулируемого движения судна. Необходимость применения аппроксимации навигационных функций обосновывается экспертной возможностью быстрого вычисления функционалов аналитических перегибов сплайновых изолиний, интерпретируемых в математике как характерные точки смены знаков производных, соответствующих в практическом приложении сигналам автоматической подачи команд на судовые органы управления в виде руля и телеграфа. Рассмотрена технология применения сплайн-функций для навигации по геофизическим полям на конкретном примере восстановления карты аномального поля силы тяжести в заливе Петра Великого по данным траекторных измерений автономного необитаемого подводного аппарата. Выполнено компьютерное моделирование гравиметрических процедур на основе гибридного алгоритма двумерной B-сплайновой аппроксимации как эталонного геофизического поля для согласования с данными измерительных исследований. В качестве доказательства работоспособности предлагаемого подхода реализовано трехмерное синтезирование фрагмента поля аномалий силы тяжести района Японского моря. Отмечается, что компьютерная визуализация 3D формата программированного движения судна предоставляет возможность интеллектуальной помощи штурману в стратегии мгновенного определения места судна при любых обстоятельствах плавания. Апробированные сплайновые алгоритмы могут служить гармонизированной поддержкой для судоводительского состава при принятии грамотного решения по управлению судном при любой нештатной ситуации. Прогнозируется теоретическая возможность практического применения теории сплайн-функций к приближению новейших изолиний, внедрение которых в навигацию будущего связано с инновациями технических средств судовождения. Предполагается, что изолинейные переходы по геофизическим полям могут эффективно использоваться в непредсказуемых условиях современного судоходства, при различных форс-мажорных обстоятельствах и природных катаклизмах и служить реальной автономной альтернативой спутниковой навигации.

Ключевые слова: адаптивное саморегулируемое движение судна, сплайновая изолиния, траекторные измерения, автономный необитаемый подводный аппарат, двумерная B-сплайновая аппроксимация, изолинейное программированное плавание.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Корреляционно-экстремальная навигация по геофизическим полям на основе использования сплайновой технологии / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 505–517. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517.

Введение (Introduction)

В настоящее время активно развивается направление создания альтернативных спутниковой навигации интегрированных систем, в которых для определения положения и ориентации мобильного объекта наряду с традиционной инерциальной информацией используются сторонние данные неинерциальной природы [1]. В современных научных публикациях мотивированное управление движением по естественным геофизическим полям Земли различной природы получило название *корреляционно-экстремальной навигации* [2]. Корреляционно-экстремальная система, в которой используется связь параметров геофизических полей с географическими координатами судна, обладает высокой помехозащищенностью и, следовательно, является реальной альтернативой спутниковым системам навигации.

Суть рассматриваемого подхода заключается в том, что в процессе навигации измеряемые параметры геофизического поля постоянно сравниваются с предварительно созданным характеристическим эталоном, хранящимся в памяти бортового компьютера. В связи с этим маршрутизация движения судна по изолиниям объединяет задачи математического восстановления карты геофизического поля и ориентирования по изолиниям, вдоль которых реализация поля сохраняет постоянное параметрическое значение. При совместном решении комбинированная задача программируемого плавания с непрерывным оцениванием состояния знания виртуальной карты геофизического поля с лучшей точностью, чем счисление пути судна, позволяет постоянно уточнять местоположение морского подвижного объекта с помощью специальной бортовой навигационной системы при дискретном измерении параметров поля и их сопоставлении с навигационными данными.

Перспективную навигацию морской транспортной единицы, например, можно осуществлять на основе измерений градиента планетарного магнитного поля с использованием показаний бортовых магнитных градиентометров [3], [4]. Актуальными для практического применения являются: компьютерная визуализация измерительных полей батиметрии [5], магнитометрии, рельефа подводного ландшафта, аэромагнитной градиентометрии, оптических свойств поверхности, а также гравиметрии различных морских районов для оперативной информированности судоводителей в процессе изолинейной навигации. Рассмотренные примеры допускают обобщение синтеза математическими методами моделей геофизических полей с оцениванием их профильных контуров по экстремальным показателям.

Целесообразность применения сплайн-аппроксимации навигационных функций обосновывается экспертной возможностью быстрого вычисления навигационных параметров и их градиентов для оперативного установления таких атрибутов изолиний, как функционалы аналитических перегибов траектории движения судна, интерпретируемые в математике как характерные точки смены знаков производных, соответствующих в практическом приложении сигналам автоматической подачи команд на судовые органы управления в виде руля и телеграфа. Способствующим этому фактором является то, что при известном градиенте сравнительно просто найти производную функции по любому направлению. С учетом физической картины представления поля навигационной информации, отражающей изолинейное движение судна, сплайн динамически описывает в общей перспективе требуемую траекторию движения инерционного водоизмещающего средства.

Апробированные на методах сплайн-функций алгоритмы могут явиться интеллектуальной поддержкой для судоводительского состава в процессе принятия грамотного решения по управлению судном в автономном регулировании движения при любой нештатной ситуации. Трехмерная графическая визуализация навигационной информации для вахтенного помощника наглядно реализуется за счет построения аппроксимированных изоповерхностей на компьютерных устройствах отображения дисплейного типа. Задача вероятностного прогнозирования движения морского потребителя практически обеспечивается посредством математической процедуры сплайн-экстраполяции. Базовой основой автоматизированного плавания может служить электронная картографическая навигационная информационная система от любого сертифицированного производителя.

В качестве доказательного примера применимости сплайновой технологии к исследуемой проблеме следует отметить алгоритм высокоточной морской навигации по геофизическим полям [6] с масштабированным восстановлением виртуальных карт для эталонного сравнения с фактическими измерениями на основе метода интервальной B -сплайновой аппроксимации [7], [8] или билинейной интерполяции [9]. Метод квадратичных B -сплайнов позволяет получать достаточно приемлемую точность текущих координат судна с помощью теории гарантированного оценивания при одновременно ограниченных требованиях к объему памяти бортового компьютера [8]. Основной проблемой при построении следящих навигационных систем является синтез эффективных алгоритмов хранения и воспроизведения геофизических данных в цифровой форме. Оптимальные результаты могут быть достигнуты при восстановлении изоповерхностей в варианте практического их применения с помощью кубических B -сплайнов, обеспечивающих как минимум четырехкратное сжатие массивов данных по сравнению с традиционными методами [10]. Обработка информации на основе базисных сплайнов позволяет корректно определять неслучайные ошибки алгоритмической модели состояния, а также учитывать неполноту и неопределенность исходной информации. Измерительная ошибка датчиков следящих систем различной физической природы гарантированно обнаруживается в виде геометрической вейвлетовой флуктуации на основе апробированного метода визуализации сплайновой изоповерхности за счет нарушения «гладкости» и условий «склейки» лоскутных патчей синтезированного электронного профиля изоповерхности [11]. Под сплайновой «гладкостью» подразумевается успешность функциональной дифференцируемости [12].

При сплайновом подходе к изолинейной навигации устраняется множество современных проблем кибернетической безопасности с автоматической ликвидацией возможности потери ориентировки судна при подавлении спутникового сигнала, необходимости резервирования оборудования

GPS для обеспечения устойчивой работы, устранения угрозы спуфинга или непосредственно возможности прямой хакерской атаки на автоматизированную систему судовождения, а также стороннего враждебного контроля судна [13]. Корреляционно-экстремальная навигация в интеграции со сплайновой технологией может быть эффективно использована в непредсказуемых условиях современного мореплавания в зонах неустойчивого приема сигналов спутниковых систем при различных форс-мажорных обстоятельствах и природных катаклизмах. Компьютерная детализация программированного движения судна предусматривает возможность интеллектуальной помощи штурману в стратегии независимого определения места судна при любых обстоятельствах плавания.

При практической реализации концепции навигации по естественным геофизическим полям с использованием методов сплайн-функций сформулированы следующие задачи:

1. Математическая адаптация ретроспективного алгоритма *двумерной B-сплайновой аппроксимации* с целью получения реалистичного детального профиля геофизического поля.
2. Применение оптимального критерия по методу наименьших квадратов для учета рассогласования синтезируемой геофизической топографии с дискретной измерительной информацией датчиков поля при их сопоставлении.
3. Трехмерное визуализированное представление цифровой модели фрагмента геофизического поля на основе базисных финитных сплайнов.
4. Разработка прикладной паскаль-программы применительно к задаче компьютерной визуализации геофизического ландшафта.
5. Рассмотрение теоретической возможности практического применения теории сплайн-функций к приближению новейших изолиний для организации изолинейного плавания, внедрение которых в навигацию будущего связано с прогрессивным развитием технических средств судовождения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Математическое синтезирование фрагмента геофизического поля реализуется на основе апробированной гибридной сплайновой модели [10]:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) B_{j,m}(\lambda_r) C_{i,j} &= F_{q,r} \text{ при } q=1, \dots, z_1; r=1, \dots, z_2; \\ \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) L_{j,r}(\lambda_r) C_{i,j} &= 0 \text{ при } q=1, \dots, z_1; r=1, \dots, h; \\ \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{j,m}(\lambda_r) L_{i,q}(\varphi_q) C_{i,j} &= 0 \text{ при } q=1, \dots, g; r=1, \dots, z_2; \\ \frac{1}{p} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} L_{i,q}(\varphi_q) L_{j,r}(\lambda_r) C_{i,j} &= 0 \text{ при } q=1, \dots, g; r=1, \dots, h, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где k, m — степени B -сплайна по координатным осям φ и λ соответственно;

g, h — максимальное количество узлов по координатным осям φ и λ соответственно;

$B_{i,k}(\varphi), B_{j,m}(\lambda)$ — «шапочные» функции базисного сплайна;

$C_{i,j}$ — матрица искомым скалярных коэффициентов;

p — сглаживающий весовой коэффициент;

z_1, z_2 — максимальное число дискретных измерений датчиками геофизического поля по координатным осям φ и λ соответственно;

$L_{i,q}, L_{j,r}$ — ассоциированные множители сплайнов лагранжевого типа;

q, r — фактическое количество узлов на координатных осях φ и λ с учетом граничных условий.

Как следует из анализа системы (1), степенью сплайна по координатным осям можно варьировать, но для универсального решения задачи корреляционно-экстремальной навигации оптимальным является применение бикубических сплайнов ($k = 3, m = 3$). Для эффективности сплайновой технологии необходимо учитывать тот факт, что увеличение степени сплайна не всегда ведет к улучшению аппроксимации [14]. Классическим доказательством ухудшения восстановления формы алгебраической кривой является известный *пример Рунге*, демонстрирующий ситуацию возникновения неожиданного осциллирующего всплеска функциональности при необоснованном выборе кусочного многочлена высокой степени в качестве аппроксиматора [15]. Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что вычислительная устойчивость расчетных процедур на основе сплайнов третьей степени может быть искусственно улучшена при условии применения оптимизационных схем организации узлов аппроксимации [16] или введением дополнительных узлов при так называемой *процедуре загущения сетки* [17]. Причем дополнительные узлы эффективнее вводить одновременно слева и справа на сеточных отрезках для обеспечения лучших условий сплайнового приближения изолинии [18]. При любом сценарии выбора аппроксиманта кубические сплайны являются основным и наиболее универсальным средством приближения навигационных функций в силу их хороших аппроксимационных свойств в сочетании с относительно простой компьютерной реализацией [15].

Алгоритмическое решение гибридной модели аппроксимации (1) выполняется *модифицированным методом наименьших квадратов* для сплайн-аппроксимации любой навигационной изоповерхности [19]. Согласованность смоделированных и измеренных значений профиля геофизического поля можно определить при помощи критерия оптимизации [5]:

$$\sum_{q=1}^g \sum_{r=1}^h \left[F_{q,r} - \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) B_{j,m}(\lambda_r) C_{i,j} \right]^2 \leq S, \quad (2)$$

где S — эмпирический параметр сглаживания вейвлетовых особенностей геофизического поля.

Интуитивное определение пользователем в интерактивном режиме числовой реализации S из выражения (2) является эмпирическим компромиссом между точностью синтеза геометрии изолинейного рельефа и правдоподобием трехмерной визуализации фрагментов геофизического поля по принципу *виртуального ключа*, удачно повернув который можно получить удовлетворительную аппроксимацию измерительных данных.

Результаты (Results)

Рассмотрим технологию применения сплайн-функций для навигации по геофизическим полям на конкретном примере восстановления карты аномального поля силы тяжести в заливе Петра Великого по данным траекторных измерений автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) [20]. Географическая карта остаточных аномалий силы тяжести получена в лаборатории гравиметрии Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН. Для исследования был выбран район с географическими координатами по широте $42,0^\circ \text{ N} \dots 42,6^\circ \text{ N}$ и долготе $131,5^\circ \text{ E} \dots 132,5^\circ \text{ E}$ в соответствии с выделенным на рис. 1 фрагментом с глубинами моря 50–3000 м, в нижней части которого расположен потухший вулкан, отмеченный ярко-желтым цветом. Существующая изменчивость рельефа дна обследуемого морского района фиксируется переменным спектром градиентов аномалий силы тяжести. В обозначенной на рис. 1 области Японского моря был изучен участок геофизического поля размером 50×40 км [20].

Суть эксперимента заключалась в том, что на борту АНПА находится эталонная карта геофизического поля, заданная в виде матрицы интенсивностей поля в узлах равномерной регулярной сетки. Гравиметр на борту роботизированного движительного комплекса фиксирует фрагмент поля в виде последовательности отсчетов уровня поля с постоянным шагом вдоль траектории каждого параллельного галса. Под результатами измерений исследуемого фрагмента поля понимается набор дискретных отсчетов в таких единицах измерений, как мГал ($1 \text{ Гал} = 1 \text{ см/с}^2$), представленный

на вертикальной шкале в правой части рис. 1 с дополнительной градацией по шкале в цветовой гамме от минимального темно-синего до максимального ярко-желтого.

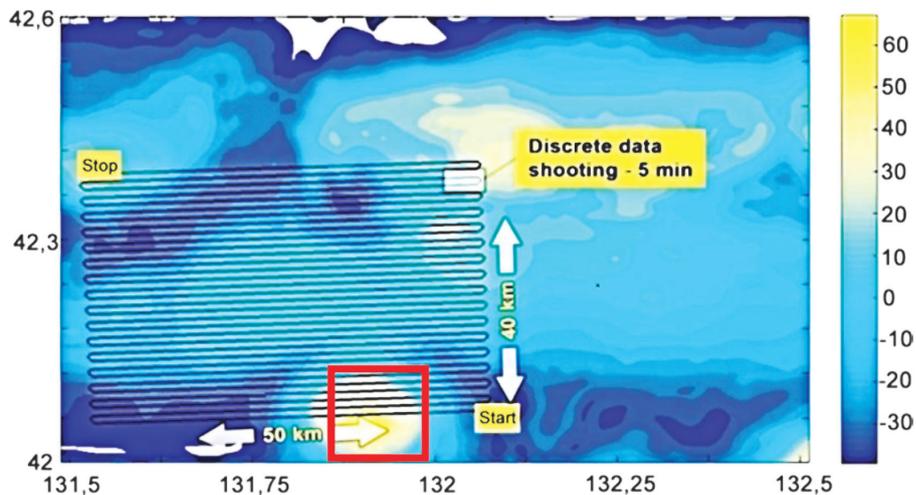


Рис. 1. Карта поля аномалий силы тяжести в заливе Петра Великого

Имитационно-модельный сценарий формирования комплексных данных натурального эксперимента реализован путем покрытия локального поля сетью поисковых траекторий измерений на основе типового способа параллельных галсов. Для согласованности инерциальной навигации выполняется привязка по координатам относительно стартовой точки обследования района. При этом за счет погрешностей автономной навигации измеренная форма трассы АНПА отличается от эталонной траектории. Фактическая траектория подводного робота представляется в виде отрезков, каждый из которых минимизирует длину эквидистанты по отношению к сопряженным элементам в отдельной пройденной точке траектории [21]. Задача управления движением подводного аппарата сводится к стабилизации позиционных и угловых рассогласований, сформированных с помощью нескольких дальномеров. Алгоритм управления одновременно стабилизирует глубину и расстояние до дна, разрабатывает программу курса и корректирует ее с учетом возможных навигационных погрешностей [22].

Метод коррекции навигационных параметров состоит в том, чтобы методом привязки измеренного фрагмента поля к эталонной карте постоянно уточнять географические координаты маршрутизации движения АНПА. Привязка измерений к эталонной карте производится методом поиска глобального экстремума функционала сравнения измеренного фрагмента и эталонной карты, используемых для ориентирования движения мобильного объекта. На основе полученных экспериментальных данных графически определены контуры изолиний с заданными цифровыми значениями уровня поля силы тяжести.

Характеристики информативности аномального поля в виде рельефной карты 2D-формата на рис. 2 могут служить в качестве показателей, определяющих возможность использования данных гравиметрических измерений с борта АНПА для высокоточного определения мгновенного местоположения подводного робота на основе рассмотренного метода корреляционно-экстремальной навигации [20]. На правой вертикальной шкале рис. 2 указаны значения уровня поля в мГал с дополнительной детализацией в оттенках серого цвета по аналогии с приведенной на рис. 1. В целом прямоугольный фрагмент эталонного аномального поля реализован в системе географических координат. Широта и долгота в прямоугольной системе координат позиционируются с точностью до десятых долей градуса. Высокая эффективность автоматизированной площадной съемки локального гравитационного поля обеспечивается путем покрытия исследуемого подводного ландшафта планомерной сетью траекторий параллельных галсов с измеренными параметрами, необходимыми для последующего картографирования аномального поля.

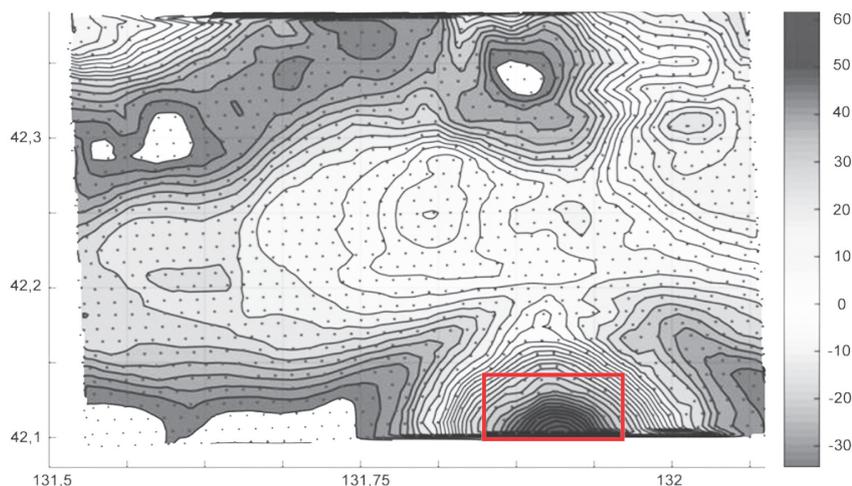


Рис. 2. Восстановленная контурная карта аномалий силы тяжести района Японского моря

В качестве получения новых результатов эксперимента выполнено компьютерное моделирование гравиметрических процедур на основе гибридного алгоритма двумерной *B*-сплайновой аппроксимации как эталонного геофизического поля для согласования с данными вычислительных исследований. Для доказательства работоспособности предлагаемого подхода реализовано синтезирование фрагмента поля аномалий силы тяжести на основе полученных цифровых значений на рис. 1 при их синхронной корректуре по рис. 2 для создания высокоточного эталона корреляционно-экстремальной навигации, представленного на рис. 3 в трехмерном измерении.

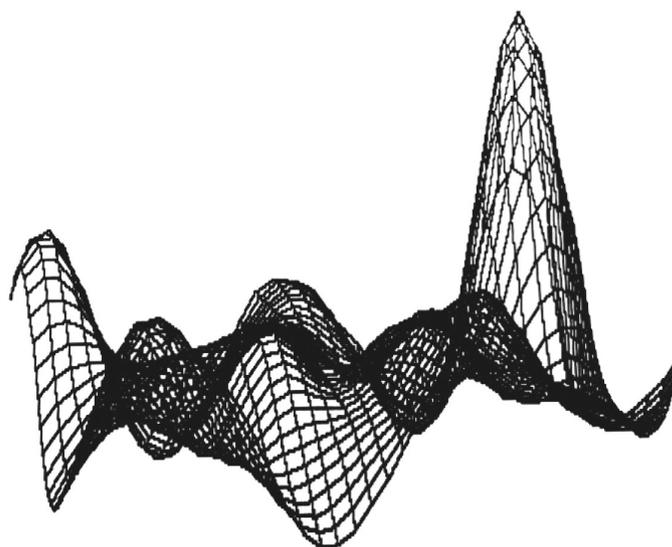


Рис. 3. Трехмерная визуализация сплайнового синтезирования аномального поля силы тяжести залива Петра Великого

Фактически рис. 3 является трехмерным представлением плоскостных карт, демонстрируемых на рис. 1 и 2. В качестве цифровой сеточной основы сплайновой технологии использовалась матрица размером 6×10 в соответствии с координатной оцифровкой по рис. 1 и 2 при общем числе задействованных шестидесяти реперных точек. По широте задействовались шесть узловых точек, а по долготе — десять точек. Максимальный флуктуационный всплеск навигационной изоповерхности соответствует местоположению потухшего вулкана, обозначенного ярко-желтым пятном на рис. 1 или темно-серым контуром в нижней правой части рис. 2. Подводный вулкан отмечен

на рис. 1 и 2 красным прямоугольником с целью его однозначной идентификации для сравнительного анализа с рис. 3. Эмпирический параметр S сглаживания особенностей геофизического поля региона Японского моря в вычислительном эксперименте задавался в интерактивном режиме равным 0,4 в соответствии с формулой (2). Необходимо отметить, что если $S = 0,0$, то решается исключительно задача сплайн-интерполяции.

Популярность базисных сплайнов обусловлена экспериментально доказанной высокой точностью вычислительных операций до шестого порядка, т. е. до шестого знака после запятой в аппроксимационном расчете любого навигационного параметра [5]. При использовании в качестве эталона сплайновой визуализации аномального поля силы тяжести как варианта виртуального геофизического поля становится эффективной практическая реализация высокоточной корреляционно-экстремальной навигации при организации плавания на основе соблюдения принципа знания геометрии поля в виде трехмерной карты сплайнового профиля с ориентированием движения судна в соответствии с «гладкостью» по каждой электронной изолинии. Даже при определенной идеализации преимущество навигации по геофизическим полям Мирового океана заключается в абсолютной автономности морского перехода при полном абстрагировании судовождения от использования сигналов любых спутниковых систем. Развитие технологий производства телеуправляемых подводных аппаратов с возобновляемыми источниками энергии может позволить реализовать масштабную автоматизированную сеть океанографических измерений и тем самым практически осуществить концепцию корреляционно-экстремальной навигации на морских просторах в полном объеме перспективных возможностей [23].

Обсуждение (Discussion)

С навигационной точки зрения использование резервных следящих систем, работающих в автономном режиме без привлечения внешних средств, по сути организует изолинейное плавание. Переход судна по любой траектории фактически выполняется по изолинии, что принципиально согласуется с концепцией навигационного пространства [24]. В соответствии с показаниями гирокопического или магнитного компаса, в сущности реализующего условие постоянства истинного курса, маршруты судна по путевым морским картам прокладываются по такой изолинии, как *локсодромия*, а океанские плавания обычно совершаются по другой изолинии — *ортодромии*.

Роль локсодромии является особенной в сравнении с другими изолиниями ввиду наличия преимуществ локсодромического плавания. Во-первых, необходимо учитывать главенствующую роль курсоуказателя, обеспечивающего ориентацию судна при плавании по локсодромии. Во-вторых, имеет место факт прямолинейности изображения локсодромии как линии пути на карте в меркаторской проекции, что является неоспоримым преимуществом при морском переходе. В связи с учетом двух указанных ранее обстоятельств локсодромия как изолиния постоянного курса в соотношении с изображением в виде прямой линии на меркаторской проекции представляет самостоятельный научный интерес. Дополнительным преимуществом изолинейного плавания на основе сплайновых технологий является быстрое действие вычислительных реализаций. При применении альтернативных алгоритмов в рамках байесовского подхода и калмановской фильтрации возникают трудности в процессе решения задачи корреляционно-экстремальной навигации в реальном времени [25]. При этом сплайновые аппроксимации действительно являются высокоскоростным средством решения различных навигационных задач, так как формат аппроксимированной функции определяет только объем памяти судового компьютера с предварительно рассчитанными сплайновыми коэффициентами и сеточными координатами для вычисления в масштабе реального времени значения навигационной функции по номеру сеточного интервала [10].

При изолинейном плавании математическая основа такой процедуры, как обсервация, эффективно реализуется на основе итерационного нахождения точки пересечения сплайновых изолиний, включая искаженные корректирующими поправками сложные изолинии [26], [27]. При апробировании сплайнового подхода с использованием соответствующего программного обеспечения бортового компьютера в эргономическом варианте в структуре навигационного автоматизированного ком-

плекса будущего измеряемые параметры изолинии по известным формулам могут быть типовым способом пересчитаны в географические координаты с целью постоянного позиционирования любого подвижного объекта в автономном режиме на специализированных электронных средствах мониторинга [28]. Изолинейность аналогично используется в интеллектуальной авионике для программирования автономного полета летательного аппарата [29].

Существующие алгоритмы обработки навигационной информации полностью опираются на априорные сведения, которые могут не соответствовать локальной ситуации измерений [30]. Представляется целесообразным сделать предположение о гипотетической возможности независимого контроля изолинейного перемещения судна при наличии на борту специальной аппаратуры, способной постоянно фиксировать основные значения параметров навигационной изолинии подобных «кривизне» и «кручению» [31]. Дополнительная мгновенная фиксация градиента приобретает особенно важное практическое значение. Обозначенные навигационные параметры в общепринятом в навигации смысле полностью характеризуют внутреннюю геометрию изолинии плавания судна. В ситуации применения сплайновой изолинии добавляется дополнительный параметр внутренней геометрии аппроксимированной изолинии — сплайновая «гладкость» [10] при фактической градиентной веерной ориентации. Параметрическое представление навигационной изолинии может составить фундаментальную основу для конструирования технического устройства с целью организации программированного изолинейного плавания судна при условии восстановления профиля характерной изолинии *методом сплайн-аппроксимации*. Важное практическое свойство вытекает из кусочного характера сплайна, который восстанавливает навигационную функцию конкретным сегментным полиномом в соответствии с условием «гладкости» на каждом участке разбиения аргумента.

Универсальность сплайн-функций обладает парадигмой прогнозирования в смысле возможности в перспективном аспекте организации программируемого плавания не только по изученным изолиниям, но и по новейшим изолиниям, которые могут появиться в будущем при технологических инновациях судовождения. Предлагаемый подход может быть использован как математическое обеспечение будущей автоматизированной системы судовождения с искусственным интеллектом в рамках концепции безэкипажного судовождения в стратегическом соответствии с проектом e-Navigation.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование возможности синтеза и компьютерной визуализации фрагмента геофизического поля на методах сплайн-функций позволяет сделать следующие выводы:

1. Математический алгоритм двумерной B -сплайновой аппроксимации адаптирован под моделирование геофизического профиля.
2. В алгоритме реализован целевой квадратичный функционал, учитывающий рассогласование моделируемой геофизической поверхности с измерительными данными эксперимента.
3. Выполнено трехмерное визуализированное представление цифровой модели фрагмента геофизического поля на основе базисных финитных сплайнов.
4. Разработаны прикладные программы, объединенные пользовательским интерфейсом в турбо-паскалевской компьютерной «оболочке» под задачу синтеза и визуализации фрагментов геофизических профилей.
5. Сделан прогноз о возможности практического применения теории сплайн-функций к организации программируемого плавания по новейшим изолиниям, которые могут появиться в будущем при технологических инновациях судовождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тхоренко М. Ю. Синтез и анализ алгоритмов навигации по измерениям магнитного поля: дис. ... канд. техн. наук / М. Ю. Тхоренко. — М., 2019. — 107 с.

2. Дунаевская К. В. Исследование метода вычисления текущей характеристики точности в задаче навигации по картам геофизических полей / К. В. Дунаевская, Л. В. Киселев, В. Б. Костоусов // Гироскопия и навигация. — 2021. — Т. 29. — № 1 (112). — С. 52–69. DOI: 10.17285/0869-7035.0056.

3. Karshakov E. V. Navigation in the field of a point magnetic dipole from measurements of the field gradient parameters / E. V. Karshakov, A. K. Volkovitskii, B. V. Pavlov // 2018 14th International Conference "Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems" (Pyatnitskiy's Conference)(STAB). — IEEE, 2018. — Pp. 1–3. DOI: 10.1109/STAB.2018.8408362.

4. Volkovitskii A. K. Application of Magnetic Gradiometers to Control Magnetic Field of Moving Object / A. K. Volkovitskii, E. V. Karshakov, M. Yu. Tkhorenko, B. V. Pavlov // Automation and Remote Control. — 2020. — Vol. 81. — Is. 2. — Pp. 333–339. DOI: 10.1134/S0005117920020113.

5. Ююкин И. В. Применение метода сплайн-функций при компьютерной визуализации подводного рельефа / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79.

6. Stepanov O. A. Navigation informativity of geophysical fields in map-aided navigation / O. A. Stepanov, A. S. Nosov, A. V. Toropov // 2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). — IEEE, 2017. — Pp. 1–19. DOI: 10.1109/InertialSensors.2017.8171509.

7. Дешнер А. И. Анализ и синтез алгоритмов высокоточной морской навигации по геофизическим полям: дис. ... канд. техн. наук / А. И. Дешнер. — Владивосток, 2004. — 122 с.

8. Розенбаум А. Н. Сплайн-интерполяция в минимаксной фильтрации для решения задач навигации по геофизическим полям Мирового океана / А. Н. Розенбаум, А. И. Дешнер // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2009. — № 2. — С. 65–72.

9. Дунаевская К. В. Оценка ошибок корреляционно-экстремальной навигации по карте аномалий силы тяжести на основе траекторных измерений с борта автономного подводного робота / К. В. Дунаевская, Л. В. Киселев, В. Б. Костоусов, А. Е. Тарханов // Подводные исследования и робототехника. — 2020. — № 1 (31). — С. 13–20. DOI: 10.37102/24094609.2020.31.1.002.

10. Ююкин И. В. Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.

11. Ююкин И. В. Поиск ошибок в базе навигационных данных методом визуализации сплайновой изоповерхности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 481–491. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-481-491.

12. Dmitriev V. I. The Regularized Spline (R-Spline) Method for Function Approximation / V. I. Dmitriev, J. G. Ingtem // Computational Mathematics and Modeling. — 2019. — Vol. 30. — Is. 3. — Pp. 198–206. DOI: 10.1007/s10598-019-09447-w.

13. Ююкин И. В. Навигационное использование e-Lozan в модификации с методом сплайн-функций / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.

14. Ebrahimi A. A composite iterative procedure with fast convergence rate for the progressive-iteration approximation of curves / A. Ebrahimi, G. B. Loghmani // Journal of Computational and Applied Mathematics. — 2019. — Vol. 359. — Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.cam.2019.03.025.

15. Bogdanov V. V. Shape-Preservation Conditions for Cubic Spline Interpolation / V. V. Bogdanov, Y. S. Volkov // Siberian Advances in Mathematics. — 2019. — Vol. 29. — Is. 4. — Pp. 231–262. DOI: 10.3103/S1055134419040011.

16. Zhang Y. B-Spline Surface Fitting with Knot Position Optimization / Y. Zhang, J. Cao, Z. Chen, X. Li, X. M. Zeng // Computers and Graphics. — 2016. — Vol. 58. — Pp. 73–83. DOI: 10.1016/j.cag.2016.05010.

17. Bogdanov V. V. Near-optimal tension parameters in convexity preserving interpolation by generalized cubic splines / V. V. Bogdanov, Y. S. Volkov // Numerical Algorithms. — 2021. — Vol. 86. — Is. 2. — Pp. 833–861. DOI: 10.1007/s11075-020-00914-9.

18. Volkov Y. S. De Boor-Fix functionals and Hermite boundary conditions in the polynomial spline interpolation problem / Y. S. Volkov // European Journal of Mathematics. — 2021. — Vol. 7. — Is. 1. — Pp. 396–403. DOI: 10.1007/s40879-020-00406-z.

19. Ююкин И. В. Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота

имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.

20. Kiselev L. V. Computational Models of Trajectory Investigation of Marine Geophysical Fields and Its Implementation for Solving Problems of Map-Aided Navigation / L. V. Kiselev, V. B. Kostousov, A. V. Medvedev, A. E. Tarkhanov, K. V. Dunaevskaya // *Advanced in Systems Science and Applications*. — 2020. — Vol. 20. — № 4. — Pp. 45–59. DOI: 10.25728/assa2020.20.4.972.

21. Kiselev L. V. Selected Features of Autonomous Underwater Robot Dynamics under Near-Bottom Equidistant Motion Control / L. V. Kiselev, A. V. Medvedev // *Gyroskopy and Navigation*. — 2019. — Vol. 10. — Is. 2. — Pp. 90–98. DOI: 10.1134/S2075108719020044.

22. Medvedev A. Dynamic models for trajectory survey and mapping of local physical fields of the ocean with autonomus underwater vehicle / A. Medvedev, L. Kiselev, A. Tolstonogov // *2017 IEEE Underwater Technology (UT)*. — IEEE, 2017. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/UT.2017.7890327.

23. Kiselev L. V. Autonomous underwater robot as an ideal platform for marine gravity surveys / L. V. Kiselev, A. V. Medvedev, V. B. Kostousov, A. E. Tarkhanov // *2017 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. — IEEE, 2017. — Pp. 605–608. DOI: 10.23919/ICINS.2017.7995685.

24. Ююкин И. В. Аппроксимация геоида методами сплайн-функций / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.

25. Stepanov O. A. A Map-Aided Navigation Algorithm without Preprocessing of Field Measurements / O. A. Stepanov, A. S. Nosov // *Gyroskopy and Navigation*. — 2020. — Vol. 11. — Is. 2. — Pp. 162–175. DOI: 10.1134/S207510872002008X.

26. Ююкин И. В. Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.

27. Ююкин И. В. Синтез кубическими сплайнами искаженной изолинии в аспекте использования дифференциального режима спутниковой навигации / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 341–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-341-358.

28. Козис Д. В. Построение динамических моделей функционирования комплекса пилатажно-навигационного оборудования летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Козис. — СПб., 2006. — 152 с.

29. Karshakov E. V. Aeromagnetic Gradiometry and Its Application to Navigation / E. V. Karshakov, M. Y. Tkhorenko, B. V. Pavlov // *Automation and Remote Control*. — 2018. — Vol. 79. — Is. 5. — Pp. 897–910. DOI: 10.1134/S0005117918050107.

30. Ююкин И. В. Интерполяция навигационной функции сплайном лагранжева типа / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.

31. Вульфович Б. А. Основы общей теории навигационных изолиний: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Б. А. Вульфович. — Л., 1975. — 43 с.

REFERENCES

1. Tkhorenko, Maksim Yu. *Sintez i analiz algoritmov navigatsii po izmereniyam magnitnogo polya*. PhD Diss. M., 2019.

2. Dunaevskaya, K. V., L. V. Kiselev, and V. B. Kostousov. “Study of a method for calculating the current accuracy in map-aided navigation problem.” *Gyroskopy and Navigation* 29.1(112) (2021): 52–69. DOI: 10.17285/0869-7035.0056.

3. Karshakov, E. V., A. K. Volkovitsky, and B. V. Pavlov. “Navigation in the field of a point magnetic dipole from measurements of the field gradient parameters.” *2018 14th International Conference “Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems” (Pyatnitskiy’s Conference)(STAB)*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/STAB.2018.8408362.

4. Volkovitskii, Andrey K., Evgeniy V. Karshakov, Maksim Yu. Tkhorenko, and Boris V. Pavlov. “Application of Magnetic Gradiometers to Control Magnetic Field of Moving Object.” *Automation and Remote Control* 81.2 (2020): 333–339. DOI: 10.1134/S0005117920020113.

5. Yuyukin, Igor V. "Application of the spline-functions method in computer visualization of underwater relief." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79.
6. Stepanov, Oleg A., Alexey S. Nosov, and Anton B. Toropov. "Navigation informativity of geophysical fields in map-aided navigation." *2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/InertialSensors.2017.8171509.
7. Dешнер, Andrey I. *Analiz i sintez algoritmov vysokotochnoy morskoy navigatsii po geofizicheskim polyam*. PhD Diss. Vladivostok, 2004.
8. Rozenbaum, Anatoly N., and Andrey I. Dешнер. "Spline interpolation in minimax filtration for solution navigation tasks of geophysical fields of the world ocean." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2009): 65–72.
9. Dynaevskaya, K. V., L. V. Kiselev, V. B. Kostousov, and A. E. Tarhanov. "Accuracy evaluation of the correlation-extreme navigation system according to a local gravity map based on trajectory measurements made by on autonomous underwater vehicle." *Underwater research and robotics* 1(31) (2020): 13–20. DOI: 10.37102/24094609.2020.31.1.002.
10. Yuyukin, Igor V. "Optimization of navigational isosurface simulation by the methods of basic finite splines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
11. Yuyukin, Igor V. "Search for errors in the base of navigation data by the method of spline isosurface visualization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 481–491. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-481-491.
12. Dmitriev, Vladimir I., and Jennie G. Ingtem. "The Regularized Spline (R-Spline) Method for Function Approximation." *Computational Mathematics and Modeling* 30.3 (2019): 198–206. DOI: 10.1007/s10598-019-09447-w.
13. Yuyukin, Igor V. "Navigational use of e-Loran in modification with spline functions method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.
14. Ebrahimi, Alireza, and Ghasem Barid Loghmani. "A composite iterative procedure with fast convergence rate for the progressive-iteration approximation of curves." *Journal of Computational and Applied Mathematics* 359 (2019): 1–15. DOI: 10.1016/j.cam.2019.03.025.
15. Bogdanov, Vladimir Vasil'evich, and Yuriy Stepanovich Volkov. "Shape-Preservation Conditions for Cubic Spline Interpolation." *Siberian Advances in Mathematics* 29.4 (2019): 231–262. DOI: 10.3103/S1055134419040011.
16. Zhang, Yuhua, Juan Cao, Zhonggui Chen, Xin Li, and Xiao-Ming Zeng. "B-Spline Surface Fitting with Knot Position Optimization." *Computers and Graphics* 58 (2016): 73–83. DOI: 10.1016/j.cag.2016.05010.
17. Bogdanov, Vladimir V., and Yuriy S. Volkov. "Near-optimal tension parameters in convexity preserving interpolation by generalized cubic splines." *Numerical Algorithms* 68.2 (2021): 833–861. DOI: 10.1007/s11075-020-00914-9.
18. Volkov, Yuriy S. "De Boor-Fix functionals and Hermite boundary conditions in the polynomial spline interpolation problem." *European Journal of Mathematics* 7.1 (2021): 396–403. DOI: 10.1007/s40879-020-00406-z.
19. Yuyukin, Igor V. "Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
20. Kiselev, Lev V., Victor B. Kostousov, Andrei V. Medvedev, Alexander E. Tarkhanov, and Kristina V. Dynaevskaya. "Computational Models of Trajectory Investigation of Marine Geophysical Fields and Its Implementation for Solving Problems of Map-Aided Navigation." *Advanced in Systems Science and Applications* 20.4 (2020): 45–59. DOI: 10.25728/assa2020.20.4.972.
21. Kiselev, Lev V., and Andrei V. Medvedev. "Selected Features of Autonomous Underwater Robot Dynamics under Near-Bottom Equidistant Motion Control." *Gyroskopy and Navigation* 10.2 (2019): 90–98. DOI: 10.1134/S2075108719020044.
22. Medvedev, Andrei, Lev Kiselev, and Anton Tolstonogov. "Dynamic models for trajectory survey and mapping of local physical fields of the ocean with autonomous underwater vehicle." *2017 IEEE Underwater Technology (UT)*. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/UT.2017.7890327.
23. Kiselev, Lev V., Andrei V. Medvedev, Victor B. Kostousov, and Alexander E. Tarkhanov. "Autonomous underwater robot as an ideal platform for marine gravity surveys." *2017 24th Saint Petersburg International*

Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). IEEE, 2017. 605–608. DOI: 10.23919/ICINS.2017.7995685.

24. Yuyukin, Igor V. “Geoid approximation by spline functions methods.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.

25. Stepanov, Oleg A., and Alexey S. Nosov. “A Map-Aided Navigation Algorithm without Preprocessing of Field Measurements.” *Gyroskopy and Navigation* 11.2 (2020): 162–175. DOI: 10.1134/S207510872002008X.

26. Yuyukin, Igor V. “Spline interpolation of navigational isolines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.

27. Yuyukin, Igor V. “Cubic splines synthesis of a distorted isoline in the aspect of using differential mode of satellite navigation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 341–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-341-358.

28. Kozis, Dmitriy V. Postroenie dinamicheskikh modeliy funktsionirovaniya kompleksa pilotazhno-navigatsionnogo oborudovaniya letatel'nykh apparatov. PhD Diss. SPb., 2006.

29. Karshakov, Evgeny V., Maksim Yu. Tkhorenko, and Boris V. Pavlov. “Aeromagnetic Gradiometry and Its Application to Navigation.” *Automation and Remote Control* 79.5 (2018): 897–910. DOI: 10.1134/S0005117918050107.

30. Yuyukin, Igor V. “Interpolation of navigational function by lagrange type spline.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.

31. Vulfovich, Boris A. Osnovy obshey teorii navigatsionnykh izolinii. Abstract of Dr. Diss. L., 1975.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ююкин Игорь Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuyukin, Igor V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 3 июня 2021 г.
Received: June 3, 2021.

BENCHMARKING USING FOR THE MARINE TERMINAL ACTIVITY EVALUATION

A. M. Sampiev

LENMORNIIPROEKT, JSC, St. Petersburg, Russian Federation

The evaluation of the marine terminals activity is carried out at various stages of the project implementation: from the stage of pre-design work, development of project documentation and throughout the entire life of the facilities. Any sea terminal is a complex technical system consisting of buildings, structures, technological equipment and engineering networks. Each of the objects, systems and subsystems of the terminal has its own performance criteria. However, for an integral evaluation of the terminal performance, it makes sense to perform analysis to a certain degree of detail, cutting off unnecessary and uninformative indicators. A brief literary review of the world and domestic practice of using benchmarking in the activity of a seaport infrastructure is provided in the paper, the regulatory requirements for the technical and economic indicators of capital construction facilities at the design documentation development stage are specified. The author has proposed the gradation of performance indicators: technical, financial, economic, environmental and social. As an example, the differentiation by the turnover rates of tank reservoir parks for oil terminals of the Russian Federation is showed in the paper, the design values of throughput and the actual cargo turnover of oil terminals of the Russian Federation are compared. A comparison of indicators for some coal terminals — values of the performance of berth line front, performance of the berth and performance of storage areas is also made. The set of performance indicators may differ from each other, depending on the specifics of the handled cargoes, their geographic location, cargo turnover, and the historical development of sea terminals.

Keywords: marine terminal, benchmarking, key performance indicators, activity, key technical and economic indicators, work efficiency, turnover ratio, oil terminal, coal terminal.

For citation:

Sampiev, Adam M. "Benchmarking using for the marine terminal activity evaluation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 518–529. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-518-529.

УДК 656.615

ПРИМЕНЕНИЕ БЕНЧМАРКИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАБОТЫ МОРСКИХ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ

А. М. Сампиев

АО «ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является оценка работы морских перегрузочных комплексов, выполняемая на различных стадиях реализации проекта: от предпроектных работ, разработки проектной документации и далее в течение всего периода эксплуатации объектов. Отмечается, что любой морской перегрузочный комплекс представляет собой сложную техническую систему, состоящую из зданий, сооружений, технологического оборудования и инженерных сетей. Каждый из объектов, систем и подсистем морского перегрузочного комплекса имеет свои критерии оценки. Однако для интегральной оценки работы терминала следует выполнять его анализ до определенной степени детализации, отсекая лишние и малоинформативные показатели. В статье выполнен краткий обзор мировой и отечественной практики использования бенчмаркинга в работе морской портовой инфраструктуры, указаны нормативные требования к технико-экономическим показателям объектов капитального строительства, предъявляемые на этапе проектирования. Предложена классификация показателей эффективности на технические, финансово-экономические, экологические и социальные. В качестве примеров приведена дифференциация по коэффициентам оборачиваемости резервуарных парков для нефтяных терминалов Российской Федерации, выполнено сравнение проектных значений пропускной способности и фактического грузооборота нефтяных терминалов Российской Федерации. Также выполнено сравнение показателей для некоторых угольных терминалов: значений производительности причального фронта, производительности причала и производи-

тельности складских площадей. Отмечается, что совокупность показателей может отличаться друг от друга в зависимости от специфики перегружаемых грузов, географического положения, грузооборота, исторического развития морских терминалов.

Ключевые слова: морской перегрузочный комплекс, бенчмаркинг, KPI, производительность, эффективность работы, коэффициент оборачиваемости, нефтяной терминал, угольный терминал.

Для цитирования:

Сампиев А. М. Применение бенчмаркинга для оценки работы морских перегрузочных комплексов / А. М. Сампиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 518–529. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-518-529.

Введение (Introduction)

Согласно существующей практике, результаты работы предприятий, в том числе морских перегрузочных комплексов, оцениваются измеримыми критериями, характеризующими их положение в отрасли. Перечень этих показателей никем не регламентирован, они варьируются в зависимости от отрасли народного хозяйства и масштабов предприятия. В качестве обозначения критериев-индикаторов состояния организации наиболее часто используется термин Key Performance Indicators (KPI) — «ключевые показатели эффективности».

Под бенчмаркингом понимается поиск и анализ ключевых показателей, лучших практик и опыта других предприятий для оптимизации деятельности собственной организации. Современные исследования по вопросам формулирования проблемы, внесения терминологической ясности, определения примеров ключевых показателей деятельности для контейнерных терминалов, сравнения расчетно-аналитических методик и статистических методик обработки данных были проведены А. Л. Кузнецовым, А. В. Кириченко и В. Н. Щербаковой-Слюсаренко в работах [1], [2].

В зарубежных исследованиях широко представлены проблемы определения критериев работы морских перегрузочных комплексов. Детальный анализ развития подходов к оценке работы морских терминалов изложен в публикации [3]. Варианты и методики классификации морских терминалов по критериям их работы рассмотрены в источнике [4]. В публикации [5] представлена возможность оценки KPI с применением нечеткой логики и нейронных сетей. В публикации [6] идентифицированы и рекомендованы к использованию показатели, оценивающие деятельность предприятия в части охраны окружающей среды. Анализ формирования стоимости морских перевозок в зависимости от эффективности услуг, оказываемых морскими терминалами, выполнен в работах [7] и [8]. Особенности и стратегии развития морских терминалов на конкретных примерах изложены в работе [9]. Оценка конкурентоспособности на примере средиземноморских терминалов показана в работе [10]. Оценка и причины изменения производительности морских терминалов Израиля приведены в работе [11]. Особенности оценки по критерию географического расположения морских терминалов, расположенных в Арктике, рассмотрены в публикации [12].

Многие исследования выявили тесную корреляцию между высокими результатами работы фирм и наличием у них сложных систем измерения и оценки хозяйственных показателей. В начале 1985 г. в консультационной компании А. Т. Kearny Consultants было выявлено, что у фирм, выполняющих всеобъемлющую и комплексную оценку результатов, общий уровень производительности на 14–22 % выше. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что ведущие фирмы имеют большую приверженность к развитию систем оценки итоговых показателей работы [13]. Таким образом, многочисленные исследования проблемы определения, классификации и анализа критериев оценки работы морских перегрузочных комплексов подтверждают актуальность этой тематики.

Целью настоящей работы является составление совокупности ключевых показателей работы морских терминалов, которые могут служить индикаторами состояния морских терминалов и с помощью которых можно проводить экспресс-анализ оценки инвестиций в создание или модернизацию морских перегрузочных комплексов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Действующие нормативно-правовые документы не предъявляют жестких требований к составу технико-экономических показателей, определяемых при разработке проектной документации объектов капитального строительства. Так, в Постановлении Правительства Российской Федерации № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» указано, что разд. 1 «Пояснительная записка» должен содержать технико-экономические показатели проектируемых объектов капитального строительства. В Приказе Минстроя России от 01.03.2018 № 125 «Об утверждении типовой формы задания на проектирование объекта капитального строительства и требований к его подготовке» (п. 10) приведены «...требования к основным технико-экономическим показателям объекта (площадь, объем, протяженность, количество этажей, производственная мощность, пропускная способность, грузооборот, интенсивность движения и другие показатели)».

Указанный в Приказе Минстроя России от 01.03.2018 № 125 перечень технико-экономических показателей может изменяться в зависимости от проектируемых объектов. Для объектов морского транспорта на этапе подготовки задания на проектирование первоочередными из указанных в данном приказе технико-экономических показателей можно указать следующие: грузооборот, производственную мощность, интенсивность движения. Остальные показатели в целях принятия оптимальных проектных решений могут быть определены в процессе проектирования.

Перечень технико-экономических показателей из Приказа Минстроя России не преследует цели внесения ясности в вопрос об оптимальности принимаемых проектных решений и поэтому не может быть использован в качестве «ключевых показателей эффективности» работы предприятия. При этом необходимо отметить, что корректно определенные ключевые показатели работы морских перегрузочных комплексов позволят решать следующие задачи:

- составлять рейтинги морских перегрузочных комплексов применительно по каждому из показателей;
- служить индикаторами работы предприятий для руководства организаций, акционеров и потенциальных инвесторов;
- вырабатывать стратегию развития предприятий по результатам накопления статистической базы, понимать проблемы и тенденции развития отрасли морского транспорта;
- выстраивать обратную связь между эксплуатационными показателями и значениями, полученными при разработке проектов;
- вносить соответствующие изменения в нормативно-правовую документацию в целях «сближения» нормативных требований, и, как следствие, расчетных проектных показателей, с результатами эксплуатационной деятельности.

При формулировании критериев важно понимать разницу между терминами «интенсивность операции», «эффективность», «производительность ресурса», «мощность ресурса». Данный вопрос подробно рассмотрен в работе [1].

Результаты (Results)

Показатели работы морских перегрузочных комплексов в данной публикации предлагается условно разделить на следующие группы: технические, финансово-экономические, экологические, социальные.

В качестве *технических показателей* морского терминала предлагается использовать следующие:

1. Производительность причального фронта — отношение годового грузооборота морского терминала Q к длине причального фронта L :

$$K_1 = \frac{Q_{\text{гп}}}{L}. \quad (1)$$

2. Производительность причала — отношение годового грузооборота морского терминала Q к количеству причалов N :

$$K_2 = \frac{Q}{N}. \quad (2)$$

3. Среднее время обработки судов — отношение общего времени обработки судов к общему количеству принятых судов:

$$K_3 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}. \quad (3)$$

4. Производительность складских площадей — отношение годового грузооборота морского терминала Q к складским площадям S :

$$K_4 = \frac{Q_{\text{пр}}}{S}. \quad (4)$$

Следует отметить, что для терминалов по перегрузке нефти, нефтепродуктов или сжиженного природного газа показатель K_4 — коэффициент оборачиваемости [14], [15] — определяется как отношение пропускной способности терминала к емкости резервуарного парка $V_{\text{рез}}$:

$$K_{4\text{н}} = \frac{Q}{V_{\text{рез}}}. \quad (5)$$

5. Эффективность грузооборота — отношение среднего значения фактического грузооборота $Q_{\text{ср}}$ к проектному грузообороту $Q_{\text{пр}}$:

$$K_5 = \frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{\text{пр}}}. \quad (6)$$

Здесь $Q_{\text{ср}}$ — среднее значение фактического грузооборота, определяемое как среднее арифметическое:

$Q_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}$, где n — количество лет.

6. Эффективность погрузочно-разгрузочных работ — отношение времени выполнения погрузо-разгрузочных работ к общему времени обработки судна, включая вспомогательные операции: буксировка, швартовка, оформление документов:

$$K_6 = \frac{T_{\text{ПРР}}}{T}. \quad (7)$$

Значения емкостей резервуарных парков, пропускные способности и проектные значения коэффициентов оборачиваемости для отечественных нефтяных терминалов приведены в качестве примера в табл. 1.

Таблица 1

Проектные значения коэффициентов оборачиваемости резервуарных парков нефтяных терминалов РФ

Нефтяные терминалы	Емкости резервуарного парка хранения нефти и нефтепродуктов, тыс. т	Пропускная способность, тыс. т/год	Коэффициент оборачиваемости
Морской порт Приморск	1181,0	89 500	75,78

Таблица 1
(Окончание)

Морской порт Усть-Луга	1 292,9	78 837	60,98
Большой порт Санкт-Петербург	341,1	17 820	52,24
Морской порт Восточный	480	32 000	66,67
Морской порт Туапсе	430,0	27 000	62,79
Морской порт Тамань	635,0	19 900	31,34
Морской порт Калининград	325,5	13 000	39,94
Морской порт Высоцк	460,0	12 500	27,17
Ванино	210,9	3 840	18,21
Владивосток	175,0	3 642	20,81
Мурманск	68,1	2 500	36,71
Советская Гавань	23,0	360	15,65
Дудинка	136,0	50	0,37

Коэффициент оборачиваемости характеризует полноту использования емкости. Чем он больше, тем ниже стоимость перевалки нефтепродуктов через данную нефтебазу (при прочих равных условиях).

На основе данных табл. 1 составлена диаграмма коэффициентов оборачиваемости по нефтяным терминалам РФ (рис. 1) с указанием среднего значения (красная пунктирная линия на рис. 1).

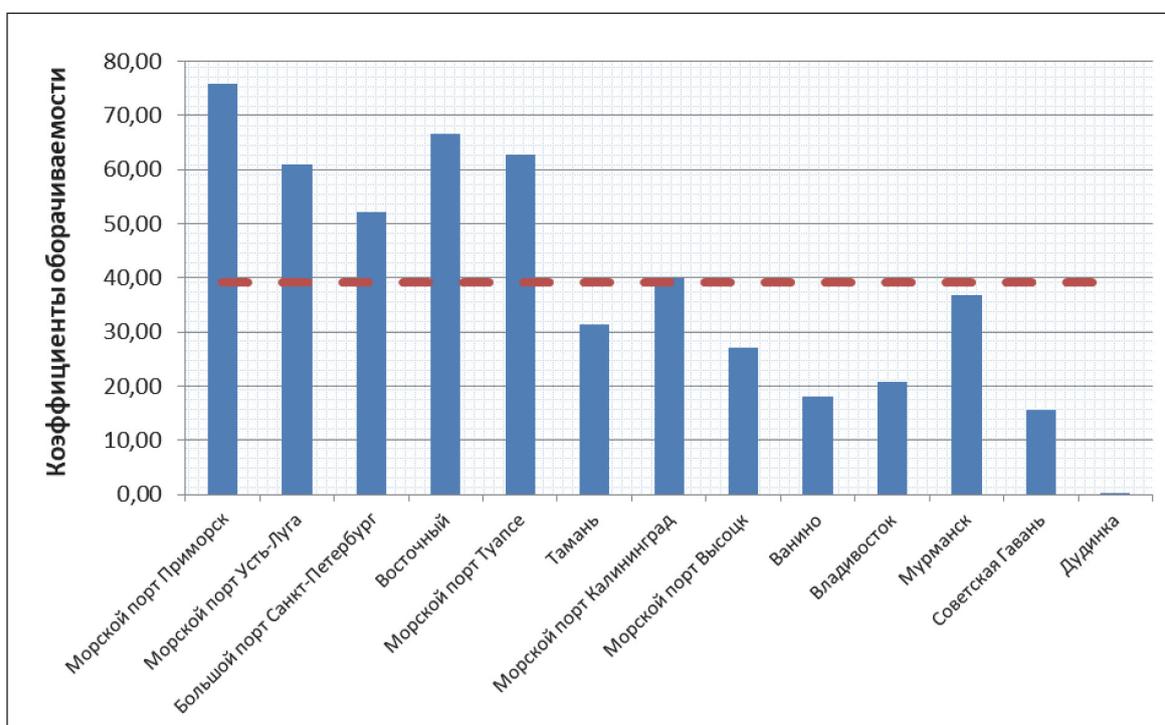


Рис. 1. Диаграмма коэффициентов оборачиваемости резервуарных парков нефтяных терминалов Российской Федерации

Сравнение проектных значений пропускной способности и фактического грузооборота нефтяных терминалов РФ за период 2015–2018 годов показано в табл. 2 и на рис. 2.

**Проектные значения пропускной способности
и фактические значения грузооборота нефтяных терминалов РФ**

Нефтяные терминалы	Проектный показатель пропускной способности, млн т/год	Фактический грузооборот нефти и нефтепродуктов, млн т/год				Среднее значение грузооборота за 2015–2018 гг.	Эффективность грузооборота
		2015	2016	2017	2018		
Морской порт Приморск	89,50	59,61	64,43	57,61	53,49	58,78	0,66
Морской порт Усть-Луга	78,84	57,36	60,63	61,70	57,48	59,29	0,75
Морской порт Восточный	32,00	30,40	31,80	31,70	30,40	31,08	0,97
Туапсинский морской торговый порт	20,00	7,70	7,05	6,40	5,40	6,64	0,33
Большой порт Санкт-Петербург	17,82	9,58	6,52	7,40	9,12	8,16	0,46
Морской порт Калининград	13,00	2,43	1,84	2,43	2,29	2,25	0,17
Морской порт Высоцк	12,50	11,80	10,96	10,42	10,90	11,02	0,88

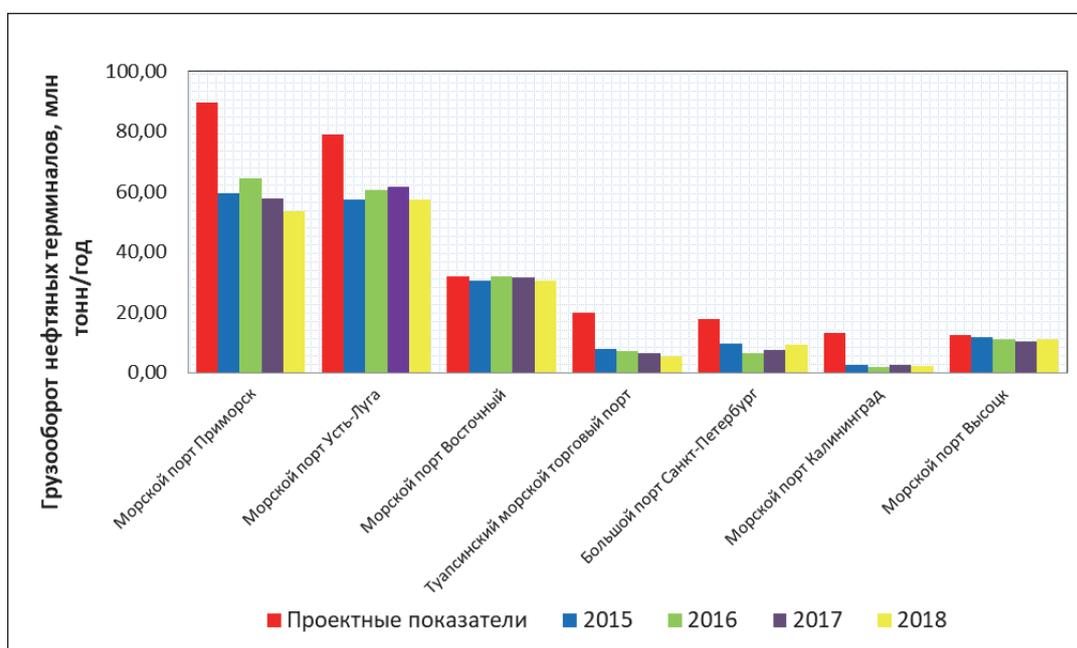


Рис. 2. Сравнение проектной пропускной способности и фактического грузооборота нефтяных терминалов Российской Федерации

В качестве примера оценки технических показателей для некоторых спроектированных и вновь создаваемых угольных терминалов, а также для существующих и эксплуатируемых в табл. 3 и 4 приведены значения производительности причального фронта, производительности причала и складских площадей.

Таблица 3

**Значения технических показателей запроектированных/строющихся
угольных терминалов в Российской Федерации**

Угольные терминалы	Длина причальной стенки, пог. м	Количество причалов	Проектный грузооборот, тыс. т/год	Площадь открытых складов, тыс. м ²	Производительность причального фронта, тыс. т/год/м	Производительность причала, тыс. т/год	Производительность складских площадей, тыс. т/год/тыс. м ²
Угольный морской терминал в районе мыса Открытый «Порт «Вера»	568	2	18 000	141	32	9 000	128
Комплекс перегрузки угля «Лавна» в морском порту Мурманск	660	2	18 000	177	27	9 000	102
Угольный терминал на базе Сырадасайского угольного месторождения	250	1	4 000	20	16	4 000	200

Таблица 4

Значения технических показателей действующих угольных терминалов РФ

Угольные терминалы	Длина причальной стенки, пог. м	Количество причалов	Пропускная способность, тыс. т/год	Площадь открытых складов, тыс. м ²	Производительность причального фронта, тыс. т/год/м	Производительность причала, тыс. т/год	Производительность складских площадей, тыс. т/год/тыс. м ²
Морской порт Усть-Луга	565	2	12 000	104	21	6 000	115
Морской порт Высоцк	782	4	8 700	81	11	2 175	107
Морской порт Восточный. Производственный перегрузочный комплекс № 3 (причалы № 49–51, 51А)	1193	4	30 700	287	26	7 675	107
Морской порт Восточный. Производственный перегрузочный комплекс № 3 (причалы № 33–35)	417	3	4 000	19	10	1 333	211

При комплексной оценке работы морских терминалов могут быть рассмотрены следующие данные:

- наличие и номенклатура перегрузочной техники;
- наличие открытых и крытых складских площадок;
- транспортная доступность;
- отсутствие у терминала ограничений по метеоусловиям;
- возможность обработки стоков и отходов с судов.

Поскольку любая хозяйственная деятельность предприятия предполагает получение выгоды и минимизацию затрат, измерение и аналитика финансово-экономической отчетности являются первоочередными объектами внимания собственников и потенциальных инвесторов.

В специальной литературе финансово-экономические критерии работы предприятий представлены весьма широко и в настоящее время широко используются в мировой и отечественной практике [16]–[20].

Перечень используемых в настоящее время финансово-экономических показателей предприятий огромен, а для их анализа применительно к отрасли морской транспортной инфраструктуры потребуется выполнить отдельное исследование. В качестве базовых финансово-экономических показателей нами предлагаются к рассмотрению следующие показатели:

1. Прибыль (*Profit*) — разница между общей выручкой (*Total Revenue*) и общими затратами (*Total Cost*):

$$PR = TR - TC. \quad (8)$$

2. Рентабельность активов (*Return on Assets*) — отношение чистой прибыли (*Net Profit*) к стоимости активов (*Total Assets*):

$$ROA = \frac{NPR}{TA} = \frac{PR - TP}{TA}. \quad (9)$$

3. Коэффициент фондоотдачи (*Fixed Assets Turnover Ratio*) — отношение объема реализации *TR* (*Total Revenue*) к остаточной стоимости основных средств *FA-D* (*Fixed Assets — Depreciation*):

$$FATR = \frac{TR}{FA - D}. \quad (10)$$

4. Доля заемных средств (*Leverage ratio*) — отношение величины заемных средств *TL* (*Total Leverage*) к общей сумме активов *TA* (*Total Assets*):

$$LR = \frac{TL}{TA}. \quad (11)$$

5. Коэффициент текущей ликвидности (*Current ratio*) — отношение оборотных средств *CA* (*Current Assets*) к краткосрочным пассивам *CL* (*Current Liabilities*):

$$CR = \frac{CA}{CL}. \quad (12)$$

В процессе выполнения хозяйственной деятельности морских терминалов могут возникать аварийные ситуации с проливами нефти и нефтепродуктов, жидких химических веществ и т. д. В условиях низких температур восстановление экосистем происходит в течение длительного периода времени. Плохая развитость инфраструктуры, отсутствие возможности оперативного реагирования и ликвидации последствий негативных событий могут иметь в случае аварийных ситуаций катастрофические последствия для окружающей среды арктических и субарктических регионов. Поэтому чрезвычайно важным на этапе проектирования является разработка перечня мероприятий по охране окружающей среды, а в дальнейшем — проведение данных мероприятий в процессе строительства и эксплуатации морских терминалов, включая, но не ограничиваясь предупреждением аварийных ситуаций, проведением тренингов и инструктажей персонала, выполнением мониторинга за состоянием окружающей среды. До разработки перечня мероприятий по охране окружающей среды выполняется оценка воздействия на окружающую среду в процессе реализации проектов по созданию морских терминалов.

В рамках оценки воздействия на окружающую среду выявляют характер, интенсивность и степень опасности влияния любого вида планируемой хозяйственной деятельности на состояние окружающей среды и здоровье населения. Создание морских терминалов не должно способствовать ухудшению экологической обстановки.

При проектировании морских терминалов оценку прогнозируемого уровня негативного воздействия на окружающую среду выполняют по следующим показателям:

- воздействию на атмосферный воздух;
- шумовому воздействию;
- воздействию на водные объекты;
- воздействию на компоненты окружающей среды при обращении с отходами;
- воздействию на грунты;
- воздействию на водные биоресурсы.

Учитывая ранее изложенное, в качестве экологических показателей предлагается рассмотреть следующие:

1. Отношение суммарного годового количества выбросов загрязняющих атмосферу газов m_{atm} (оксида углерода m_{CO} , двуокси углерода m_{CO_2} , оксида серы m_{SO_2} , монооксида азота m_{NO} , диоксида азота m_{NO_2} , углеводородов $m_{(CH)_x}$) к годовому грузообороту терминала Q :

$$K_{1e} = \frac{m_{atm}}{Q}. \quad (13)$$

2. Отношение значения ущерба, причиненного водных биоресурсам m_{fish} , нанесенного в процессе строительства и эксплуатации терминала, к годовому грузообороту терминала Q :

$$K_{2e} = \frac{m_{fish}}{Q}. \quad (14)$$

3. Отношение фактических концентраций загрязняющих веществ $C_{факт}$, образующихся при строительстве и эксплуатации морского терминала, к предельно допустимым значениям концентраций $C_{пдк}$:

$$K_{3e} = \frac{C_{факт}}{C_{пдк}}. \quad (15)$$

Помимо указанных экологических показателей, не менее важными являются следующие:

– наличие технических средств для предупреждения и ликвидации аварийных ситуаций, причиняющих вред окружающей среде;

– наличие квалифицированного персонала в области охраны окружающей среды;

– выполнение регулярных проверок состояния экологической обстановки.

В настоящее время исполнение природоохранного законодательства и соответствие предприятий морской транспортной инфраструктуры современным экологическим стандартам являются критически важными и необходимыми для сохранения и дальнейшего развития отрасли.

Помимо технико-экономической эффективности и экологической безопасности, современные морские терминалы должны вносить свой вклад в развитие региона, создание рабочих мест и комфортных условий труда.

В качестве социальных показателей могут быть рассмотрены следующие:

1. Отношение среднесписочной численности персонала терминала к общему числу трудоспособного населения в регионе:

$$K_{1s} = \frac{N_{empl}}{N}. \quad (16)$$

2. Отношение средней заработной платы работников терминала к средней заработной плате в регионе:

$$K_{2s} = \frac{W_{empl}}{W}. \quad (17)$$

3. Отношение налоговых отчислений терминала к бюджету региона:

$$K_{3s} = \frac{T_{term}}{B}. \quad (18)$$

К качественным социальным показателям для морских терминалов относятся:

- комфортность условий труда работников;
- удовлетворенность персонала условиями труда и вознаграждением;
- наличие и соблюдение установленных корпоративных правил по развитию и повышению квалификации персонала.

При сравнении показателей морских терминалов целесообразно также выполнять градацию по видам перегружаемых грузов: контейнерные, угольные, нефтяные, а также терминалы по перегрузке сжиженного природного газа.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Оценка и сравнение результатов деятельности и отчетности предприятий, работающих в отрасли морской транспортной инфраструктуры, является актуальной для дальнейших исследований задач.
2. Сформулированные предложения по градации и критериям оценки работы морских перегрузочных комплексов могут быть использованы для сравнения эффективности работы предприятий.
3. Помимо технических и финансово-экономических показателей, экологические и социальные критерии работы терминалов также являются значимыми и актуальными для анализа и использования в работе.
4. Результаты сравнения коэффициентов оборачиваемости резервуарных парков, проектных значений пропускной способности и фактического грузооборота дают возможность определить средние значения показателей для нефтяных терминалов РФ.
5. Выполненные сравнения значений производительности причального фронта, производительности причала и складских площадей для некоторых действующих, а также для спроектированных / строящихся угольных терминалов РФ, дают возможность определения средних значений и их использования для дальнейших экспертных оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Бенчмаркинг-показатели в технологическом проектировании контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 7–19. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-7-19.
2. Кузнецов А. Л. Эволюция показателей, характеризующих эксплуатационную работу портов и терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 909–924. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-909-924.
3. Marlow P. B. Measuring lean ports performance / P. B. Marlow, A.C. P. Casaca // International Journal of Transport Management. — 2003. — Vol. 1. — Is. 4. — Pp. 189–202. DOI: 10.1016/j.ijtm.2003.12.002.
4. Tovar B. Classifying Ports for Efficiency Benchmarking: A Review and a Frontier-based Clustering Approach / B. Tovar, H. Rodriguez-Deniz // Transport Reviews. — 2015. — Vol. 35. — Is. 3. — Pp. 378–400. DOI: 10.1080/01441647.2015.1016473.
5. Hakam M. H. Nordic container port sustainability performance — a conceptual intelligent framework / M. H. Hakam // Journal of Service Science and Management. — 2015. — Vol. 8. — Is. 01. — Pp. 14–23. DOI: 10.4236/jssm.2015.81002.

6. *Peris-Mora E.* Development of a System of Indicators for Sustainable Port Management / E. Peris-Mora, J. D. Orejas, A. Subirats, S. Ibáñez, P. Alvarez // *Marine Pollution Bulletin*. — 2005. — Vol. 50. — Is. 12. — Pp. 1649–1660. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2005.06.048.
7. *Wilmsmeier G.* The impact of Port Characteristics on International Maritime Transport Costs / G. Wilmsmeier, J. Hoffmann, R. J. Sanchez // *Research in Transportation Economics*. — 2006. — Vol. 16. — Pp. 117–140. DOI: 10.1016/S0739-8859(06)16006-0.
8. *Sanchez R. J.* Port efficiency and international trade: port efficiency as a determinant of maritime transport costs / R. J. Sanchez, J. Hoffmann, A. Micco, G. V. Pizzolitto, M. Sgut, G. Wilmsmeier // *Maritime Economics & Logistics*. — 2003. — Vol. 5. — Is. 2. — Pp. 199–218. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100073.
9. *Monios J.* Port system evolution — the emergence of second-tier hubs / J. Monios, G. Wilmsmeier, A. K. Y. Ng // *Maritime Policy & Management*. — 2019. — Vol. 46. — Is. 1. — Pp. 61–73. DOI: 10.1080/03088839.2018.1468937.
10. *Pardali A.* Determining the position of container handling ports, using the benchmarking analysis: the case of the Port of Piraeus / A. Pardali, V. Michalopoulos // *Maritime Policy & Management*. — 2008. — Vol. 35. — Is. 3. — Pp. 271–284. DOI: 10.1080/03088830802080316.
11. *Sachish A.* Productivity functions as a managerial tool in Israeli ports / A. Sachish // *Maritime Policy & Management*. — 1996. — Vol. 23. — Is. 4. — Pp. 341–369. DOI: 10.1080/03088839600000094.
12. *VanderBerg J. D.* Optimal Arctic Port locations: a quantitative composite multiplier analysis of potential sites / J. D. VanderBerg // *Polar geography*. — 2018. — Vol. 41. — Is. 1. — Pp. 55–74. DOI: 10.1080/1088937X.2017.1400604.
13. *Бауэрсокс Д. Дж.* Логистика: интегрированная цепь поставок / Д. Дж. Бауэрсокс, Д. Дж. Клосс. — М.: Олимп-Бизнес, 2008. — 590 с.
14. *Захаров М. Н.* Ситуации инженерно-экономического анализа / М. Н. Захаров, И. Н. Омельченко, А. С. Саркисов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 289 с.
15. *Сампиев А. М.* Разработка модели управления производственной мощностью промышленного комплекса по сжижению природного газа: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / А. М. Сампиев; МГТУ им. Н. Э. Баумана. — М., 2017. — 67 с.
16. *Stopford M.* *Maritime economics* / M. Stopford. — 3rd edition. — Routledge, 2009. — 840 p.
17. *Бриггем Ю.* Финансовый менеджмент / Ю. Бриггем, Л. Гапенски. — СПб: Экономическая школа, 1997. — 165 с.
18. *Андреев А. Ф.* Методические аспекты оценки инвестиционных проектов в нефтяной и газовой промышленности / А. Ф. Андреев, В. Д. Зубарева, А. С. Саркисов. — М.: Полиграф, 1996. — 19 с.
19. *Дунаев В. Ф.* Экономика предприятий нефтяной и газовой промышленности: учеб. / В. Ф. Дунаев [и др.] / Под ред. В. Ф. Дунаева. — М.: Нефть и газ, 2006. — 232 с.
20. *Виленский П. Л.* Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика / П. Л. Виленский, В. Н. Лившиц, С. А. Смоляк. — М.: Дело, 2002. — 379 с.

REFERENCES

1. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. “Benchmarking indicators in technological design of container terminals.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.1 (2018): 7–19. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-7-19.
2. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. “The evolution of indicators describing the operation of ports and terminal.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.5 (2017): 909–924. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-909-924.
3. Marlow, Peter B., and Ana C. Paixao Casaca. “Measuring lean ports performance.” *International journal of transport management* 1.4 (2003): 189–202. DOI: 10.1016/j.ijtm.2003.12.002.
4. Tovar, Beatriz, and Héctor Rodríguez-Déniz. “Classifying ports for efficiency benchmarking: A review and a frontier-based clustering approach.” *Transport Reviews* 35.3 (2015): 378–400. DOI: 10.1080/01441647.2015.1016473.
5. Hakam, Moulay Hicham. “Nordic Container port sustainability performance — a conceptual intelligent framework.” *Journal of Service science and Management* 8.01 (2015): 14–23. DOI: 10.4236/jssm.2015.81002.
6. Peris-Mora, E., J. D. Orejas, A. Subirats, S. Ibáñez, and P. Alvarez. “Development of a System of Indicators for Sustainable Port Management”. *Marine Pollution Bulletin* 50.12 (2005): 1649–1660. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2005.06.048.

7. Wilmsmeier, Gordon, Jan Hoffmann, and Ricardo J. Sanchez. "The impact of port characteristics on international maritime transport costs." *Research in Transportation Economics* 16 (2006): 117–140. DOI: 10.1016/S0739-8859(06)16006-0.
8. Sanchez, Ricardo J., Jan Hoffmann, Alejandro Micco, Georgina V. Pizzolitto, Martin Sgut, and Gordon Wilmsmeier. "Port efficiency and international trade: port efficiency as a determinant of maritime transport costs." *Maritime economics & logistics* 5.2 (2003): 199–218. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100073.
9. Monios, Jason, Gordon Wilmsmeier, and Adolf KY Ng. "Port system evolution—the emergence of second-tier hubs." *Maritime Policy & Management* 46.1 (2019): 61–73. DOI: 10.1080/03088839.2018.1468937.
10. Pardali, Angeliki, and Vassilis Michalopoulos. "Determining the position of container handling ports, using the benchmarking analysis: the case of the Port of Piraeus." *Maritime Policy & Management* 35.3 (2008): 271–284. DOI: 10.1080/03088830802080316.
11. Sachish, Arie. "Productivity functions as a managerial tool in Israeli ports." *Maritime policy and Management* 23.4 (1996): 341–369. DOI: 10.1080/03088839600000094.
12. VanderBerg, Justin D. "Optimal Arctic port locations: A quantitative composite multiplier analysis of potential sites." *Polar Geography* 41.1 (2018): 55–74. DOI: 10.1080/1088937X.2017.1400604.
13. Bowersox, Donald J., and David J. Closs. *Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process*. McGraw-Hill College, 1996.
14. Zakharov, M. N., I. N. Omel'chenko, and A. S. Sarkisov. *Situatsii inzhenerno-ekonomicheskogo analiza*. M.: MGTU im. N. E. Baumana, 2014.
15. Sampiev, A. M. Razrabotka modeli upravleniya proizvodstvennoi moshchnost'yu promyshlennogo kompleksa po szhizheniyu prirodnogo gaza. Abstract of PhD diss. M.: MGTU im. N. E. Baumana, 2017.
16. Stopford, Martin. *Maritime economics*. 3rd edition. Routledge, 2009.
17. Brighkem, Yu., and L. Gapenski. *Finansovyi menedzhment*. SPb: Ekonomicheskaya shkola, 1997.
18. Andreev, A. F., V. D. Zubareva, and A. S. Sarkisov. *Metodicheskie aspekty otsenki investitsionnykh proektov v neftyanoi i gazovoi promyshlennosti*. M.: «Poligraf», 1996.
19. Dunaev, V. F., V. A. Shpakov, N. P. Epifanova, and V. N. Lyndin. *Ekonomika predpriyatii neftyanoi i gazovoi promyshlennosti: Uchebnik*. Edited by V. F. Dunaev. M.: «Neft' i gaz», 2006.
20. Vilenskii, P. L., V. N. Livshits, and S. A. Smolyak. *Otsenka effektivnosti investitsionnykh proektov. Teoriya i praktika*. M.: Delo, 2002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сампиев Адам Михайлович —
 кандидат экономических наук
 АО «ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 Межевой канал, д. 3, корп. 2
 e-mail: adam.sampiev@lenmor.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sampiev, Adam M. —
 PhD
 LENMORNII PROEKT, JSC
 3/2 Mezhevoy kanal, St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: adam.sampiev@lenmor.ru

Статья поступила в редакцию 11 июня 2021 г.
 Received: June 11, 2021.

GENETIC ALGORITHM-BASED LINEAR ROUTES OPTIMIZATION MODEL

A. V. Galin, A. S. Malykhin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The issue of constructing a theoretical model for optimizing the routes of liner container ships taking into account the distribution of goods between the hinterlands of ports is considered in the paper. The description of the experimental part of the model for container lines taking into account land transportation in the hinterlands of ports is given. It is indicated that in order to support and substantiate decisions taken at the stage of planning routes for the movement of ships of the shipping line, it is necessary to use optimization tools. It is emphasized that the task of optimizing the routes of a linear shipping company is reduced to the need to find such a sequence of bypassing seaports by a ship from a given set, at which the extreme value of the optimality criterion will be achieved. In this form, the optimization problem can be simplified to the classical traveling salesman problem. It is noted that the sources of origin and extinction of cargo flows are located in the hinterlands of ports. It is indicated that the choice of the criterion for optimizing the route of the vessel affects the nature of the problem being solved. The criterion of the optimality of the problem being solved within the framework of the model can be set the freight turnover or the time of the voyage. A theoretical description of the model, formula and scheme on which the model is based, is provided in the paper. A new approach to the problem of liner ships routing on the basis of a liner route optimization model when distributing cargo between port hinterlands is considered. It is indicated that the new method is created by combining the method of genetic chimeras and the method of ordered crossover. The method has a number of advantages over current methods, since in the process of optimizing the routes of a liner shipping company, the distribution of goods between the hinterlands of ports is taken into account.

Keywords: containers, genetic algorithm, optimization.

For citation:

Galina, Aleksandr V., and Aleksandr S. Malykhin. "Genetic algorithm-based linear routes optimization model." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiralov S. O. Makarova* 13.4 (2021): 530–538. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-530-538.

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ЛИНЕЙНЫХ МАРШРУТОВ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

А. В. Галин, А. С. Малыхин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен вопрос построения теоретической модели оптимизации маршрутов линейных контейнерных судов с учетом распределения грузов между хинтерлендами портов. Приведено описание экспериментальной части модели для контейнерных линий с учетом наземных перевозок в хинтерлендах портов. Подчеркивается, что для поддержания и обоснования решений, принимаемых на этапе планирования маршрутов перемещения судов судоходной линии, необходимо использование инструментов оптимизации. Отмечается, что задача оптимизации маршрутов линейной судоходной компании сводится к необходимости нахождения такой последовательности обхода судном морских портов из заданного множества, при которой будет достигнуто экстремальное значение критерия оптимальности. В таком виде данная задача может быть упрощена до классической задачи коммивояжера. Подчеркивается, что источники зарождения и угасания грузопотоков находятся в хинтерлендах портов. Указано, что выбор критерия оптимизации маршрута судна оказывает влияние на характер решаемой задачи, критерием оптимальности которой в рамках модели может быть установлен грузооборот или время рейса. В статье приводится теоретическое описание модели, а также формулы и схемы, на которых базируется ее работа. Рассмотрен новый подход к проблеме маршрутизации линейных судов на основе модели оптимизации маршрутов линейных судов при распределении грузов между хинтерлендами портов. Указывается, что новый метод создан путем совмещения метода генетических химер и метода упорядоченного кроссовера. Рассматриваемый

метод имеет ряд преимуществ над актуальными методами, так как в процессе оптимизации маршрутов линейной судоходной компании учитывается распределение грузов между хинтерлендами портов.

Keywords: контейнеры, генетический алгоритм, оптимизация.

Для цитирования:

Галин А. В. Модель оптимизации линейных маршрутов на основе генетического алгоритма / А. В. Галин, А. С. Малыхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 530–538. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-530-538.

Введение (Introduction)

Морская контейнерная перевозка грузов, с точки зрения судовладельца, представляет собой последовательность судозаходов в морские порты для погрузки и разгрузки контейнерных грузов [1]. Порядок обхода морских портов можно представить в виде нескольких наиболее распространенных типовых схем:

- маятниковой схемы;
- схемы с портом-хабом;
- круговой схемы (на основе круговых рейсов рейсов судна).

Следует отметить, что любая схема, выбранная судовладельцем (оператором судоходной линии), со временем оптимизируется эмпирическим путем: обслуживание одних грузопотоков оказывается выгодным, других — убыточным. Однако эмпирический способ оптимизации является продолжительным по времени, и кроме того, финансово затратным. При этом для поддержания и обоснования решений, принимаемых на этапе планирования маршрутов перемещения судов судоходной линии, необходимо использование *инструментов оптимизации*.

Рейсы судоходной линии базируются на множестве морских портов рассматриваемого региона, в котором имеются грузопотоки, выраженные в виде потребности перемещения груза из одного пункта в другой. Морская перевозка груза при таком перемещении обычно является промежуточным звеном, поэтому некорректно рассматривать ее в отрыве от фактического источника и «терминатора» (пункта назначения) грузопотока. В данном случае источником грузопотока является географический населенный пункт, в котором размещается предприятие, осуществляющее на постоянной основе поставки некоторого груза. Для совершения поставок предприятию необходим входящий поток контейнеров, перегрузочные мощности, обеспечивающие загрузку контейнеров и возможность совершать отправку контейнеров со своей территории [2]. Альтернативным вариантом может являться наземный грузовой терминал, консолидирующий районные грузопотоки, который обеспечивает необходимые мощности и выполняет отправки контейнеризованного груза.

При движении судоходной линии по круговой схеме задача планирования рейсов может быть сформулирована следующим образом: *необходимо найти такую последовательность обхода судном морских портов из заданного множества, при которой будет достигнуто экстремальное значение критерия оптимальности* [3]. При этом достаточно и необходимо, чтобы судно зашло в каждый морской порт ровно один раз и вернулось в начальный порт маршрута. В данной формулировке задача планирования рейсов судоходной линии может быть редуцирована до классической задачи коммивояжера (англ. — Travelling Salesman Problem (TSP)) [4], [5].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Разница между отдельным предприятием, осуществляющим поставки груза, и наземным «сухим» контейнерным терминалом с точки зрения разрабатываемой модели отсутствует. «Терминатором» грузопотока (точкой его поглощения) является конечный населенный пункт транспортировки груза, иными словами, пункт, в котором размещается потребитель продукции, производимой источниками грузопотоков [6]. При этом зарождающиеся и поглощаемые грузопотоки не равны, так как грузопоток, зарождающийся в источнике, может иметь несколько составных частей, каждая из которых предназначена для определенного потребителя. Исходящий грузопоток источника разделяется в морском порту, перемещаясь до соответствующих морских портов, связанных наземной

транспортной сетью с потребителями грузопотока источника (рис. 1). Из примера, приведенного на рисунке, видно, что исходящий грузопоток источника (производителя) Q всегда равен сумме грузопотоков, достигающих потребителей его продукции:

$$Q = \sum_{i=1}^z q_i, \quad (1)$$

где i — порядковый номер потребителя продукции производителя.

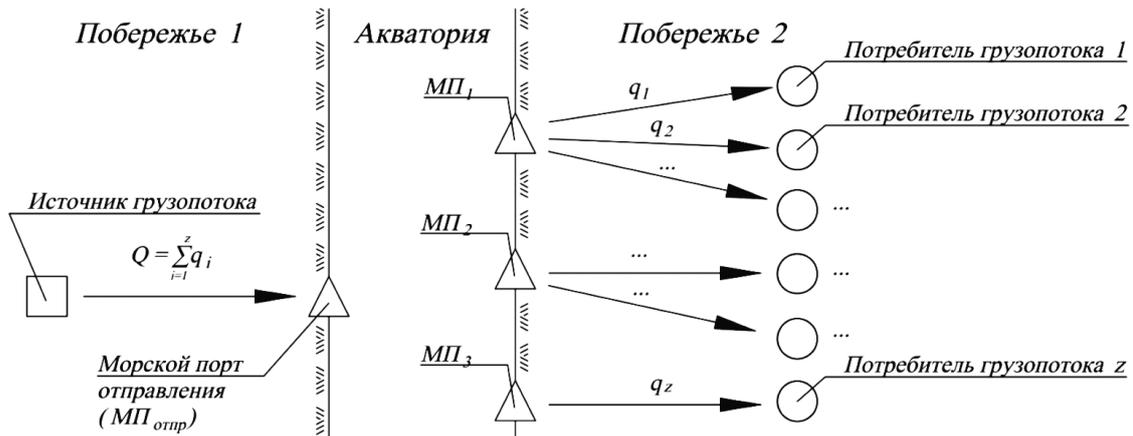


Рис. 1. Пример разделения грузопотоков между потребителями

При этом обычно потребителей несколько, поэтому $q_i \neq Q$.

Источники зарождения и поглощения грузопотоков в модели располагаются в хинтерлендах морских портов. Сами морские порты не могут быть источниками зарождения и поглощения контейнерных грузопотоков, они выполняют роль пункта консолидации и дистрибуции груза.

Выбор критерия оптимизации маршрута судна оказывает влияние на характер решаемой задачи. При выборе времени перехода t_{ij} между портами i и j в качестве критерия оптимальности маршрута направление перехода не имеет значения. При выборе обслуживаемого грузооборота Q_{ij} в качестве критерия оптимальности направление перехода судна может играть существенную роль:

$$t_{ij} = t_{ji};$$

$$Q_{ij} \neq Q_{ji}. \quad (2)$$

Пример такого графа приведен на рис. 2. В обоих случаях построенный граф переходов судна между морскими портами является связным, поскольку из любой вершины (морского порта) можно попасть в любую другую вершину [7]. На рис. 2, а построен неориентированный граф на основе четырех морских портов. При оптимизации маршрута на основе такого графа отсутствует разница между переходом, например, из «Порта 1» в «Порт 2» и наоборот. На рис. 2, б построен ориентированный граф на основе тех же четырех портов. В этом случае между круговым рейсом: «Порт 1» → «Порт 2» → «Порт 3» → «Порт 4» → «Порт 1» и круговым рейсом: «Порт 1» → «Порт 4» → «Порт 3» → «Порт 2» → «Порт 1» может быть существенная разница в объеме обслуживаемого грузооборота.

Несмотря на данное различие с точки зрения вычислительной сложности, эти два варианта задачи являются идентичными. Для решения задачи оптимизации кругового рейса судна на основе критерия времени кругового рейса составляется матрица расстояний между морскими портами. В простейшем случае постановки задачи расстояния могут быть определены как евклидовы метрики между двумя точками с координатами X и Y в двумерном пространстве. Однако в реальности такой метод не является достаточно точным из-за кривизны геоида и особенностей судоходных путей, поэтому рекомендуется обращаться к таблицам расстояний между морскими портами для задания

дистанций перехода судов. Примером существенного различия между матрицей расстояний, рассчитанной на основе евклидовых метрик, и фактическими расстояниями между портами может служить расположение портов Европы (рис. 3).

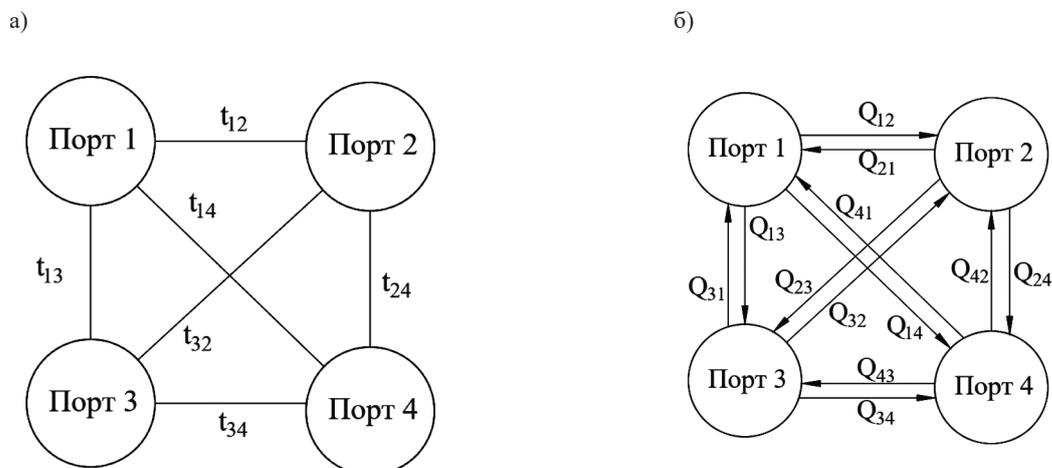


Рис. 2. Вид графа переходов судна между морскими портами в зависимости от критерия оптимальности маршрута:
 а — критерий оптимальности — время t_{ij} ;
 б — критерий оптимальности — грузооборот Q_{ij}

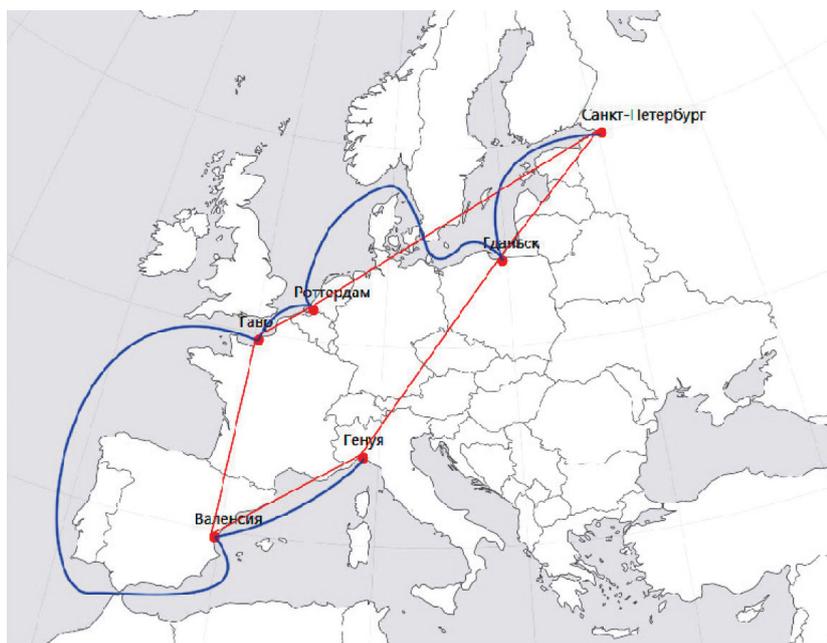


Рис. 3. Расстояния между портами
 Условные обозначения:
 красная линия — расстояние на основе евклидовых метрик;
 синяя линия — фактические расстояния между морскими портами

Матрица расстояний имеет вид:

$$S = \begin{pmatrix} \text{H / Д} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & \text{H / Д} & \dots & s_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & \text{H / Д} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где n/d — обозначение «недействительного» перехода из порта i в порт j (длины таких переходов обозначаются таким способом, а не приравниваются нулю во избежание возникновения программных исключений, связанных с делением на нуль при работе модели); n — количество портов, входящих в ротацию кругового рейса судна.

Матрица расстояний в общем случае является симметричной относительно главной диагонали, т. е. для любых портов i и j справедливо равенство: $s_{ij} = s_{ji}$. В случае существенной разницы между переходами s_{ij} и s_{ji} в матрицу расстояний модели должны быть внесены соответствующие изменения.

Для учета возможных сложных переходов между некоторыми морскими портами вводится матрица коэффициентов сложности переходов:

$$K = \begin{pmatrix} n/d & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & n/d & \cdots & k_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & n/d \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Матрица K по умолчанию заполняется коэффициентами k_{ij} , равными единице для всех переходов. В случае наличия особенностей перехода между двумя портами, оказывающих влияние на скорость передвижения судна, соответствующий коэффициент должен находиться в диапазоне от $0 < k_{ij} \leq 1$. Чем меньше значение, присваиваемое коэффициенту сложности, тем выше сложность перехода. Альтернативной трактовкой этого коэффициента может быть отношение скорости, с которой приходится перемещаться судну, к его скорости на других переходах, где не возникает дополнительных сложностей.

Скорость судна в модели, задаваемая одной величиной v для всех переходов, представляет собой экономическую скорость, т. е. такую, при которой достигается минимальный расход топлива на единицу расстояния (морскую милю) [8]. Время кругового рейса судна в общем случае складывается из двух составляющих:

- времени переходов между портами, входящими в ротацию кругового рейса;
- времени стоянки судна в каждом порту.

Математически это можно выразить следующим образом:

$$T = \sum \frac{s_{ij}}{v k_{ij}} + \sum_{i=1}^n t_{\text{порт } i}, \quad (5)$$

где s_{ij} — расстояние перехода между портами i и j , морских миль (определяется по матрице S расстояний между портами); v — экономическая скорость судна, уз; k_{ij} — коэффициент сложности перехода между морскими портами i и j ; $t_{\text{порт } i}$ — время стоянки судна в порту i , ч.

Однако при решении задачи минимизации времени кругового рейса становится очевидным, что время, проводимое судном в морских портах, не влияет на критерий оптимальности решения, поскольку, вне зависимости от маршрута судна, оно совершит судозаходы во все порты. Слагаемое $\sum_{i=1}^n t_{\text{порт } i}$ будет присутствовать во всех решениях модели, независимо от рассматриваемого варианта рейса судна. Следовательно, нет необходимости учитывать это время при расчете критерия оптимальности рейса судна.

Критерий оптимальности, основанный на времени кругового рейса судна, может быть определен на основе следующей формулы:

$$T = \sum \frac{s_{ij}}{v k_{ij}}. \quad (6)$$

Критерий оптимальности, основанный на максимальном обслуживаемом грузообороте, рассчитывается на основе матрицы грузооборотов, строящейся по аналогии с матрицей расстояний между портами:

$$Q = \begin{pmatrix} \text{н / д} & Q_{12} & \dots & Q_{1n} \\ Q_{21} & \text{н / д} & \dots & Q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{n1} & Q_{n2} & \dots & \text{н / д} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Однако в данном случае матрица Q не является симметричной, поскольку, как отмечалось ранее, для портов i и j будет справедливо выражение $Q_{ij} \neq Q_{ji}$.

Критерий оптимальности по грузообороту кругового рейса судна определяется на основе следующей формулы:

$$q = \sum Q_{ij}, \quad (8)$$

где i и j — соседние порты в последовательности захода в порты во время кругового рейса.

С точки зрения генетического алгоритма критерии T и q представляют собой целевые функции решений, называемые также *фитнесс-функциями*. Во время работы генетического алгоритма фитнес-функции рассчитываются на каждом шаге для каждого решения. Таким образом, при размере популяции решений, равном m , генетический алгоритм выполняет вычисления для каждого из m решений:

$$T_1 = \sum \frac{S_{ij}}{\cup k_{ij}}; \quad q_1 = \sum Q_{ij}; \quad (9)$$

$$T_2 = \sum \frac{S_{ij}}{\cup k_{ij}}; \quad q_2 = \sum Q_{ij}; \quad (10)$$

...

$$T_m = \sum \frac{S_{ij}}{\cup k_{ij}}; \quad q_m = \sum Q_{ij}. \quad (11)$$

Задача оптимизации генетического алгоритма в таком случае сводится к поиску таких T_x и q_x из множеств T и q , для которых справедливы следующие выражения:

$$T_x = \min(T); \quad (12)$$

$$q_x = \max(q), \quad (13)$$

где $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$; $q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$.

С точки зрения грузопотоков модель представляет собой систему пунктов зарождения и поглощения грузопотоков, обменивающихся грузами с привлечением морской перевозки. Минимальной неделимой единицей груза в модели принят один морской контейнер.

Каждый наземный пункт в модели может являться одновременно источником и потребителем грузопотоков. Таким образом, схему, приведенную на рис. 2, можно расширить, как это показано на рис. 4. В модели предполагается, что производители и потребители контейнеропотоков не соединены между собой сухопутными транспортными путями или, если соединены, то наземная перевозка априори менее рациональна, чем морская перевозка контейнера между ними. В модели также предполагается, что контейнеропоток, формируемый в наземном пункте, соединенном с морским портом наземными путями сообщения, не может в качестве пункта назначения иметь наземный пункт, соединенный с этим же морским портом. Например, на рис. 4 для контейнеров, отправляемых из источника грузопотока 1, пунктом назначения не может быть выбран потребитель грузопотока 2, поскольку они соединены наземной сетью путей сообщения с морским портом А.

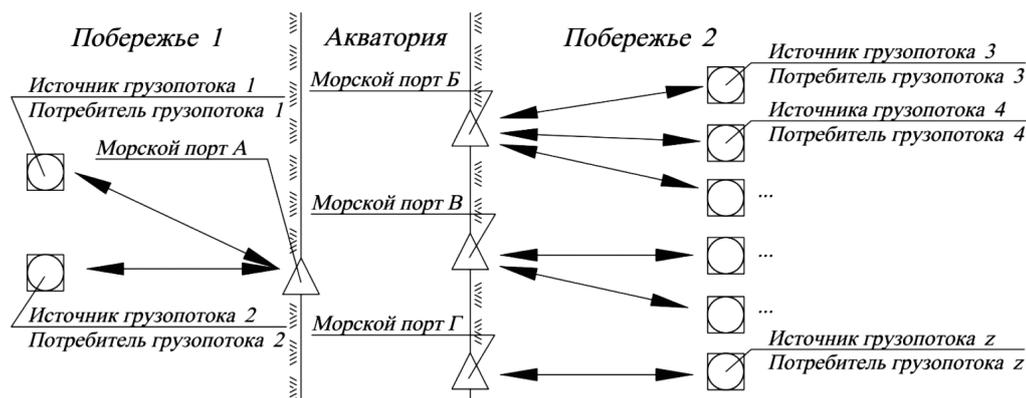


Рис. 4. Пример схемы взаимосвязей морских портов и их хинтерлендов

Разделение на побережья (см. рис. 4) — условное и не делает морскую перевозку грузов, например, из порта *Б* в порт *В* нерациональной.

Результаты (Results)

Динамическая модель сети распределения контейнерных грузов представляет собой автономное программное обеспечение, написанное на языке C#. В основе архитектуры программы лежит парадигма объектно-ориентированного программирования. Разработанная программа представляет собой совокупность объектов, которые могут вызывать друг друга для выбора и выполнения операций.

Последовательность портов, в которые совершаются судозаходы, представляет собой основу модели и является оптимизируемым решением. Остальные поля и методы этого класса служат оболочкой для данного поля, позволяя организовать корректное взаимодействие с ним.

Ссылки на матрицы расстояний и грузооборотов дают возможность обратиться к соответствующей матрице изнутри объекта-решения. Ссылки на матрицу расстояний и грузооборотов инициализируются в конструкторе объекта класса.

Методы расчета фитнес-функции по времени и расстоянию дают возможность определить значение целевой функции для решения.

Заключение (Conclusion)

Предлагаемая модель имеет ряд преимуществ над существующими актуальными разработками. Ее отличительной характеристикой является учет зарождения грузов в хинтерлендах морских портов, что позволяет проводить оптимизацию маршрутов с большей точностью из-за учета дополнительных вводных данных в виде точек зарождения и угасания грузопотоков, находящихся в хинтерлендах портов. Более того, модернизация методов генетических химер и упорядоченного кроссовера [9], [10] улучшает точность работы используемого в модели метода генетических алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галин А. В. Аналитический обзор методов маршрутизации судов в линейном контейнерном сервисе при сбое его работы / А. В. Галин, А. С. Малыхин // Транспортное дело России. — 2019. — № 2. — С. 162–164.
2. Галин А. В. Контейнеризация как очередной этап развития транспортных систем / А. В. Галин, Е. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 996–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-996-1003.
3. Кузнецов А. Л. Метод генетических химер для решения задачи рационализации маршрутов морской транспортировки / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 456–467. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-456-467.

4. *Manerba D.* The traveling purchaser problem and its variants / D. Manerba, R. Mansini, J. Riera-Ledesma // *European Journal of Operational Research*. — 2017. — Vol. 259. — Is. 1. — Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.12.017.
5. *Рафгарден Т.* Совершенный алгоритм. Алгоритмы для NP-трудных задач / Т. Рафгарден. — СПб.: Питер, 2021. — 304 с.
6. *Галин А. В.* Анализ базовых механизмов рационализации маршрутов наземной транспортировки / А. В. Галин // *Транспортное дело России*. — 2013. — № 4. — С. 157–158.
7. *Кормен Т. Х.* Алгоритмы. Построение и анализ / Т. Х. Кормен [и др.]. — СПб: Вильямс, 2019. — 1328 с.
8. *Шибяев А. Г.* Скорости судов (терминология, понятие, содержание) / А. Г. Шибяев, О. В. Акимова // *Сборник научных трудов SWorld*. — 2014. — Т. 1. — № 2. — С. 24–31.
9. *Малыхин А. С.* Оптимизация маршрута контейнерной линии на основе распределения грузов между портами и хинтерлендами / А. С. Малыхин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 861–867. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-861-867.
10. *Kora P.* Crossover operators in genetic algorithms: A review / P. Kora, P. Yadlapalli // *International Journal of Computer Applications*. — 2017. — Vol. 162. — Is. 10. — Pp. 34–36.

REFERENCES

1. Galin, A., and A. Malykhin. “Analytical review of methods of routing of vessels in the linear container service in case of failure of its work.” *Transport business of Russia 2* (2019): 162–164.
2. Galin, Aleksandr V., and Evgeny A. Davydenko. “Containerization as the next stage in the development of transport systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 996-1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-996-1003.
3. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and German B. Popov. “Chimerical genetic algorithm for sea route rationalization.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 456–467. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9=3-456-467.
4. Manerba, Daniele, Renata Mansini, and Jorge Riera-Ledesma. “The traveling purchaser problem and its variants.” *European Journal of Operational Research* 259.1 (2017): 1–18. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.12.017.
5. Roughgarden, Tim. *Algorithms Illuminated (Part 4): Algorithms for NP-Hard Problems*. Soundlikeyourself Publishing, LLC, 2020.
6. Galin, A. “Analyses of the basic mechanisms of land transportation routes rationalization.” *Transport business of Russia 4* (2013): 157–158.
7. Cormen, Thomas H., Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, and Clifford Stein. *Introduction to Algorithms*. 3rd Edition. MIT Press, 2009.
8. Shibaev, A. G., and O. V. Akimova. “Skorosti sudov (terminologiya, ponyatie, sodержanie).” *Sbornik nauchnykh trudov SWorld* 1.2 (2014): 24–31.
9. Malykhin, Aleksandr S. “Container line route optimization based on cargo distribution between ports and hinterlands.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 861–867. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-861-867.
10. Kora, Padmavathi, and Priyanka Yadlapalli. “Crossover operators in genetic algorithms: A review.” *International Journal of Computer Applications* 162.10 (2017): 34–36.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галин Александр Валентинович —
 доктор технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: galin2403@gmail.com,
 kaf_uts@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galina, Aleksandr V. —
 Dr. of Technical Sciences, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: galin2403@gmail.com,
 kaf_uts@gumrf.ru

Мальхин Александр Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Галин Александр Валентинович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: contrship@yandex.ru,
kaf_uts@gumrf.ru

Malykhin, Aleksandr S. — Postgraduate
Supervisor:
Galina, Aleksandr V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: contrship@yandex.ru,
kaf_uts@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 13 июня 2021 г.
Received: June 13, 2021.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547

ASSESSMENT OF CONTAINER SHIP AND EQUIPMENT FLEET SIZE

A. L. Kuznetsov¹, A. V. Kirichenko¹, A. D. Semenov²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Yanino Logistics Park LLC, Leningrad Region, Russian Federation

The problem of evaluation of container ships and equipment fleet required for the successful container line activity on a certain route is considered in the paper. The analysis allows us to reveal specific features of this traditional task in the case of new transportation technology based on containerization. The basic mathematical formulas, which connect the number of ships and containers necessary to serve given cargo flow of container shipping line with its characteristics, are considered. The suggested method of this problem is illustrated with an example of simple container shipping route, connecting two ports, but the results stay true for more complicated cases (for example, for the round trip, connecting several ports). Particularly, the suggested method can be used as an instrument for comparative analysis of different variants of shipping line organization. The suggested method can be expanded in order to analyze the complex hierarchical configurations of shipping lines, which include several feeder and trunk routes. The verification of methods adequacy is done with utilization of specific simulation model. The results of simulation are represented in the paper. The described argumentation is valid for the regular and deterministic cargo flow. At the same time, container transportation can be characterized with significant variation of container party volumes. These variations can dramatically affect the necessary number of container equipment. In order to include these fluctuations, the method can be expanded with simulation modeling, which allows us to evaluate probability distribution of necessary number of ships and containers.

Keywords: containerization, linear transportation, calculation of ships, calculations of containers, container line, simulation modelling, shipping management, containerships, shipping routes.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. "Assessment of container ship and equipment fleet size." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 539–547. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.

УДК 656.614

РАСЧЕТ ФЛОТА И ПАРКА КОНТЕЙНЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СУДОХОДНОЙ ЛИНИИ

А. Л. Кузнецов¹, А. В. Кириченко¹, А. Д. Семенов²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ООО «Логистический Парк «Янино», Ленинградская область, Российская Федерация

В статье изучена проблема оценки размеров флота судов и парка контейнерного оборудования, необходимого для работы контейнерной линии на заданном маршруте. Выполненный анализ позволил выявить особенности постановки этой традиционной задачи в условиях новой технологической системы транспортировки, основанной на контейнеризации. В работе рассмотрены основные математические зависимости, связывающие количество судов и контейнеров, необходимых для обеспечения заданного грузопотока контейнерной линии, с характеристиками маршрута распределения. Предлагаемый метод решения поставленной проблемы для наглядности продемонстрирован на примере простого маршрута контейнерной линии, связывающей только два порта, но он сохраняет результативность и для более сложных практических случаев (например, круговых маршрутов, включающих несколько портов). В частности, представленный метод может быть использован в качестве инструмента сравнительного анализа различных вариантов организации маршрутов контейнерных линий. Отмечается, что предложенная методика может быть расширена для исследования многоуровневых иерархических конфигураций, включающих в себя несколько магистральных и фидерных линий. Подчеркивается, что проверка корректности метода осуществлялась

с использованием специально разработанных имитационных моделей. Результаты моделирования также приведены в статье. Важным является то, что проведенные для обоснования методики рассуждения справедливы для равномерного и детерминированного грузопотока. В то же время контейнерные перевозки могут характеризоваться существенными разбросами объемов отправляемых контейнерных партий, которые могут оказать существенное влияние на необходимое количество контейнеров, используемых на линии. Для учета таких флуктуаций предложенная схема может быть дополнена методами имитационного моделирования, которые позволят получить распределение плотности вероятности потребности в судах и контейнерах.

Ключевые слова: контейнеризация, линейные перевозки, расчет количества судов, расчет количества контейнеров, контейнерная линия, имитационное моделирование, управление работой флота, контейнерообороты, маршруты судов.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Расчет флота и парка контейнерного оборудования судоходной линии / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 539–547. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.

Введение (Introduction)

Произошедшая в конце XX – начале XXI вв. контейнеризация не только коренным образом изменила мировую торговлю, запустив механизм глобализации, но и привела к смене принципов и критериев организации системы морских линейных перевозок. Контейнер, который, по своей сути, является не столько многооборотной тарой, сколько самостоятельным транспортным средством, перевозится в качестве груза морским и сухопутным транспортом. При этом перевозка выполняется независимо от того, груженный это контейнер или порожний. Необходимость постоянного возвращения контейнеров к началу нового цикла коммерческого оборота в системе транспортировки связывает воедино все участвующие в данном процессе виды транспорта. Суда контейнерной линии должны возвращаться в порт, в который были доставлены контейнеры, с тем, чтобы принять их на борт и доставить грузоотправителю в указанном месте по маршрутам обращения. Аналогичные правила действуют также в отношении перевозок наземным транспортом.

Сложность маршрутов, модель которых формируется из магистральных и фидерных морских перевозок, составных поездов, повагонных отправок и транспортировки автотранспортом, приводит к появлению значительного по размеру парка контейнерного оборудования. Стоимость этого оборудования и ответственность за его своевременный возврат накладывают жесткие требования на условия функционирования морской системы контейнерных перевозок. Под действием этих факторов современная система контейнерного грузораспределения стала настолько сложной, что разобраться в основных принципах ее функционирования и, в конечном счете, управления непросто. Например, количество линейных сервисов, которые предоставляет компания Maersk, составляет 500 маршрутов, компания CMA CGM — 270 маршрутов [1], [2]. При этом среднее количество портов, которые входят в маршруты Maersk, составляет 7,1, а CMA CGM — 6,6. К этому необходимо добавить также совместное использование судов разными линиями на одних маршрутах в форме соглашения о слотах [3], [4]. Кроме того, для выявления базовых законов и тенденций, а также для повышения квалификации работающих в отрасли специалистов необходимо сформулировать основные принципы управления системой контейнерного грузораспределения. Структурированное представление понятий и концепций, лежащих в основе управления флотом линейной компании, подкрепленное количественными расчетами, позволит принимать рациональные и обоснованные решения в процессе практической работы [5], [6].

Основной задачей описываемого исследования является выявление механизмов, лежащих в основе управления флотом контейнерной линии. Необходимо отметить, что в понятие флота (парка) такой компании входят не только суда, осуществляющие транспортировку контейнеров между портами, но и флот (парк) — контейнеры, которые также являются специализированными транспортными средствами [7], [8]. При организации нового маршрута судоходной компании

необходимо решить, какое количество судов и какой вместимости необходимо поставить на данное направление, а также оценить, какое количество контейнеров необходимо добавить в систему. В зависимости от того, какую конфигурацию контейнерного сервиса выберет компания, будет изменяться не только необходимое количество судов и контейнеров, но и время доставки груза. В данной работе рассматриваются основные математические зависимости, определяющие состав флота контейнерной линии.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для выявления основных закономерностей следует рассмотреть упрощенный пример. Пусть некоторая контейнерная линия ii работает между двумя портами (рис. 1).

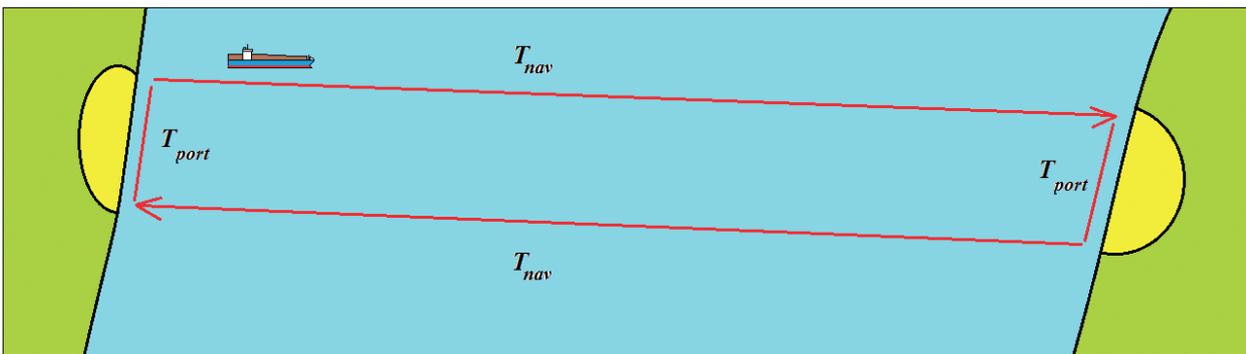


Рис. 1. Контейнерная линия

При организации линейного сервиса собственнику компании необходимо определить, какое количество контейнеров должно находиться в его распоряжении для нормального функционирования контейнерной линии. Количество контейнеров в обороте зависит от физических характеристик маршрута и количества работающих на данной линии судов.

Пусть грузооборот каждого порта составляет Q_i , TEU/год, расстояние между портами — D_i , морских миль, на линии используются суда вместимостью V_i , TEU, со скоростью хода s_i , уз, которые обрабатываются в порту в течение t_i , сут. Суточная скорость судна составит $S_i = 24s_i$ миль, и, следовательно, время хода — $T_i^{\text{ход}} = \frac{D_i}{24s_i}$.

Время выполнения кругового рейса, сут, в данном случае составит

$$T_i^{\text{рейс}} = 2(T_i^{\text{ход}} + t_i) = 2\left(\frac{D_i}{24s_i} + t_i\right). \quad (1)$$

За год судно будет способно совершить $n_i = \frac{365}{T_i^{\text{рейс}}}$ круговых рейсов, каждый из которых связан с одним заходом в порт на конце маршрута. Требуемое для реализации грузопотока общее количество судозаходов за год составляет $N_i = \frac{Q_i}{V_i}$, откуда необходимое для работы на линии количество судов $m_i = \frac{N_i}{n_i}$.

В каждый момент времени на борту всех судов линии находится $x_i = m_i V_i$ контейнеров, измеренных в TEU. Кроме того, при среднем сроке хранения t_i , необходимом для накопления и расформирования каждой судовой партии, требуется $y_i = v_i \frac{\tau_i}{T_i^{\text{инт}}}$ контейнеров, где $T_i^{\text{инт}} = \frac{365}{N_i}$ — средний интервал судозахода. Отсюда общее число контейнеров z_i , необходимое для работы линии, составляет

$$Z_i = x_i + 2y_i \quad (2)$$

Пусть с каждым портом i связаны $l_{i,j}$ фидерных линий, каждая из которых имеет относительную долю в грузопотоке α_j , т. е. $Q_{i,j} = \alpha_j Q_i$, как условно показано на рис. 2.

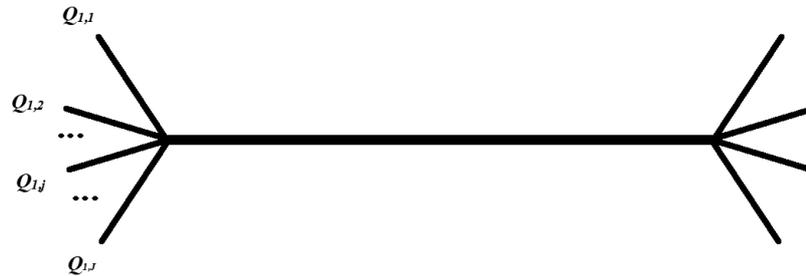


Рис. 2. Магистральная и фидерные линии

Для каждой фидерной линии все приведенные ранее рассуждения остаются в силе, но хранение партии груза в порту сопряжения должно быть исключено из рассмотрения. Таким образом, для работы на фидерной линии требуется $z_{i,j} = x_{i,j} + y_{i,j}$ контейнеров. Окончательно общее количество контейнеров, необходимое для работы одной магистральной линии и связанных с ней фидерных линий, определяется в соответствии с выражением

$$z_i = x_i + 2y_i + \sum_{j=1}^J (x_{i,j} + y_{i,j}). \quad (3)$$

Аналогичные рассуждения могут быть справедливы также для анализа процесса перевозки между портом и точками зарождения / потребления грузопотоков (рис. 3).

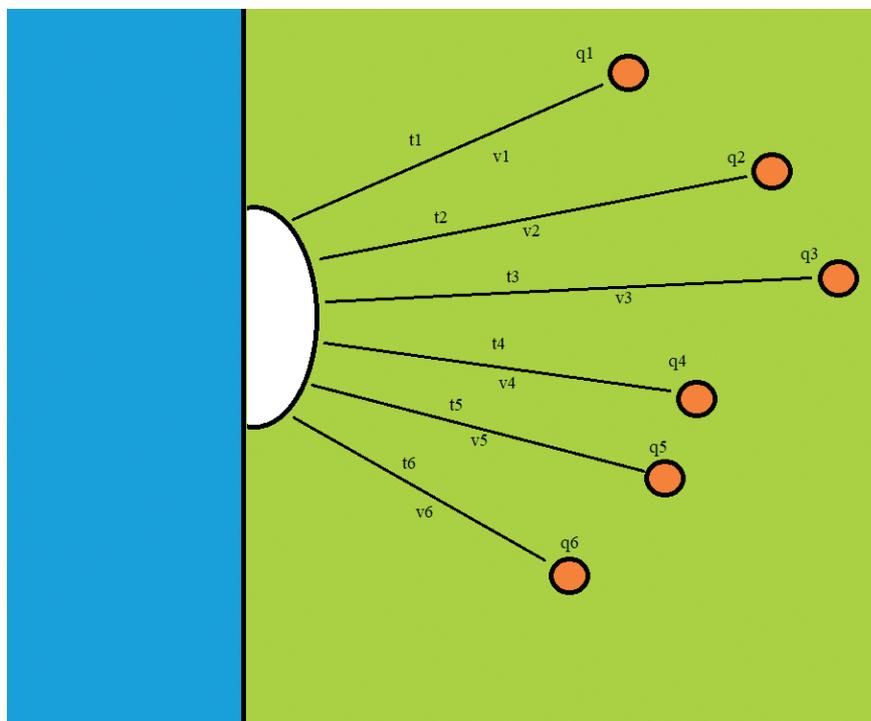


Рис. 3. Хинтерленд порта

Общее количество контейнеров с учетом линий наземного распределения будет определяться выражением

$$Z = x_i + 2y_i + \sum_{j=1}^J (x_{i,j} + y_{i,j}) + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (x_{i,j,k} + y_{i,j,k}), \quad (4)$$

где $x_{i,j,k}$ — количество груза, находящееся в движении на маршруте из конечного фидерного порта j магистральной линии i в некоторую точку k в его хинтерленде, определяемое исходя из объема груза в этом направлении, длины маршрута и скорости движения; $y_{i,j,k}$ — объем единовременного хранения в этом пункте.

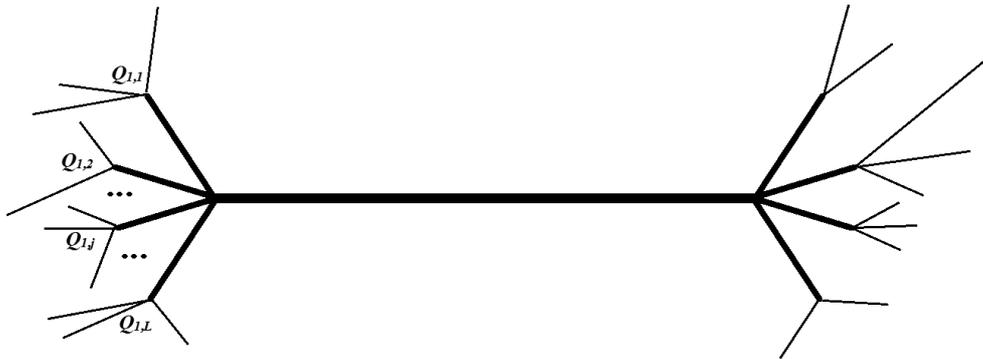


Рис. 4. Магистральная линия, фидерные линии и наземное распределение

Пример подобной конфигурации показан на рис. 4.

Результаты (Results)

Рассмотрим упрощенную систему морских маршрутов контейнерного грузораспределения типа хаб-ступицы (рис. 5).

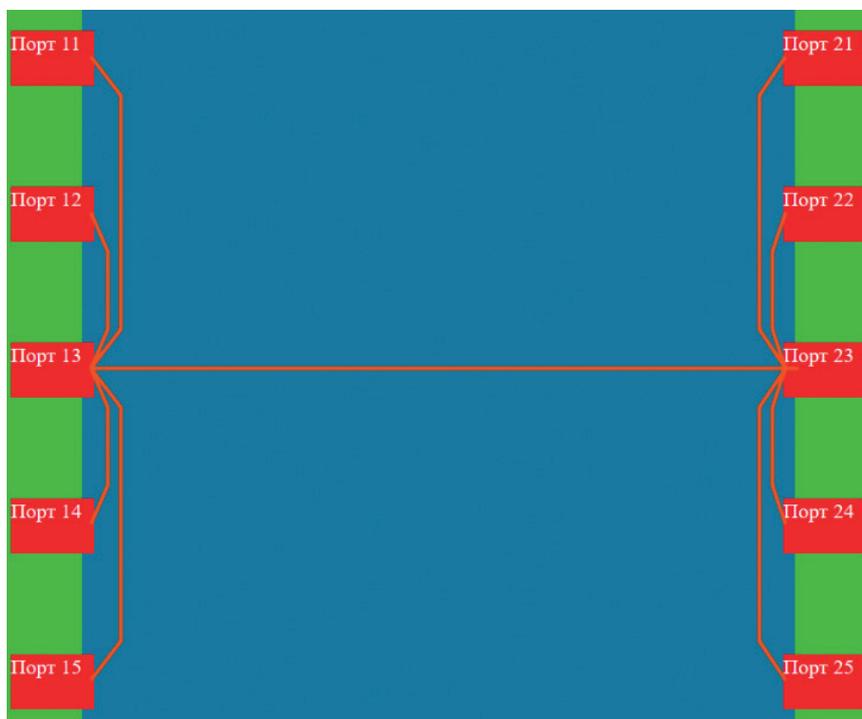


Рис. 5. Система контейнерного грузораспределения

Пусть грузооборот портов-хабов составляет 1 000 000 TEU. Дистанции между терминалами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расстояние между терминалами

Наименование маршрута	Тип маршрута	Расстояние, мили
Порт 13 – Порт 11	Фидерный	500
Порт 13 – Порт 12	Фидерный	250
Порт 13 – Порт 14	Фидерный	250
Порт 13 – Порт 15	Фидерный	500
Порт 13 – Порт 23	Магистральный	1000
Порт 23 – Порт 22	Фидерный	500
Порт 23 – Порт 22	Фидерный	250
Порт 23 – Порт 24	Фидерный	250
Порт 23 – Порт 25	Фидерный	500

На магистральном маршруте используются суда вместимостью 10 000 TEU со средней скоростью хода 18 уз, на фидерных — суда вместимостью 1000 TEU со скоростью хода 20 уз. В данном случае количество судов, необходимое для удовлетворения спроса, составит по два судна на каждый фидерный маршрут и одно на магистральный (табл. 2).

Таблица 2

Расчет количества судов

Наименование	Размерность	Обозначение	13–23	13–11	13–12
Грузооборот	TEU/год	Q_i	1 000 000	250 000	250 000
Расстояние	Морские мили	D_i	1 000	500	250
Вместимость судна	TEU	V_i	10 000	1000	1000
Скорость	уз	s_i	18	20	20
Время обработки в порту	сут	t_i	2	2	2
Суточная скорость	Морские мили/сут	S_j	432	480	480
Время хода	сут	$T_i^{\text{ход}}$	2	1	1
Время кругового маршрута	сут	$T_i^{\text{рейс}}$	9	6	5
Количество рейсов судна в год	1/год	n_i	42	60	72
Необходимое количество рейсов	Ед.	N_j	50	125	125
Необходимое количество судов	Ед.	m_j	1	2	2

Исходя из этого, количество контейнеров, необходимое для обработки заданного грузооборота, составит 12 тыс. TEU на магистральном маршруте и по 7 тыс. TEU на фидерных маршрутах (табл. 3).

Таблица 3

Расчет количества контейнеров

Наименование	Размерность	Обозначение	13–23	13–11	13–12
Количество контейнеров на борту судна	TEU	x_i	11 821	2 083	1 727
Срок накопления партии	сут	τ_i	7	7	7
Интервалы между судозаходами	сут	T_u^{int}	7	3	3
Количество контейнеров, хранящихся в порт	TEU	y_i	9 589	2 397	2 397
Общее количество контейнеров	TEU	z_i	11 821	6 878	6 521

Таким образом, общее количество контейнеров, необходимое для обеспечения заданного грузооборота контейнерной линии, составит: $11821 + 4 \cdot 6878 + 4 \cdot 6521 = 65417$ TEU.

Обсуждение (Discussion)

Приведенные в работе рассуждения справедливы для равномерного грузопотока. В то же время контейнерные перевозки могут характеризоваться существенными разбросами в объемах отправляемых контейнерных партий. Эти разбросы могут оказать существенное влияние на необходимое количество контейнеров, используемых на линии. Для учета таких флуктуаций необходимо использовать методы имитационного моделирования, которые позволяют получить распределение плотности вероятности потребности в контейнерах (рис. 6).

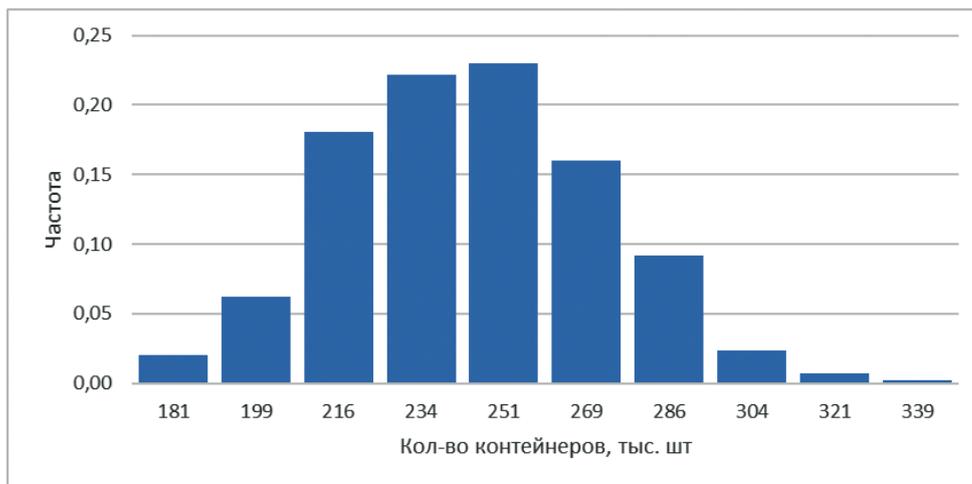


Рис. 6. Гистограмма распределения вероятности потребности в контейнерах

Кроме того, приведенные в работе рассуждения справедливы также для простых систем линейного судоходства, когда один маршрут связывает только два порта. В то же время в современных системах контейнерного грузораспределения, как правило, используются сложные круговые маршруты, включающие большое количество портов с разными объемами грузопотоков [9], [10]. Следовательно, данный подход должен быть дополнен возможностью сравнения различных конфигураций контейнерного сервиса.

Выводы (Conclusions)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В основе управления современной системы контейнерного грузораспределения лежит оптимальная расстановка флота судоходной компании и распределение контейнерного оборудования.
2. Изменение конфигурации и принципов организации линейного сервиса коренным образом меняет структуру требуемых затрат и качество предоставляемых услуг.
3. Основной количественной оценкой для сравнения разных схем организации линейного сервиса является количество судов и контейнеров, необходимых для обеспечения заданного грузопотока.
4. Рассмотренные в работе принципиальные зависимости могут быть использованы для проведения анализа более сложных систем контейнерного грузораспределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fremont A. Global maritime networks: The case of Maersk / A. Fremont // Journal of Transport Geography. — 2007. — Vol. 15. — Is. 6. — Pp. 431–442. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2007.01.005.
2. Ha Y. S. An analysis of the competitiveness of major liner shipping companies / Y. S. Ha, J. S. Seo // The Asian Journal of Shipping and Logistics. — 2017. — Vol. 33. — Is. 2. — Pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.ajsl.2017.06.002.

3. Slack B. Strategic alliances in the container shipping industry: a global perspective / B. Slack, C. Comtois, R. McCalla // *Maritime Policy & Management*. — 2002. — Vol. 29. — Is. 1. — Pp. 65–76. DOI: 10.1080/03088830110063694.
4. Xu F. Game theory analysis of container port alliance / F. Xu, H. Lu, N. Ding, J. Liu // *Journal of Coastal Research*. — 2015. — Is. 73 (10073). — Pp. 635–640. DOI: 10.2112/SI73–110.1.
5. Panayides P. M. Maritime logistics and global supply chains: towards a research agenda / P. M. Panayides // *Maritime Economics & Logistics*. — 2006. — Vol. 8. — Is. 1. — Pp. 3–18. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100147.
6. Agarwal R. Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping / R. Agarwal, Ö. Ergun // *Transportation Science*. — 2008. — Vol. 42. — Is. 2. — Pp. 175–196. DOI: 10.1287/trsc.1070.0205.
7. Grzelakowski A. S. Global container shipping market development and Its impact on mega logistics system / A. S. Grzelakowski // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2019. — Vol. 13. — No. 3. — Pp. 529–535. DOI: 10.12716/1001.13.03.06.
8. Anwar S. T. Global strategy gone astray: Maersk’s big box boats and the world shipping industry / S. T. Anwar // *Thunderbird International Business Review*. — 2020. — Vol. 62. — Is. 2. — Pp. 183–196. DOI: 10.1002/tie.22115.
9. Кузнецов А. Л. Оценка времени доставки в сложных цепях поставки с помощью моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.
10. Larsen R. B. Model predictive control for simultaneous planning of container and vehicle routes / R. B. Larsen, B. Atasoy, R. R. Negenborn // *European Journal of Control*. — 2021. — Vol. 57. — Pp. 273–283. DOI: 10.1016/j.ejcon.2020.06.003.

REFERENCES

1. Fremont, Antoine. “Global maritime networks: The case of Maersk.” *Journal of Transport Geography* 15.6 (2007): 431–442. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2007.01.005.
2. Ha, Yeong Seok, and Jung Soo Seo. “An analysis of the competitiveness of major liner shipping companies.” *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 33.2 (2017): 53–60. DOI: 10.1016/j.ajsl.2017.06.002.
3. Slack, Brian, Claude Comtois, and Robert McCalla. “Strategic alliances in the container shipping industry: a global perspective.” *Maritime Policy & Management* 29.1 (2002): 65–76. DOI: 10.1080/03088830110063694.
4. Xu, Fangqin, Haifeng Lu, Nan Ding, and Jingao Liu. “Game theory analysis of container port alliance.” *Journal of Coastal Research* 73 (10073) (2015): 635–640. DOI: 10.2112/SI73-110.1
5. Panayides, Photis M. “Maritime logistics and global supply chains: towards a research agenda.” *Maritime Economics & Logistics* 8.1 (2006): 3–18. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100147/
6. Agarwal, Richa, and Özlem Ergun. “Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping.” *Transportation Science* 42.2 (2008): 175–196. DOI: 10.1287/trsc.1070.0205.
7. Grzelakowski, A. S. “Global container shipping market development and Its impact on mega logistics system.” *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 13.3 (2019): 529–535. DOI: 10.12716/1001.13.03.06.
8. Anwar, Syed Tariq. “Global strategy gone astray: Maersk’s big box boats and the world shipping industry.” *Thunderbird International Business Review* 62.2 (2020): 183–196. DOI: 10.1002/tie.22115.
9. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. “Evaluating lead-time in complex supply chains by simulation technique.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.
10. Larsen, Rie B., Bilge Atasoy, and Rudy R. Negenborn. “Model predictive control for simultaneous planning of container and vehicle routes.” *European Journal of Control* 57 (2021): 273–283. DOI: 10.1016/j.ejcon.2020.06.003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Aleksandr L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Кириченко Александр Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: KirichenkoAV@gumrf.ru
Семенов Антон Денисович — диспетчер
ООО «Логистический парк «Янино»
Российская Федерация, Ленинградская область,
Всеволожский район, д. Янино-1,
Торгово-логистическая зона «Янино-1», № 1
e-mail: asemyonov054@gmail.com

Kirichenko, Aleksandr V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: KirichenkoAV@gumrf.ru
Semenov, Anton D. — Dispatcher
Yanino Logistics Park LLC
Vsevolzhsky District, Yanino-1 village,
Trade and logistics zone Yanino-1, No. 1,
Leningrad Region, Russian Federation
e-mail: asemyonov054@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 12 июля 2021 г.
Received: July 12, 2021.*

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-548-558

PROPELLER SHAFT LINE DYNAMICS AT ACCELERATION MODE

S. N. Tzarenko¹, A. N. Rak², B. N. Bezlobenko³

¹ — Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

² — Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

³ — Petropavlovsk-Kamchatsky Shipyard, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

The results of the study of the dynamic forces that arise in the shafting when the main engine is brought into the nominal operating mode are presented in the work. The design scheme of the shafting is an elastic homogeneous rod with a distributed moment of inertia. The left end of the shaft rotates according to a given law of motion, on the right end there is a screw in the form of an inert disk, on which a moment of resistance acts proportional to the square of the angular velocity. The mathematical model of the stress-strain state of the shaft is represented by a nonlinear differential equation of the second order in partial derivatives. For the practical calculation of the mathematical model, assumptions that make it possible to simplify the mathematical model are introduced. The solution of a simplified mathematical model is obtained by the Fourier method for eigenfunctions orthogonal to weight. The law of motion of the left end of the shaft, simulating the acceleration of the main engine, is taken as an exponential function. For an example of the calculation, the energy-mechanical characteristics of a large freezing fishing trawler MECHANIC KOVTUN are taken. The results of the study have showed that the dynamic forces can be many times higher than the nominal value if the main engine is accelerated during several periods of the main form of natural vibrations of the shafting. The dynamic effect is small at a slow acceleration of the main engine, reaching the rated speed for more than twenty periods of the main mode of oscillation. The proposed mathematical model can also be used to study the stress-strain state of the shafting under various dynamic loads, such as: the propeller leaves the water, it gets into an inhomogeneous incoming flow of water, the propeller hits ice, resonant vibrations during pulsating engine operation, etc.

Keywords: shaft line, acceleration mode, mathematical model, dynamic forces, torsional vibrations, natural frequency, dissipative forces, Fourier method.

For citation:

Tzarenko, Sergey N., Alexander N. Rak, and Boris N. Bezlobenko. "Propeller shaft line dynamics at acceleration mode." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 548–558. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-548-558.

УДК 539.3/.6:629.1

ДИНАМИКА ВАЛОПРОВОДА ГРЕБНОГО ВИНТА ПРИ РАЗГОННЫХ РЕЖИМАХ

С. Н. Царенко¹, А. Н. Рак², Б. Н. Безлобенко³

¹ — Камчатский государственный технический университет,
г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

² — Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

³ — Петропавловск-Камчатский судоремонтный завод,
г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

В работе приведены результаты исследования динамических усилий, возникающих в валопроводе при вводе главного двигателя в номинальный режим работы. Расчетная схема валопровода представляет собой упругий однородный стержень с распределенным моментом инерции. Левый торец стержня поворачивается по заданному закону движения, на правом торце расположен винт в виде инертного диска, на который действует момент сопротивления, пропорциональный квадрату угловой скорости. Математическая модель напряженно-деформированного состояния вала представлена нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных. Для практической реализации математической модели

предложен ряд допущений, которые позволяют ее упростить. Решение упрощенной математической модели получено методом Фурье для собственных функций, ортогональных с весом. Закон движения левого торца вала, имитирующий разгон главного двигателя, принят в виде экспоненциальной функции. В качестве примера для расчета использованы энергомеханические характеристики большого морозильного рыболовного траулера «Механик Ковтун». Результаты исследования показали, что динамические усилия могут многократно превышать номинальное значение, если разгон главного двигателя осуществляется в течение нескольких периодов главной формы собственных колебаний валопровода. При плавном разгоне главного двигателя с выходом на номинальную частоту вращения за время, превышающее двадцать периодов главной формы собственных колебаний, динамический эффект становится несущественным. Предложенная математическая модель также может быть использована для исследования напряженно-деформированного состояния валопровода при различных динамических воздействиях, таких как выход винта из воды, попадание в неоднородный набегающий поток, удар винта о лед, резонансные колебания при пульсирующей работе двигателя и др.

Ключевые слова: валопровод, режим разгона, математическая модель, динамические усилия, крутильные колебания, собственная частота, диссипативные силы, метод Фурье.

Для цитирования:

Царенко С. Н. Динамика валопровода гребного винта при разгонных режимах / С. Н. Царенко, А. Н. Рак, Б. Н. Безлобенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 548–558. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-548-558.

Введение (Introduction)

Валопровод является одним из наиболее нагруженных узлов, входящих в состав судовых энергетических установок. Основной функцией валопровода является передача крутящего момента от главного двигателя (ГД) движителю. Помимо кручения он подвергается также продольным и поперечным нагрузкам, которые имеют как статическую, так и динамическую составляющие [1]. Расчет на статические нагрузки не вызывает трудностей и выполняется классическими методами сопротивления материалов. Учету динамических нагрузок, в силу многообразия условий их возникновения, посвящены исследования как признанных, так и современных ученых, краткий исторический обзор развития теории исследования крутильных колебаний валопроводов представлен в работе [2].

Как правило, систему подвижных узлов при исследовании ее динамики рассматривают изолированно, соединенной жестко [1], [3]–[6] или упруго [7], [8] с корпусом судна, при этом может дополнительно учитываться гироскопический эффект от движения судна в целом [4], [7]. Традиционно сформировалось несколько подходов к решению задачи крутильных колебаний, но общие требования к выполнению расчетов регламентированы Регистром судоходства¹. Наиболее распространенным является *метод дискретизации*, суть которого состоит в том, что все конструктивные элементы валопровода, включая подвижные узлы ГД, соединительные муфты, гребной винт и другие механизмы, заменяются системой инертных дисков, соединенных между собой упругими связями [1]–[3], [5], [6]. Данная модель отработана для типовых схем и хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований [9]. Помимо упругих связей в нее могут быть включены демпфирующие элементы [3], [6]. Однако этот подход имеет свои недостатки, а именно точность определения динамических усилий зависит от уровня дискретизации модели, а кроме того, учитывая, что для ее расчета в основном используют численные методы, возникает проблема с верификацией результатов, особенно при появлении нелинейных членов в уравнениях.

Альтернативой метода дискретизации является рассмотрение валопровода как системы с распределенными и сосредоточенными массами. В этом случае динамическая задача сводится к решению дифференциального уравнения второго – четвертого порядка в частных производных, для решения которого используют точные и приближенные методы расчета [10]. Данный подход не получил широкого распространения при исследовании динамики крутильных колебаний, но успешно используется для решения задач изгибных колебаний валопровода [8], [11]. В работе [12]

¹ Правила классификации и постройки морских судов. Ч. VII. Механические установки. НД № 2-020101-124. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2020. 106 с.

модальный анализ роторной системы выполнен с использованием программного комплекса объектного моделирования на основе метода конечных элементов. Преимуществом такого подхода является возможность получения полного спектра частот собственных крутильных, продольных и изгибных колебаний на базе одной модели. Однако сложно судить о качестве такого расчета без четкого обоснования выбора типа элемента, плотности сетки при разбивке на элементы, назначения граничных условий и задания шага времени для динамических задач.

В существующих динамических расчетах собственные колебания, как правило, не учитывают, так как из-за множественного действия диссипативных сил они являются быстро затухающими [1], при этом исключение составляет исследование резонансных явлений [3], [6]. Тем не менее в теории строительных конструкций известно, что кратковременно динамический эффект, в котором значительную роль играют собственные колебания, в случаях удара или внезапного приложения нагрузки может приводить к увеличению внутренних усилий в два раза и более [13], [14]. В работе [15] при статистическом анализе повреждений валопроводов указывается факт значительных нагрузок в режиме запуска дизельного двигателя, а также при зигзагообразных маневрах. В трудах [16], [17] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований динамики гребного винта и валопровода для различных типов силового воздействия, включая импульсное. Тем не менее в специальной или отраслевой литературе в полной мере данный вопрос не раскрыт, а множественные повреждения и интенсивный износ узлов валопровода лишь подтверждают актуальность дальнейших исследований в этом направлении.

Целью работы является определение условий возникновения динамических усилий в валопроводе в режиме разгона ГД.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Систему, состоящую из гребного и промежуточных валов, будем рассматривать как однородный упругий стержень длиной l с крутильной жесткостью GJ_p и равномерно распределенным по длине моментом инерции масс γJ_p (рис. 1). С правой стороны вала располагается гребной винт с моментом инерции I_M , а также действует момент гидродинамического сопротивления, пропорциональный квадрату угловой скорости:

$$M_c = R_c \left(\frac{\partial \psi(l, t)}{\partial t} \right)^2,$$

где R_c — коэффициент, учитывающий физические свойства среды и геометрию винта, который ориентировочно определяется через номинальную угловую скорость и мощность на винте [18]; $\psi(l, t)$ — угол поворота винта; t — время.

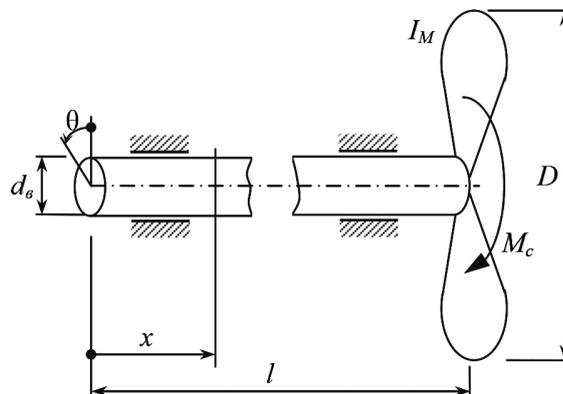


Рис. 1. Расчетная схема валопровода

Левый торец стержня поворачивается по заданному закону движения: $\theta = f(t)$ (см. рис. 1), моделирующего разгон ГД. Дифференциальное уравнение движения сечений вала можно представить в виде [19]:

$$GJ_p \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \gamma J_p \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + \mu_1 \frac{\partial^3 \psi}{\partial t \partial x^2} - \mu_2 \frac{\partial \psi}{\partial t} - R_c \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2 \delta(x-l) = m(x, t), \quad (1)$$

где ψ — угол поворота произвольного сечения вала; μ_1 и μ_2 — коэффициенты, характеризующие внутреннее и внешнее затухание соответственно (для рассматриваемой задачи ограничимся случаем: $\mu_{1,2} = 0$; $m(x, t) = 0$); $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака; $m(x, t)$ — интенсивность внешнего скручивающего момента; x — продольная координата.

Движение произвольного сечения вала будем рассматривать как сложное, состоящее из переносного движения левого торца вала и относительного движения деформации вала. Тогда углы поворота для произвольного сечения будут определяться зависимостью

$$\psi = \theta + \varphi, \quad (2)$$

где φ — угол закручивания.

Подставляя выражение (2) в уравнение (1), а также учитывая, что угол θ не зависит от продольной координаты, получим уравнение относительно углов закручивания:

$$GJ_p \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \gamma J_p \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \left(2R_c \frac{\partial \theta}{\partial t} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + R_c \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 \right) \times \\ \times \delta(x-l) = \gamma J_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + R_c \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 \delta(x-l). \quad (3)$$

Зависимость (3) является нелинейным неоднородным уравнением с переменным коэффициентом, аналитическое решение которого для общего случая неизвестно. С целью упрощения этого уравнения введем следующие допущения:

1) будем полагать, что $\dot{\varphi} \ll \dot{\theta}$, это позволит исключить из уравнения нелинейный член;

2) учитывая, что первое слагаемое в скобках по своей сути соответствует локально-действующей диссипативной силе, и при выходе на номинальную скорость $\dot{\theta}_{\text{ном}}$ будет происходить гашение колебаний ($\dot{\varphi} \rightarrow 0$), вместо мгновенной будем использовать среднюю скорость в течение рассматриваемого промежутка времени $\Delta t = t_2 - t_1$, $\dot{\theta}_{\text{cp}} = \frac{\theta(t_2) - \theta(t_1)}{\Delta t}$;

3) гидродинамический момент сопротивления для колебательной составляющей движения будем рассматривать как внешнюю нагрузку, т. е. не входящим в граничное условие.

В уравнении (3) для удобства перейдем к безразмерным величинам и с учетом принятых допущений получим

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \tau^2} = 2\mu \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} \delta(\xi-1) + \tilde{R}_c \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right)^2 \delta(\xi-1) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2}. \quad (4)$$

Здесь $\xi = x/l$ — безразмерная координата; $\tau = tc/l$ — безразмерное время, $c = \sqrt{GJ_p / \gamma J_p}$ — скорость распространения крутильных волн в стержне [14]; $\mu = \frac{R_c \dot{\theta}_{\text{cp}} c}{GJ_p}$; $\tilde{R}_c = \frac{R_c c^2}{GJ_p l}$.

В справочнике [1] приведена ступенчатая диаграмма ввода дизельного двигателя в режим полного хода, в соответствии с которой наиболее подходящей для описания режима разгона при выводе на номинальную угловую скорость $\dot{\theta}_{\text{ном}}$ на каждой ступени будет экспоненциальная функция вида

$$\dot{\theta}(\tau) = \dot{\theta}_{\text{ном}} (1 - e^{-\alpha \tau}). \quad (5)$$

Здесь α — параметр, который зависит от времени выхода на номинальную скорость.

Тогда закон движения левого торца стержня можно представить в виде

$$\theta(\tau) = \dot{\theta}_{\text{ном}} \frac{l}{c} \left(\tau - \frac{1 - e^{-\alpha \tau}}{\alpha} \right). \quad (6)$$

В дальнейшем точкой будем обозначать производную по τ , штрихом — по ξ . Для определения динамических усилий необходимо решить граничную задачу (4):

$$\varphi(0, \tau) = 0;$$

$$\frac{GJ_p}{l} \varphi'(1, \tau) = \frac{I_M c^2}{l^2} \dot{\varphi}(1, \tau), \quad (7)$$

с однородными начальными условиями:

$$\varphi(\xi, 0) = 0; \quad \dot{\varphi}(\xi, 0) = 0. \quad (8)$$

Согласно методу Фурье, решение уравнения (4) найдем в виде ряда произведения функций:

$$\varphi(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(\xi) w_n(\tau). \quad (9)$$

Собственные функции Φ_n возьмем такими, которые удовлетворяют уравнению вида [19]:

$$\Phi_n'' + \lambda_n^2 \Phi_n = 0, \quad (10)$$

где λ_n — собственные значения.

С учетом первого граничного условия (7) решение уравнения (10) можно представить в виде

$$\Phi_n(\xi) = \frac{\sin \lambda_n \xi}{\lambda_n}. \quad (11)$$

Из второго граничного условия (7) получим уравнение для нахождения собственных значений:

$$\tan \lambda_n = \frac{1}{\zeta \lambda_n}. \quad (12)$$

Здесь $\zeta = I_M / (\gamma J_p l)$ — относительная инерционная нагрузка.

Собственные функции (11) будут ортогональны с весом $\rho(\xi) = 1 + \zeta \delta(1 - \xi)$ [14]. Подставив ряд (9) в выражение (4), умножив его обе части на $\rho \Phi_n$ и взяв интеграл по длине, получим уравнение для нахождения функций w_n :

$$\ddot{w}_n + 2\tilde{\mu}_n \dot{w}_n + \lambda_n^2 w_n = -\frac{\tilde{K}_c \Phi_n(1)}{\Delta_n^2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right)^2 + \frac{1}{\Delta_n^2 \lambda_n^2} (\Phi_n'(1) - \Phi_n'(0) - \zeta \lambda_n^2 \Phi_n(1)) \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2}, \quad (13)$$

где $\Delta_n^2 = (2\lambda_n - \sin 2\lambda_n + 4\zeta \lambda_n \sin^2 \lambda_n) / (4\lambda_n^3)$ — квадрат нормы собственных функций [14]; $\tilde{\mu}_n =$

$$= \mu \Phi_n(1) / \Delta_n^2.$$

С учетом зависимостей (5) и (6) общее решение уравнения (13) запишется в виде

$$w_n(\tau) = A_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \sin \beta_n \tau + B_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \cos \beta_n \tau + C_n e^{-2\alpha \tau} + D_n e^{-\alpha \tau} + E_n, \quad (14)$$

где $\beta_n = \sqrt{\lambda_n^2 - \tilde{\mu}_n^2}$; A_n, B_n — произвольные постоянные, определяемые из начальных условий (8); C_n, D_n, E_n — коэффициенты, определяемые из равенства значений при соответствующих функциях левой и правой части уравнения (13) (в силу громоздкости выражений значения коэффициентов A_n, B_n, C_n, D_n, E_n в статье не приводятся).

Принимая во внимание ранее введенные обозначения, спектр частот собственных колебаний определяется по формуле

$$\omega_n = \beta_n c / l. \quad (15)$$

С учетом зависимостей (2), (9), (11) и (14) выражения для углов поворота, угловых скоростей и крутящих моментов произвольных сечений вала можно представить в виде

$$\psi(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \lambda_n \xi}{\lambda_n} (A_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \sin \beta_n \tau + B_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \cos \beta_n \tau + C_n e^{-2\alpha \tau} + D_n e^{-\alpha \tau} + E_n) + \dot{\theta}_{\text{ном}} \frac{l}{c} \left(\tau - \frac{1 - e^{-\alpha \tau}}{\alpha} \right); \quad (16)$$

$$\dot{\psi}(\xi, \tau) = \frac{c}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \lambda_n \xi}{\lambda_n} \times \quad (17)$$

$$\times (e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \cos \beta_n \tau (\beta_n A_n - \tilde{\mu}_n B_n) - e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \sin \beta_n \tau (\tilde{\mu}_n A_n + \beta_n B_n) - 2\alpha C_n e^{-2\alpha \tau} - \alpha D_n e^{-\alpha \tau}) + \dot{\theta}_{\text{ном}} (1 - e^{-\alpha \tau});$$

$$M(\xi, \tau) = \frac{GJ_p}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \cos \lambda_n \xi \times \quad (18)$$

$$\times (A_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \sin \beta_n \tau + B_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \cos \beta_n \tau + C_n e^{-2\alpha \tau} + D_n e^{-\alpha \tau} + E_n).$$

Динамический коэффициент примем как отношение крутящего момента в сечении вала к номинальному моменту сопротивления:

$$K_d(\xi, \tau) = \frac{GJ_p}{l R_c \dot{\theta}_{\text{ном}}^2} \sum_{n=1}^{\infty} \cos \lambda_n \xi (A_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \sin \beta_n \tau + B_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \cos \beta_n \tau + C_n e^{-2\alpha \tau} + D_n e^{-\alpha \tau} + E_n). \quad (19)$$

Результаты (Results)

В качестве примера рассмотрим механические характеристики БМРТ большого морозильного рыболовного траулера «Механик Ковтун»: диаметр гребного винта $D = 4$ м; момент инерции винта с присоединенной водой $I_M = 3226$ кг·м²; номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 156$ об/мин ($\dot{\theta}_{\text{ном}} = 16,3$ рад/с), номинальная мощность на винте $N_{\text{ном}} = 2650$ кВт, длина валопровода (промежуточного и гребного валов) $l = 11,35$ м; приведенная жесткость валопровода $GJ_p = 1,33 \cdot 10^8$ Н·м²; распределенный момент инерции валопровода $\gamma J_p = 13$ кг·м (относительная инерционная нагрузка $\zeta = I_M / (\gamma J_p l) \approx 22$), скорость распространения волн крутильных колебаний в стальном стержне $c = 3200$ м/с; по номинальной мощности и угловой скорости определяем коэффициент R_c :

$$R_c = N_{\text{ном}} / \dot{\theta}_{\text{ном}}^3 = 587 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

В результате решения уравнения (12) значения первых трех собственных чисел составят:

$$\lambda_1 = 0,212; \lambda_2 = 3,16; \lambda_3 = 6,29.$$

Рассмотрим случай, когда винт выходит на 95 % номинальной скорости вращения за время, сопоставимое с периодом главной формы колебаний:

$$T_p = 2\pi l / (\lambda_1 c) = 0,105 \text{ с}.$$

Для этого случая параметры модели будут принимать значения: $\alpha = 0,1$; $\dot{\theta}_{\text{сп}} = 11,2$ рад/с; $\mu = 0,158$; $\tilde{R}_c = 3,98$; $\tilde{\mu}_1 = 7,11 \cdot 10^{-3}$; $\beta_1 \approx 0,212$, для последующих форм колебаний $\tilde{\mu}_n$ убывает, а β_n мало отличается от λ_n .

На графике (рис. 2, а) штриховой линией показан угол поворота левого торца вала в соответствии с законом движения (6), сплошной линией — угол поворота правого торца вала согласно зависимости (16). Аналогичные зависимости для угловых скоростей (5) и (17) представлены на графике (рис. 2, б). На рис. 3 приведена эпюра крутящих моментов для момента времени $t = 0,053$ с. Как видно из графика, изменение крутящих моментов по длине вала является незначительным. Зависимость для динамического коэффициента (19) на левом торце вала ($\xi = 0$) представлена на графике (рис. 4, а). Для рассматриваемых параметров модели $K_d \approx 11$. Из приведенных на рис. 2–4 графиков следует, что для принятого режима разгона динамический эффект, являющийся весьма существенным, приведет к поломке оборудования, однако практически реализовать такой режим разгона крайне сложно.

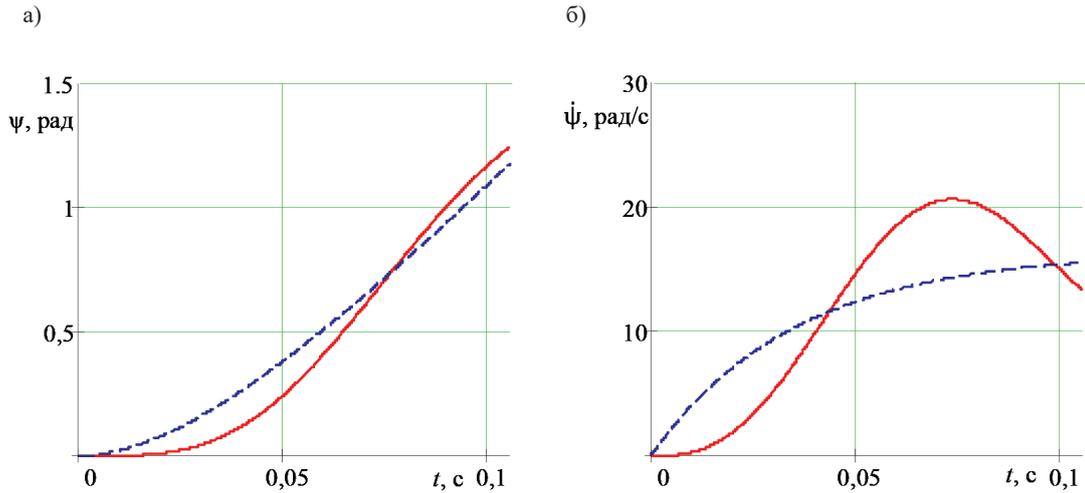


Рис. 2. Углы поворота (а) и угловые скорости торцевых сечений валопровода (б)

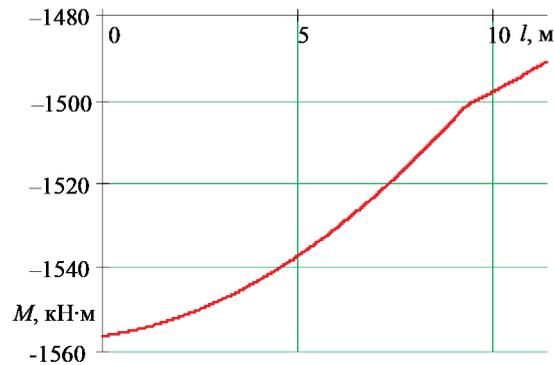


Рис. 3. Эпюра крутящих моментов

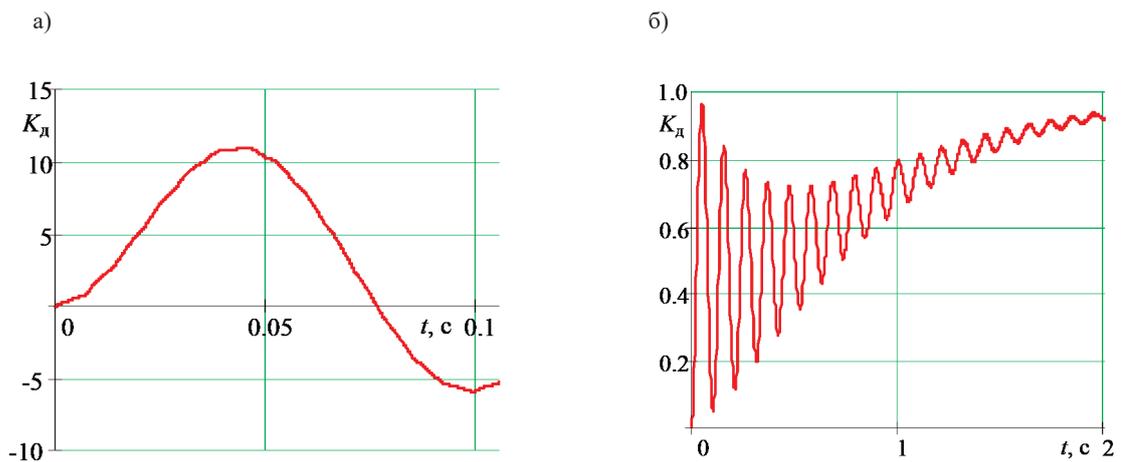


Рис. 4. Динамические коэффициенты при разгоне вала за время $T_p = 0,105$ с (а) и $T_p = 2$ с (б)

С увеличением времени разгона динамический эффект значительно убывает. Так, если осуществить выход на 95 % номинальной скорости за время в пределах, равных девятнадцати периодам главной формы колебаний ($\alpha = 0,0055$; $T_p = 2$ с), то динамический коэффициент не превысит единицы (рис. 4, б).

На рис. 5 показаны скорости в торцевых сечениях, при этом наложение кривых на графике указывает, что сечения вала в данном случае поворачиваются практически тождественно.

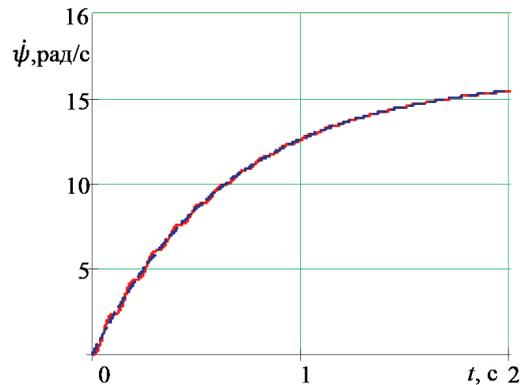


Рис. 5. Угловые скорости торцевых сечений валопровода для времени $T_p=2$ с

Обсуждение (Discussion)

В данной работе исследования выполняются на основе упрощенной математической модели (4). Оценить адекватность принятых допущений для конкретных параметров модели можно сопоставляя значения величин по результатам расчета. Так, например, значения $\dot{\varphi}$ и $\dot{\theta}$ имеют примерно один порядок лишь в течение первого полупериода собственных колебаний, а в дальнейшем $\dot{\varphi}$ не превышает $0,1 \dot{\theta}$. Однако для более объективной оценки погрешности, которую вносят принятые допущения, необходимы дополнительные теоретические исследования с использованием, например, численных методов расчета, или экспериментальные.

Еще одним упрощением в принятой модели является замена системы ступенчатых валов одним валом с эквивалентной податливостью, однако учитывая большую жесткость системы, что видно из эпюры крутящих моментов (см. рис. 3), данное допущение окажет незначительное влияние на результаты расчетов. Тем не менее при организации системы активного мониторинга работы оборудования для адекватного анализа информации, поступающей с датчиков, необходимо в дальнейшем оценить влияние ступенчатой формы валов на величину усилий и деформаций при динамических нагрузках.

Несмотря на некоторую громоздкость расчетных зависимостей, принятый в работе подход дает универсальный и эффективный метод исследования напряженно-деформированного состояния валопроводов при различных динамических воздействиях, таких как выход винта из воды, попадание в неоднородный набегающий поток, удар винта о лед, резонансные явления при пульсирующей работе двигателя и др. Данную математическую модель также можно дополнить членами, учитывающими внешнее и внутреннее трение, что является актуальным для исследований резонансных явлений и учета потерь от колебательного движения.

Заключение (Conclusion)

В работе представлена упрощенная математическая модель для описания динамики крутильных колебаний упругих стержней, которая позволяет учитывать действие как распределенных, так и локальных диссипативных сил. На основе предложенной модели выполнены исследования динамических усилий и деформаций валопровода в режиме разгона ГД. В результате исследования установлено следующее:

- динамические усилия в валопроводе существенны и могут многократно превышать значения от номинальной нагрузки, если время вывода на номинальную частоту вращения ГД сопоставимо с несколькими периодами главной формы колебаний;
- собственные колебания значительно проявляются лишь в течение короткого промежутка времени (до десяти периодов главной формы колебаний) после динамического воздействия,

а затем быстро затухают за счет сил сопротивления на винте, даже без учета потерь на внутреннее и внешнее трение в валопроводе;

– с повышением плавности ввода ГД в рабочий режим (время разгона более двадцати периодов главной формы колебаний) динамический эффект становится незначительным, не создавая дополнительных усилий в валах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Судовой механик: справ. / Под общ. ред. А. А. Фока. — Одесса: Фенікс, 2008. — Т. 1. — 1036 с.
2. Ларин А. А. Роль исследований крутильных колебаний валопроводов в развитии динамики машин / А. А. Ларин // Питання історії науки і техніки. — 2009. — № 4. — С. 2–9.
3. Коврижных М. Н. Расчет амплитуд свободных колебаний дискретных многомассовых систем / М. Н. Коврижных, С. С. Глушков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2008. — № 2. — С. 162–164.
4. Soni T. Active vibration control of ship mounted flexible rotor-shaft-bearing system during seakeeping / T. Soni, A. S. Das, J. K. Dutt // Journal of Sound and Vibration. — 2020. — Vol. 467. — Pp. 115046. DOI: 10.1016/j.jsv.2019.115046.
5. Мартянов В. В. Оценка угрозы возникновения резонансных колебаний на примере расчета крутильных колебаний судового валопровода пассажирского теплохода пр. P118 / В. В. Мартянов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368.
6. Jee J. Design Improvement of a Viscous-Spring Damper for Controlling Torsional Vibration in a Propulsion Shafting System with an Engine Acceleration Problem / J. Jee, C. Kim, Y. Kim // Journal of Marine Science and Engineering. — 2020. — Vol. 8. — Is. 6. — Pp. 428. DOI: 10.3390/jmse8060428.
7. Murawski L. Shaft line whirling vibrations: effects of numerical assumptions on analysis results / L. Murawski // Marine Technology and SNAME News. — 2005. — Vol. 42. — Is. 2. — Pp. 53–60. DOI: 10.5957/mt1.2005.42.2.53.
8. Halyavkin A. Determination of stiffness coefficient of stern shaft bearing / A. Halyavkin, I. Razov, V. Mamontov, G. Kushner // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 90. — Is. 1. — Pp. 012078. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012078.
9. Екимов А. С. Измерение крутильных колебаний валопроводов судовых энергетических установок теплоходов проекта 1741А / А. С. Екимов, Н. Г. Петрова, С. С. Глушков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2009. — № 2. — С. 228–230.
10. Тхьонг Н. М. Современное состояние вопроса о динамике судовых валопроводов (опыт Вьетнама) / Н. М. Тхьонг // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. — 1998. — № 2. — С. 95–99.
11. Мамонтов В. А. Автоматизация методики расчета собственной частоты поперечных колебаний гребного вала / В. А. Мамонтов [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 1. — С. 63–70. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-63-70.
12. Сапига В. В. Совершенствование методов анализа динамики судовых валопроводов / В. В. Сапига, А. Л. Кирюхин, П. В. Черпита // Водный транспорт. — 2014. — № 1 (19). — С. 52–61.
13. Улитин Г. М. Изгибные колебания стержня с переменной жесткостью и распределенной массой / Г. М. Улитин, С. Н. Царенко // Прикладная математика и механика. — 2015. — Т. 79. — № 6. — С. 817–823.
14. Царенко С. Н. Крутильные колебания стержневых конструкций с осевой неоднородностью геометрических характеристик / С. Н. Царенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 50–58. DOI: 10.14529/mmph190107.
15. Han H. S. Estimate of the fatigue life of the propulsion shaft from torsional vibration measurement and the linear damage summation law in ships / H. S. Han, K. H. Lee, S. H. Park // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 107. — Pp. 212–221. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.023.
16. Huang Q. Numerical modeling and experimental analysis on coupled torsional-longitudinal vibrations of a ship's propeller shaft / Q. Huang, X. Yan, Y. Wang, C. Zhang, Z. Wang // Ocean Engineering. — 2017. — Vol. 136. — Pp. 272–282. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.03.017.
17. Huang Q. Coupled transverse and torsional vibrations of the marine propeller shaft with multiple impact factors / Q. Huang, X. Yan, C. Zhang, H. Zhu // Ocean Engineering. — 2019. — Vol. 178. — Pp. 48–58. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.02.071.

18. Рак А. Н. Особенности расчета параметров вспомогательно-аварийного движения на морских судах с комбинированным дизель-электрическим двигателем / А. Н. Рак, С. Н. Царенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 115–125. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-115-125.

19. Филиппов А. П. Колебания механических систем / А. П. Филиппов. — Киев: Наукова думка, 1965. — 716 с.

REFERENCES

- Fock, A. A., ed. *Sudovoy mekhanik: sprav.* Vol. 1. Odessa: Feniks, 2008.
- Larin, A. A. “Rol’ issledovaniy krutil’nykh kolebaniy valoprovodov v razvitiy dinamiki mashin.” *Pytannya istoriyi nauky i tekhniki* 4 (2009): 2–9.
- Kovrizhnykh, M. N., and S. S. Glushkov. “Raschet amplitud svobodnykh kolebaniy diskretnykh mnogo-massovykh system.” *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal’nego Vostoka* 2 (2008): 162–164.
- Soni, Tukesh, A. S. Das, and J. K. Dutt. “Active vibration control of ship mounted flexible rotor-shaft-bearing system during seakeeping.” *Journal of Sound and Vibration* 467 (2020): 115046. DOI: 10.1016/j.jsv.2019.115046.
- Martianov, Vladimir V. “Assessment of synchronous vibrations risks as exemplified in the shafting torsional vibrations analysis for R118 project passenger ship.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368.
- Jee, Jaehoon, Chongmin Kim, and Yanggon Kim. “Design Improvement of a Viscous-Spring Damper for Controlling Torsional Vibration in a Propulsion Shafting System with an Engine Acceleration Problem.” *Journal of Marine Science and Engineering* 8.6 (2020): 428. DOI: 10.3390/jmse8060428.
- Murawski, Lech. “Shaft line whirling vibrations: effects of numerical assumptions on analysis results.” *Marine Technology and SNAME News* 42.2 (2005): 53–60. DOI: 10.5957/mtl.2005.42.2.53.
- Halyavkin, Aleksey, Igor Razov, Victor Mamontov, and Guriy Kushner. “Determination of stiffness coefficient of stern shaft bearing.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 90. No. 1. IOP Publishing, 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012078.
- Ekimov, A. S., N. G. Petrov, and S. S. Glushkov. “Torsional oscillation in the propeller shafts of ship engine 1741A.” *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal’nego Vostoka* 2 (2009): 228–230.
- Thuong, N. M. “Sovremennoye sostoyaniye voprosa o dinamike sudovykh valoprovodov (opyt V’yetnama).” *Sudovyye energeticheskiye ustanovki: nauchn.-tekhn. sb.* Vol. 2. 1998. 95–99.
- Mamontov, Victor Andreevich, Ibragim Musaevich Abacharaev, Vladimir Pavlovich Bulgakov, and Guriy Alekseevich Kushner. “Automating the method of calculating natural frequency of propeller shaft transverse vibrations.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2019): 63–70. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-63-70.
- Sapiga, V., A. Kiryukhin, and P. Cherpita. “Perfection methods for analyzing the dynamics of marine shafting.” *Vodnyy transport* 1(19) (2014): 52–61.
- Ulitin, G.M., and S. N. Tsarenko. “Flexural vibrations of a rod of variable stiffness and distributed mass.” *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 79.6 (2015): 572–576. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2016.04.003.
- Tsarenko, S. N. “Torsional vibrations of a rod with an axial geometric inhomogeneity.” *Bulletin of the South Ural State University», series «Mathematics. Mechanics. Physics* 11.1 (2019): 50–58. DOI: 10.14529/mmph190107.
- Han, HyungSuk, KyungHyun Lee, and SungHo Park. “Estimate of the fatigue life of the propulsion shaft from torsional vibration measurement and the linear damage summation law in ships.” *Ocean Engineering* 107 (2015): 212–221. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.023.
- Huang, Qianwen, Xiping Yan, Yikun Wang, Cong Zhang, and Zhihua Wang. “Numerical modeling and experimental analysis on coupled torsional-longitudinal vibrations of a ship’s propeller shaft.” *Ocean Engineering* 136 (2017): 272–282. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.03.017.
- Huang, Qianwen, Xiping Yan, Cong Zhang, and Hanhua Zhu. “Coupled transverse and torsional vibrations of the marine propeller shaft with multiple impact factors.” *Ocean Engineering* 178 (2019): 48–58. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.02.071.
- Rak, Alexander N., and Sergey N. Tzarenko. “Features of calculating the parameters of auxiliary-emergency traffic on sea-going ships with combined diesel-electric propulsor.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 115–125. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-115-125.
- Filippov, A. P. *Kolebaniya mekhanicheskikh sistem.* Kyev: Naukova dumka, 1965.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Царенко Сергей Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
Камчатский государственный технический
университет
683003, Российская Федерация,
Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35
e-mail: tzarenko@gmail.com

Рак Александр Николаевич —
кандидат технических наук
Донецкий национальный технический университет
83001, Украина, Донецк, ул. Артема, 58
e-mail: Alexander.Rak@mail.ru

Безлобенко Борис Николаевич —
начальник комплексного судового производства
АО «Петропавловск-Камчатский
судоремонтный завод»
683015, Российская Федерация, Петропавловск-
Камчатский, ул. Днепроvская, 1
e-mail: bezpsrz@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tzarenko, Sergey N. —
PhD, associate professor
Kamchatka State Technical
University
35 Klyuchevskaya Str., Petropavlovsk-Kamchatsky,
683003, Russian Federation
e-mail: tzarenko@gmail.com

Rak, Alexander N. —
PhD
Donetsk National Technical University
58 Artyoma Str., Donetsk, 83001, Ukraine
e-mail: Alexander.Rak@mail.ru

Bezlobenko, Boris N. —
Head of the complex marine production
Petropavlovsk-Kamchatsky Shipyard,
JSC
1 Dneprovskaya Str., Petropavlovsk-Kamchatsky,
683015, Russian Federation
e-mail: bezpsrz@mail.ru

Статья поступила в редакцию 3 июня 2021 г.

Received: June 3, 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-559-568

ESTIMATING THE EFFICIENCY OF SHIP POWER PLANTS COOLING SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE ENVIRONMENTAL FACTOR

N. K. Fedorovskaya, K. Yu. Fedorovsky

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Currently, the international maritime conventions set more and more stringent requirements for the environmental safety and energy efficiency of ships and their power plants. The cooling system is one of the most important elements of a ship's power plant. Widespread open-loop dual-circuit cooling systems consume seawater. As a result, plankton and fish fry are destroyed, which leads to a reduction in the fish resources of the seas. An alternative can be closed-loop cooling systems, which completely exclude the intake of outside cooling water and negative environmental impact. Moreover, such systems can have different construction schemes. There is a need for a reasonable choice of one or another system option, taking into account a combination of factors, including environmental. Three options for cooling systems are considered: open-loop two-circuit cooling system; and closed one- and two-circuit cooling systems. In this case, two sub-options for open-loop systems are considered. The first sub-option is the lack of regulation of seawater consumption depending on temperature; the second one is the presence of such regulation by means of bypass (temperature control) or frequency-controlled seawater pump drive. An integral indicator, which includes the cost of the system, the costs of its own energy needs, environmental damage and useful result — the heat transferred by the system, is proposed. It is shown that the open-loop two-circuit cooling system with unregulated seawater consumption, which is characterized the largest number of pumps and consumption of outboard water possesses the worst integral indicator. The closed single-circuit system possesses the best value of the integral indicator, since it excludes the intake of seawater and has the least number of pumps. At the same time, when the vessel is in the sea areas with very low biological productivity, these systems are comparable in terms of efficiency. Regulation of seawater intake by the open system can significantly increase efficiency, which indicates the advisability of using bypass or frequency-controlled pump drive. Moreover, the latter is more preferable in terms of the energy efficiency of the system.

Keywords: cooling system, power plant, efficiency indicator, environmental factor, variable pump drive.

For citation:

Fedorovskaya, Nadezhda K., and Konstantin Yu. Fedorovskiy. "Estimating the efficiency of ship power plants cooling systems taking into account the environmental factor." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 559–568. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-559-568.

УДК 629.12(075.4)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ФАКТОРА

Н. К. Федоровская, К. Ю. Федоровский

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Российская Федерация

В работе отмечается, что в настоящее время международными морскими конвенциями ужесточаются требования по экологической безопасности и энергоэффективности судов и их энергетических установок. Исследована система охлаждения, которая является одним из важнейших элементов судовой энергетической установки, в частности изучены широко распространенные разомкнутые двухконтурные системы охлаждения, потребляющие забортную воду, в результате чего гибнут планктон и рыбная молодь, что приводит к сокращению рыбных ресурсов морей. Рассматривается вопрос исследования альтернативного варианта, в качестве которого предлагается использование замкнутых систем охлаждения, полностью исключающих прием забортной воды и отрицательное экологическое воздействие. При этом такие системы могут иметь различные схемы построения. Отмечается, что в данном случае

возникает необходимость обоснованного выбора того или иного варианта системы с учетом совокупности факторов, включая экологический. Рассмотрены три варианта систем охлаждения: разомкнутая двухконтурная система охлаждения, а также замкнутые одно- и двухконтурные системы охлаждения. При этом для разомкнутых систем исследовано два подварианта. Первый — отсутствие регулирования потребления забортной воды в зависимости от температуры, второй — присутствие такого регулирования посредством перепуска (терморегулирования) или частотно-регулируемого привода насоса забортной воды. Предложен интегральный показатель, включающий стоимость системы, затраты на собственные энергетические нужды, экологический ущерб и полезный результат — передаваемую системой теплоту. Показано, что наилучшим интегральным показателем обладает разомкнутая двухконтурная система охлаждения с нерегулируемым потреблением забортной воды, характеризующаяся наибольшим количеством насосов и потреблением забортной воды. Оптимальным значением интегрального показателя обладает замкнутая одноконтурная система, поскольку она исключает прием забортной воды и имеет наименьшее количество насосов. В то же время при нахождении судна в морских районах с очень низкой биологической продуктивностью эти системы сопоставимы по эффективности. Подчеркивается, что регулирование приема забортной воды разомкнутой системой позволяет существенно повысить эффективность, что указывает на целесообразность применения перепуска или частотно-регулируемого привода насоса. Причем последний случай является более предпочтительным с точки зрения энергоэффективности системы.

Ключевые слова: система охлаждения, энергоустановка, показатель эффективности, экологический фактор, регулируемый привод насоса.

Для цитирования:

Федоровская Н. К. Оценка эффективности систем охлаждения судовых энергетических установок с учетом экологического фактора / Н. К. Федоровская, К. Ю. Федоровский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 559–568. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-559-568.

Введение (Introduction)

В настоящее время в отношении судов и их энергетических установок четко прослеживается тенденция к повышению их экологической безопасности и энергоэффективности [1], что, в частности, определено в Международной морской конвенции МАРПОЛ-73/78 [2]. В Международном кодексе по управлению безопасностью [3] в качестве одной из его основных целей указывается необходимость не допускать причинения ущерба морской среде. Данный кодекс включен в Международную конвенцию по охране человеческой жизни на море 1974 года (СОЛАС 74) [3]. Указанные требования в полной мере относятся и к системам охлаждения, являющимся важнейшим элементом судовой энергетической установки (СЭУ). Актуальность данного вопроса обуславливают многочисленные исследования, направленные на достижение указанных целей [4]–[8].

В настоящее время наиболее широкое применение получили разомкнутые двухконтурные системы охлаждения, осуществляющие потребление забортной воды. Такие системы наносят существенный экологический ущерб, связанный с уничтожением рыбных ресурсов морей и континентальных водоемов. Соответствующий механизм достаточно подробно описан в работе [9]. Существуют также замкнутые системы охлаждения, исключющие прием забортной воды. Теплоотвод в них осуществляется посредством различных устройств (например, судовых обшивочных теплообменных аппаратов, бокскулеров и т. д.) [10]. Поскольку при этом забортная вода не потребляется, то такие системы не оказывают указанного ранее отрицательного экологического воздействия на морскую среду. Переход от разомкнутых схем систем к замкнутым требует соответствующего технико-экономического обоснования.

Следует отметить, что для разомкнутых систем охлаждения имеются возможности снижения приема забортной воды при снижении мощности двигателя или понижении температуры забортной воды. При этом могут быть реализованы несколько вариантов. Первый вариант связан с перепуском части этой воды за счет использования терморегулятора (рис. 1). В этом случае частота вращения рабочего колеса насоса и его мощность остаются неизменными при изменении мощности двигателя или температуры забортной воды, меняется лишь потребление забортной воды.

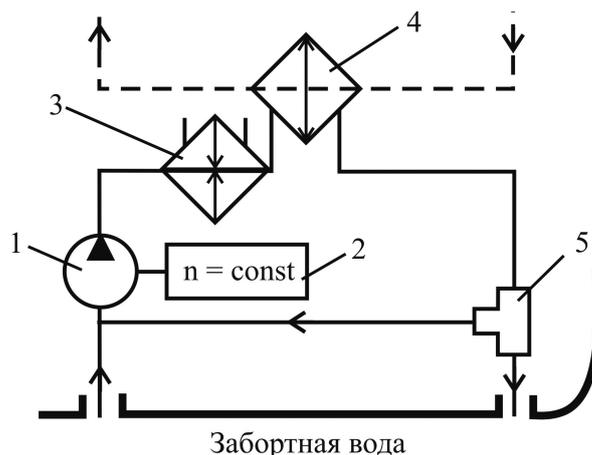


Рис. 1. Система охлаждения забортной водой с перепуском: 1 — насос забортной воды; 2 — электродвигатель насоса забортной воды; 3 — охладители масла и надувочного воздуха; 4 — водоводяной теплообменник; 5 — терморегулятор; - - - - контур охлаждения пресной водой; — — — контур охлаждения забортной водой

Второй вариант связан с обеспечением регулирования частоты вращения насоса, которое наиболее целесообразно выполнять с использованием частотно-регулируемого привода (ЧРП) электродвигателя (рис. 2). При этом изменяется не только потребление забортной воды, но и мощность, потребляемая насосом.

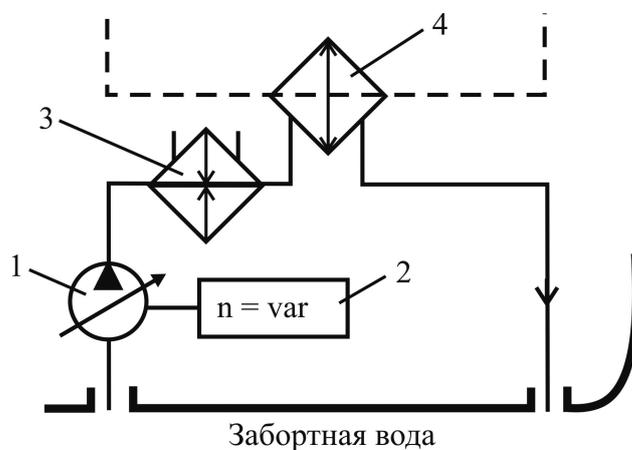


Рис. 2. Система охлаждения забортной водой с регулируемой частотой вращения насоса: 1 — насос забортной воды с регулируемой частотой вращения; 2 — управляемый по частоте вращения привод насоса забортной воды; 3 — охладители масла и надувочного воздуха; 4 — водоводяной теплообменник; - - - - контур охлаждения пресной водой; — — — контур охлаждения забортной водой

Таким образом, из всей совокупности возможных вариантов систем охлаждения следует обоснованно выбрать наиболее эффективный. При этом необходимо учесть экологический фактор, внимание к которому, как отмечалось ранее, неуклонно возрастает.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для оценки систем и определения оптимального варианта может быть использован безразмерный интегральный показатель (ИП) эффективности, построенный по принципу приведенных затрат. При этом затраты относятся к полезному результату:

$$\text{ИП} = \frac{C_{\text{с.г}} + C_{\text{н}} + C_{\text{эк}}}{C_{\text{о}}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{о}}$ — стоимость отводимой системой теплоты; $C_{\text{с.г}}$ — стоимость системы, приведенная к году; $C_{\text{н}}$ — затраты на собственные энергетические нужды (работа насосов); $C_{\text{эк}}$ — стоимостное выражение экологического ущерба от работы системы.

Наиболее эффективным вариантом является система с наименьшим значением ИП. Данный показатель можно также представить в виде суммы частных относительных показателей, характеризующих следующие ее признаки:

– стоимость системы

$$K_{\text{с.г}} = C_{\text{с.г}}/C_{\text{о}}; \quad (2)$$

– затраты на собственные энергетические нужды

$$k_{\text{н}} = C_{\text{н}}/C_{\text{о}}; \quad (3)$$

– экологический ущерб

$$k_{\text{эк}} = C_{\text{эк}}/C_{\text{о}}. \quad (4)$$

Тогда

$$\text{ИП} = k_{\text{с.г}} + k_{\text{н}}k_{\text{эк}}. \quad (5)$$

В результате реализации подхода, базирующегося на принципе приведенных затрат, появляется важное преимущество, заключающееся в появлении возможности оценки различных составляющих ИП.

Расчет $C_{\text{с.г}}$ и $C_{\text{н}}$ не представляет особых сложностей. Значения $C_{\text{эк}}$ и $C_{\text{о}}$ могут быть определены по методикам, изложенными в работах [8], [10].

Результаты (Results)

Рассмотрим три основных варианта построения систем охлаждения: широко используемую двухконтурную разомкнутую систему, а также одноконтурную замкнутую и двухконтурную замкнутую систему (рис. 3).

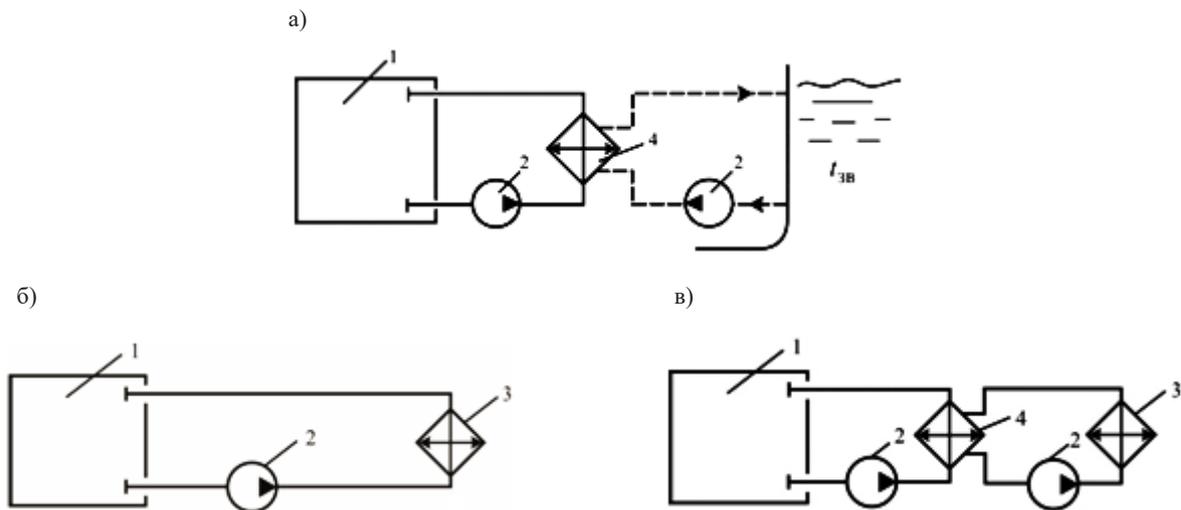


Рис. 3. Схемы систем охлаждения: 1 — охлаждаемое оборудование; 2 — насос; 3 — устройство тепловода; 4 — промежуточный теплообменник;

а — разомкнутая двухконтурная; б — замкнутая одноконтурная; в — замкнутая двухконтурная

На рис. 4 показана зависимости $k_{\text{с.г}}$ от мощности Ne судовой дизельной энергетической установки. Наилучшим значением $k_{\text{с.г}}$ характеризуется двухконтурная разомкнутая система охлаждения,

укомплектованная одним теплообменником, связывающим контур пресной охлаждаемой воды и морской воды. Чуть несколько худшими показателями характеризуется одноконтурная замкнутая система. Переход на двухконтурные замкнутые схемы, предусматривающие два насоса и промежуточный теплообменник, резко ухудшает показатель $k_{сг}$.

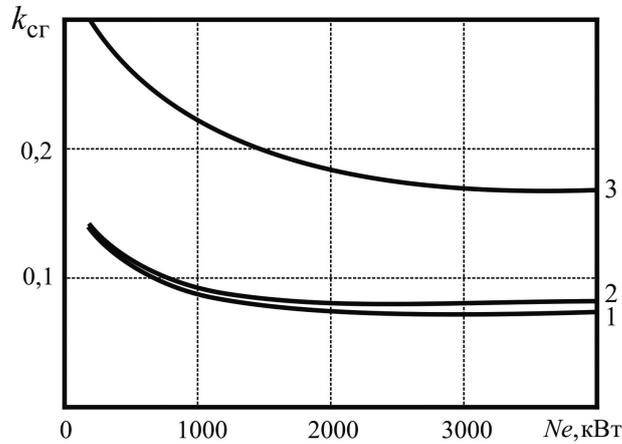


Рис. 4. Зависимость $k_{сг}$ от мощности энергетической установки Ne :
 1 — двухконтурной разомкнутой системы;
 2 — одноконтурной замкнутой системы;
 3 — двухконтурной замкнутой системы

Если отсутствует регулирование частоты вращения насоса заборной воды, то по показателю k_n двухконтурная разомкнутая и двухконтурная замкнутая системы имеют одинаковое значение, равное 0,05. Одноконтурная замкнутая система охлаждения является оптимальной и имеет значение $k_n = 0,024$, что объясняется меньшим количеством насосов, обеспечивающих ее работу.

Применение в системах охлаждения ЧРП позволяет примерно в три раза снизить значение k_n . На рис. 5 приведены соответствующие данные при разнице температур выхода и входа заборной воды $\delta t_{зв} = 7^\circ\text{C}$. Наибольший эффект проявляется в области низких температур заборной воды $t_{зв}$. При этом учитывается, что в соответствии с действующими нормами оборудование рассчитано на работу при максимально допустимой температуре заборной воды, равной 32°C .

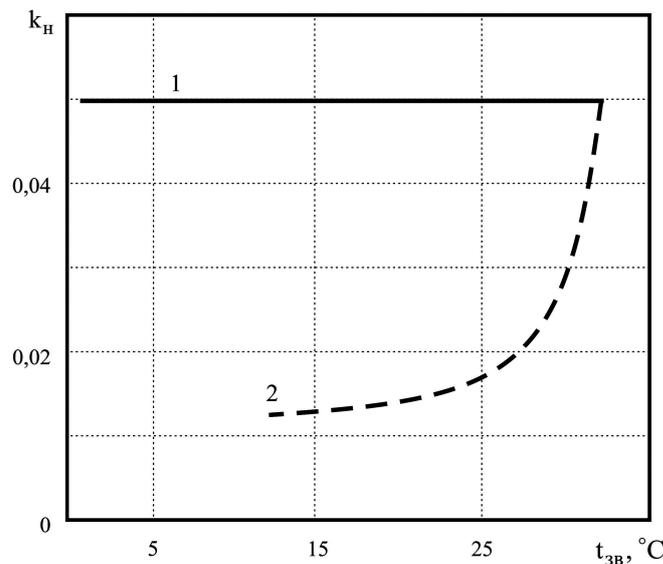


Рис. 5. Зависимость от k_n от $t_{зв}$ при $\delta t_{зв} = 7^\circ\text{C}$:
 1 — разомкнутая система обычная и с перепуском;
 2 — разомкнутая система с ЧРП насоса

Следует отметить, что снижение k_n фактически означает большую энергоэффективность системы, что соответствует требованиям гл. 4 прил. VI, приведенным в Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 [3].

В случае отсутствия регулирования частоты вращения насоса заборной воды значение показателя экологического ущерба $k_{эк}$ в рамках заданного морского района для разомкнутой системы является постоянной величиной, не зависящей от N_e . Однако при смене района эксплуатации судна или схемы построения системы охлаждения СЭУ значение $k_{эк}$ изменяется. В качестве примера рассмотрены Черное, Баренцево и Белое моря (рис. 6). Баренцево море и сопредельные воды отличаются высокой продуктивностью, обеспечивая до 5 % мировой добычи морских и океанических рыб [11]. Поэтому данное море обладает наибольшим значением $k_{эк}$, что почти в три раза больше, чем в Черном море, и в несколько сот раз больше, чем в Белом море.

Обращает на себя внимание тот факт, что значения $k_{эк}$ значительно больше значений k_n и сопоставимы со значениями $k_{с.г.}$, что четко указывает на значимость экологического фактора в рамках ИП.

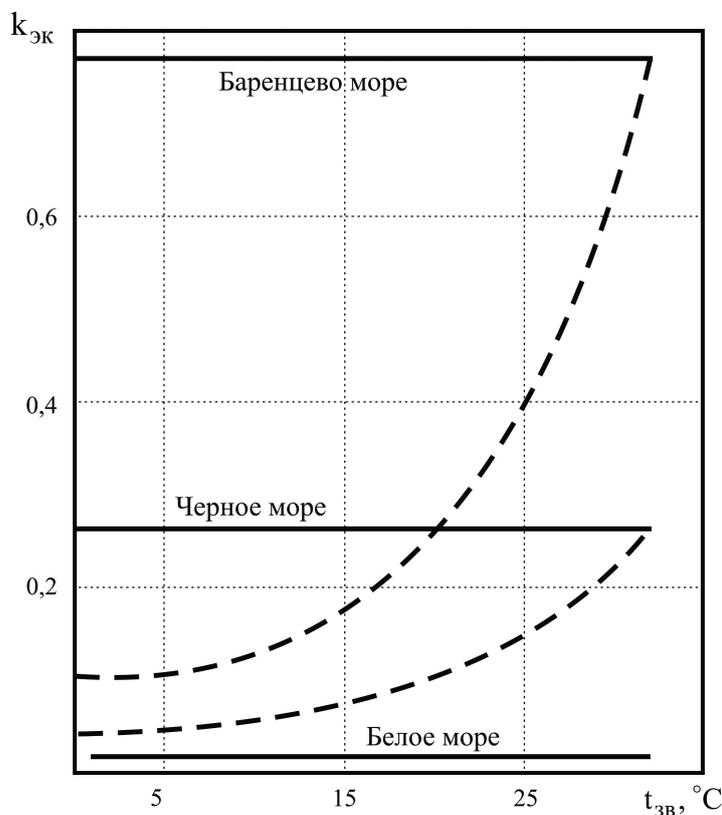


Рис. 6. Зависимость $k_{эк}$ от $t_{зв}$ при $\Delta t_{зв} = 7^\circ\text{C}$
 - - - - - система охлаждения разомкнутая обычная;
 — — — система охлаждения с перепуском
 или частотно-регулируемым приводом насоса

Наибольшее снижение $k_{эк}$ наблюдается в отношении Баренцева моря, характеризующегося, как отмечалось ранее, наибольшей рыбной продуктивностью. Белое море имеет очень малую рыбную продуктивность и поэтому соответствующее графическое обозначение (пунктирная линия) на рис. 6 не приведено. Интегральный показатель, представляющий собой сумму $k_{с.г.}$, k_n и $k_{эк}$, приведен на рис. 7.

Следует также рассмотреть вопрос об изменении ИП разомкнутых систем охлаждения с учетом колебаний $k_{эк}$ при различных значениях температуры, что позволяет изменять потребление заборной воды за счет регулирования частоты вращения насоса.

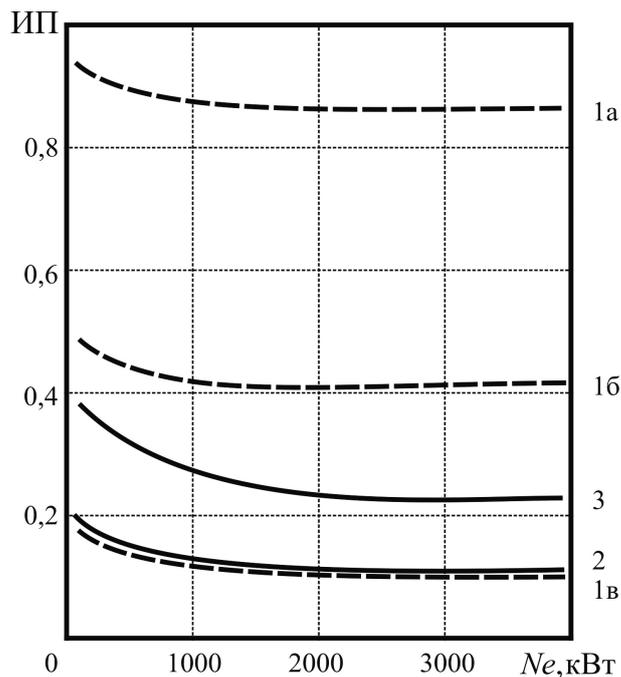


Рис. 7. Зависимость интегрального показателя IIP от мощности энергетической установки Ne :
 1 — двухконтурная разомкнутая система
 (а — Баренцево море, б — Черное море, в — Белое море);
 2 — одноконтурная замкнутая; 3 — двухконтурная замкнутая

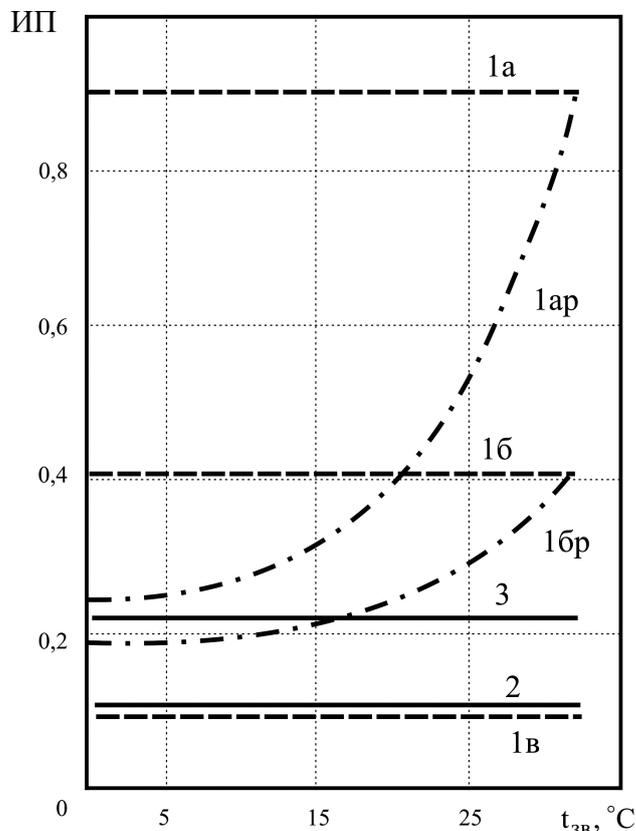


Рис. 8. Зависимость IIP от $t_{зв}$ при $t_{зв} = 7^\circ\text{C}$ и $Ne = 3000$ кВт
 1 — двухконтурная разомкнутая система (а — Баренцево море, б — Черное море, в — Белое море);
 2 — одноконтурная замкнутая; 3 — двухконтурная замкнутая; 1аp и 1бp — система охлаждения с регулируемым потреблением забортной воды (перепуск или ЧРП) для Баренцева и Черного морей

Таким образом, для морей, имеющих высокую или среднюю рыбную продуктивность, наилучшим ИП обладает одноконтурная замкнутая система охлаждения. Для морей с очень низкой рыбной продуктивностью разомкнутая двухконтурная система становится практически эквивалентной одноконтурной замкнутой системе.

Обсуждение (Discussion)

Представленные результаты указывают на необходимость всестороннего учета факторов, определяющих работу системы охлаждения судовой энергетической установки. В частности, если рассматривается стоимость системы (см. рис. 1), то наилучший показатель $k_{с.г}$ соответствует двухконтурной разомкнутой системе, а наихудший — двухконтурной замкнутой системе, однако включение в рассмотрение других факторов вносит коррективы.

В отношении затрат на собственные энергетические нужды решающим является количество используемых в системе насосов и возможность применения ЧРП. Так, в случае нерегулируемых приводов насосов по показателю $k_{н}$ наиболее эффективной является одноконтурная замкнутая система. Использование в системе ЧРП насоса позволяет при понижении температуры забортной воды существенно снизить значение $k_{н}$ (см. рис. 3), практически достигнув или даже улучшив этот показатель по сравнению с одноконтурной замкнутой системой.

По экологическому показателю $k_{эк}$ однозначно лучшими являются замкнутые системы охлаждения, которые полностью исключают прием забортной воды и, соответственно, уничтожение рыбных ресурсов морей ($k_{эк} = 0$). Для разомкнутых систем $k_{эк}$ существенно зависит от морского района эксплуатации судна (см. рис. 6). Высокая биологическая продуктивность моря приводит к увеличению значения $k_{эк}$. Однако использование в системе перепуска (терморегулирования) или ЧРП позволяет существенно улучшить данный частный показатель, например при снижении температуры забортной воды.

Указанные тенденции учитывает ИП, объединяющий частные показатели $k_{с.г}$, $k_{н}$ и $k_{эк}$. В случае, если в системе не используются перепуск или ЧРП (см. рис. 7), наиболее эффективной является одноконтурная замкнутая система. В то же время для морей с низкой биологической продуктивностью (например, Белое море) разомкнутая система оказывается сопоставимой с одноконтурной замкнутой системой. Применение перепуска или ЧРП для морей с высокой биологической продуктивностью (например, Баренцево и Черное моря) обеспечивает существенное снижение значений ИП, однако при этом не достигаются значения, соответствующие одноконтурной замкнутой системе.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что эффективность различных вариантов систем охлаждения определяется конструктивными особенностями и биологической продуктивностью морей. Предложенный интегральный показатель позволяет оценить эффективность систем охлаждения с учетом технических и экологических факторов.

2. Определено, что наилучшим интегральным показателем обладают замкнутые системы охлаждения, полностью исключаящие прием забортной воды. В случае использования разомкнутых систем экологическая составляющая $k_{эк}$ существенно зависит от морского района эксплуатации судна и ее весомость в составе ИП может быть значительной.

3. Для морей с очень низкой биологической продуктивностью (например, Белое море) разомкнутая система охлаждения может иметь значение ИП, сопоставимые с замкнутой системой охлаждения. Для морей с высокой биологической продуктивностью может быть рекомендовано применение перепуска или ЧРП насосов, обеспечивающее снижение потребления забортной воды при снижении эксплуатационной мощности двигателя или понижении температуры в акватории.

Таким образом, предложенный подход позволяет с учетом экологического фактора сопоставить различные варианты систем и обосновать выбор наиболее эффективного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев В. В.* Обзор и анализ возможностей различных способов повышения энергетической эффективности судов / В. В. Медведев, В. В. Гаврилов, С. Н. Киселев // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2018. — № 2–1 (40). — С. 94–103.
2. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78). — Кн. I и II. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2017. — 824 с.
3. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (МК СОЛАС-74). (Консолидированный текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2021. — 1184 с.
4. *Безюков О. К.* Современная концепция регулирования охлаждения судовых дизелей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Н. Тимофеев // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 3 (31). — С. 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-93-103.
5. *Zhukov V.* Factors Determining Thermohydraulic Efficiency of Liquid Cooling Systems for Internal Combustion Engines / V. Zhukov, V. Erofeev, O. Melnik // *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. — Springer, Cham, 2019. — Pp. 463–472. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_40.
6. *Bezyukov O. K.* Effectiveness of liquid cooling systems in motors and manufacturing equipment / О. К. Bezyukov, V. A. Zhukov, O. V. Zhukova // *Russian Engineering Research*. — 2008. — Vol. 28. — Is. 11. — Pp. 1055–1057. DOI: 10.3103/S1068798X08110063.
7. *Покусаев М. Н.* Определение производительности системы охлаждения судового двигателя в зависимости от температуры забортной воды / М. Н. Покусаев, А. В. Трифонов // 64-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета, посвященная 90-летию юбилею со дня образования Астраханского государственного технического университета: сб. тр. конф. — Астрахань: АГТУ, 2020. — С. 217.
8. *Федоровский К. Ю.* Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская. — М.: ИНФРА-М, 2017. — 163 с.
9. *Федоровский К. Ю.* Механизм отрицательного антропогенного воздействия систем охлаждения СЭУ / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская, В. В. Ениватов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1068–1077. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1068-1077.
10. *Федоровская Н. К.* Учет экологического фактора при оценке эффективности систем охлаждения судовых энергетических установок / Н. К. Федоровская, К. Ю. Федоровский, В. В. Ениватов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. — 2020. — № 4 (342). — С. 157–160.
11. *Александрова М. А.* Общая характеристика экосистемы Баренцева моря. Анализ исследований экосистемы Баренцева моря / М. А. Александрова // *Успехи современной науки*. — 2016. — Т. 5. — № 11. — С. 170–172.

REFERENCES

1. Medvedev, Valery V., Vladimir V. Gavrillov, and Stepan N. Kiselev. "Review and analysis of the possibility of various methods of increasing the energy efficiency of vessels." *Marine intelligent technologies* 2–1(40) (2018): 94–103.
2. International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL-73/78). SPb.: ZAO "TsNIIMF", 2017.
3. International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, (SOLAS-74). (Text modified by the Protocol of 1988 relating thereto, including Amendments). SPb.: ZAO "TsNIIMF", 2021.
4. Bezyukov, O.K., V. A. Zhukov, and V. N. Timofeev. "Contemporary conception of regulation in cooling system of ship's diesel engines." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-93-103.
5. Zhukov, Vladimir, Valentin Erofeev, and OlesyaMelnik. "Factors Determining Thermohydraulic Efficiency of Liquid Cooling Systems for Internal Combustion Engines." *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Springer, Cham, 2019. Springer, Cham, 2019. — Pp. 463–472. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_40.
6. Bezyukov, O. K., V. A. Zhukov, and O. V. Zhukova. "Effectiveness of liquid cooling systems in motors and manufacturing equipment." *Russian Engineering Research* 28.11 (2008): 1055–1057. DOI: 10.3103/S1068798X08110063.

7. Pokusaev, M. N., and A. V. Trifonov. "Opredelenie proizvoditel'nosti sistemy okhlazhdeniya sudovogo dvigatelya v zavisimosti ot temperatury zabortnoi vody." *64-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, posvyashchennaya 90-letnemu yubileyu so dnya obrazovaniya Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Materialy konferentsii*. Astrakhan': Astrakhanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2020. 217.

8. Fedorovskii, K. Yu., and N. K. Fedorovskaya. *Zamknutyie sistemy okhlazhdeniya sudovykh energeticheskikh ustanovok*. M.: INFRA-M, 2017.

9. Fedorovskiy, Konstantin Yu., Nadezhda K. Fedorovskaya, and Valeriy V. Yenivatov. "Mechanism of negative anthropogenic influence of ship's power plants cooling systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiralа S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1068–1077. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1068-1077.

10. Fedorovskaya, N. K., K. Yu. Fedorovskiy, and V. V. Enivatov. "Taking into account the ecological factor in assessing the efficiency of cooling systems for ship power plants." *Fundamental and applied problems of engineering and technology* 4(342) (2020):157–160.

11. Aleksandrova M. A. "Fiber-reinforced concrete and products on its basis." *Uspekhi sovremennoi nauki* 5.11 (2016): 170–172.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоровская Надежда Константиновна — ассистент
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
299053, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

Федоровский Константин Юрьевич — доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
299053, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: fedkonst@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedorovskaya, Nadezhda K. — Assistant
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

Fedorovskiy, Konstantin Yu. — Dr. of Technical Sciences, professor
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: fedkonst@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2021 г.

Received: April 26, 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-569-574

DEVELOPMENT OF A HYDRODYNAMIC TYPE MIXER-HOMOGENIZER SCHEME

V. S. Kotov¹, A. A. Krivosheev¹, R. K. Reznikova²

¹ — Military Institute (Naval Polytechnic) of Kuznetsov Naval Academy, Pushkin, St. Petersburg, Russian Federation

² — Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, Russian Federation

Based on the objectives of the “Strategy for the development of the shipbuilding industry of the Russian Federation for the period up to 2035”, an example of finding ways to improve reliability, operation of ships and vessels, through technical solutions for the introduction of individual elements of ship equipment is provided in the paper. An additional resource is the optimization of the ship’s power plant, namely, a way to improve the quality of fuel by means of hydrodynamic treatment in mixers-homogenizers of the jet-cavitation type based on the analysis of physical and chemical properties and quality indicators. An analysis of the design of a hydrodynamic homogenizer and its scheme, which allows combining the advantages of ejector and nozzle mixers is provided in the paper. On the example of using a homogenizer, the quantitative and qualitative characteristics of the optimized fuel combustion process are presented. The process of cavitation flow of a liquid is considered in detail, when the impact on the liquid at the molecular level in collapsing cavitation bubbles changes the density of the injected flow. The issues of including an additional source of energy or substance (water) in the standard system and the consequences of this process are also touched upon in the paper. The operation of the mixer, achieved by dividing the liquid flow into working and injected flows, is described in detail. A general view of the mixer-homogenizer of the injection circuit and the basic arrangement of the jet-cavitation mixer of the injection circuit are illustratively presented. The empirical formula for the selection of the console plate of the homogenizer vibrator is considered in the paper. By modernizing this element, it is possible to significantly affect the management of the quality of fuel combustion, energy saving and energy-ecological safety during the operation of the propulsion complex.

Keywords: reliability, power plants, boiler unit, operation, homogenizer.

For citation:

Kotov, Valentin S., Alexey A. Krivosheev, and Rimma K. Reznikova. “Development of a hydrodynamic type mixer-homogenizer scheme.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 569–574. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-569-574.

УДК 621.182.3

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ СМЕСИТЕЛЯ-ГОМОГЕНИЗАТОРА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТИПА

В. С. Котов¹, А. А. Кривошеев¹, Р. К. Резникова²

¹ — Военный институт (Военно-морской политехнический) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», г. Пушкин,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

На основе задач, указанных в «Стратегии развития судостроительной промышленности Российской Федерации на период до 2035 года», в статье приводится пример поиска путей повышения надежности, эксплуатации кораблей и судов посредством исследования технических решений по внедрению отдельных элементов корабельного оборудования. В качестве дополнительного ресурса предлагается оптимизация энергетической установки корабля, а именно способ улучшения качества топлива посредством гидродинамической обработки в смесителях-гомогенизаторах струйно-кавитационного типа на основе анализа физико-химических свойств и показателей качества. Выполнен анализ конструкции гомотенизатора гидродинамического типа и его схема, позволяющие сочетать достоинства эжекторных и сопловых смесителей. На примере использования гомотенизатора представлены количественные и качественные характеристики

оптимизируемого процесса сжигания топлива. Детально рассмотрен процесс кавитационного течения жидкости, когда воздействие на жидкость на молекулярном уровне в схлопывающихся кавитационных пузырьках изменяет плотность инжектируемого потока. Также в статье рассмотрены вопросы включения в состав штатной системы дополнительного источника энергии или вещества (воды) и последствия данного процесса. Подробно описана работа смесителя, достигаемая разделением потока жидкости на рабочий и инжектируемый потоки. Иллюстративно представлен общий вид смесителя-гомогенизатора инжекторной схемы и принципиального устройства струйно-кавитационного смесителя инжекторной схемы. В работе акцентировано внимание на эмпирической формуле подбора пластины консоли вибратора гомотенизатора. Отмечается, что модернизируя данный элемент можно оказать существенное влияние на управление качеством сжигания топлива, энергосбережения и энергоэкологической безопасности в процессе эксплуатации пропульсивного комплекса.

Ключевые слова: надежность, энергетические установки, котлоагрегат, эксплуатация, гомотенизатор.

Для цитирования:

Котов В. С. Разработка схемы смесителя-гомотенизатора гидродинамического типа / В. С. Котов, А. А. Кривошеев, Р. К. Резникова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 569–574. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-569-574.

Введение (Introduction)

Согласно «Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2035 года» одним из главных приоритетов научно-технологического роста отечественного военного кораблестроения является решение проблем развития энергетики и электроэнергетики. Данное направление предусматривает создание наукоемкого и конкурентоспособного судового оборудования, позволяющего повысить большинство технических показателей кораблей.

Оптимизация корабельной энергетической установки путем включения в ее систему гомотенизатора служит одним из способов решения управления качеством сжигания топлива, энергосбережения и энергоэкологической безопасности [1].

Таким образом, целью исследования является модернизация гомотенизатора гидродинамического типа топливной системы энергетической установки корабля для улучшения качества топлива в судовых условиях и повышения экономичности и экологичности судовых энергетических установок.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Анализ конструкций смесителей гидродинамического типа, применяемых в настоящее время для гомотенизации видов топлива, показал, что процесс кавитационного течения в них достигается следующим образом:

- а) в эжекторной схеме:
 - посредством смешения двух совместимых по растворимости топлив с различной плотностью или различной температурой;
 - добавкой некоторого количества пресной или забортной воды на всасывание эжектора [2];
- б) в сопловой схеме:
 - преобразованием энергии потока при высоких статических давлениях в кинетическую энергию струи, что приводит к модуляции длинной продольной волны, являющейся генератором высокочастотных колебаний мелкодисперсных включений: воды и механических примесей [3];
 - преобразование энергии потока в кинетическую энергию направленной струи и достижение возбуждения резонансной частоты колебаний на пластинчатом, стержневом или мембранном резонаторе [4], [5];
- в) в вихревой схеме:
 - преобразование энергии потока в кинетическую энергию тангенциально направленных струй, при слиянии которых возникают срезающие усилия между слоями топлива, приводящие к возникновению кавитационных полостей.

Выполненный в процессе исследования анализ показал, что во многих рассмотренных схемах возникает необходимость включения в состав штатной системы дополнительного источника энергии или вещества. При этом в случае добавки в исходное топливо воды происходит ухудшение качества топлива за счет снижения теплоты сгорания, что при нагрузках котла выше 60 % от номинальной существенно отражается на экономичности [2], [5].

Гидродинамический смеситель инжекторной схемы представляет собой струйный насос, в котором поток перекачиваемой по трубопроводу жидкости разделяется на *рабочий* и *инжектируемый* (рис. 1 и 2). Работа смесителя достигается разделением потока жидкости на рабочий и инжектируемый потоки с активным вихреобразованием в инжектируемом потоке, приводящем к диссипации кинетической энергии потока за счет работы вязких сил и сил межфазного взаимодействия между компонентами жидкости [6]. Выделяющаяся при диссипации кинетической энергии тепловая энергия создает неустойчивость межфазной границы компонентов жидкости и модулирование нелинейных гармонических возмущений [7], приводящих к появлению кавитационных пузырьков и дроблению дисперсной фазы.

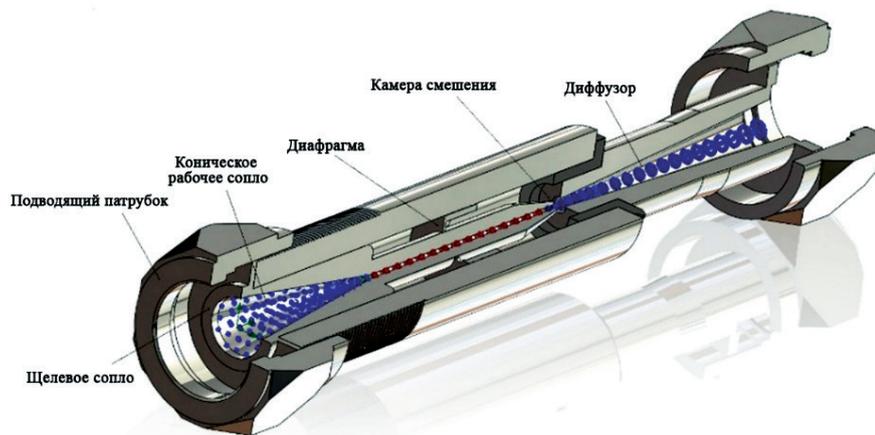


Рис. 1. Общий вид смесителя-гомогенизатора инжекторной схемы для обработки тяжелых видов топлива и топливных остатков

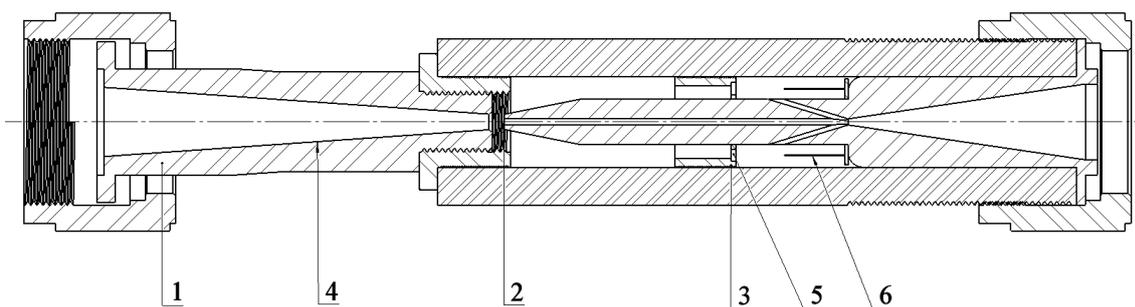


Рис. 2. Принципиальное устройство струйно-кавитационного смесителя инжекторной схемы с вибратором для обработки маловязких мазутов и мазутов средней вязкости:
 1 — подводящий патрубок; 2 — камера смешения; 3 — диафрагма;
 4 — коническое рабочее сопло; 5 — щелевое сопло; 6 — вибрационные пластины

Воздействие на жидкость на молекулярном уровне в схлопывающихся кавитационных пузырьках изменяет плотность инжектируемого потока. Рабочий поток, проходя через коническое сопло и разгоняясь, увлекает за собой инжектируемый поток в камеру смешения, на входе которой достигается кавитационный режим работы смесителя, активизирующийся в камере смешения

за счет разности плотностей и различных давлений насыщения рабочего и инжектируемого потоков топлива [8].

Разделение жидкости на *рабочий* и *инжектируемый* потоки достигается в коническом рабочем сопле 4 нанесением перфорации на входе в сопло, обеспечивающей необходимую массовую долю никелируемого потока. Выбор соотношения массовых долей рабочего и инжектируемого потоков осуществляется на основании методики, предложенной в публикации [9].

Разность давлений между рабочим потоком и инжектируемым потоком достигается установкой па пути инжектируемого потока диафрагмы 3 с выполненными в ней осесимметрично расположенными щелевыми соплами 4, рассчитанными в соответствии с методикой, предложенной в работе [10].

Результаты (Results)

Инжектируемый поток, проходя через щелевые сопла диафрагмы, попадает в камеру всасывания струйного насоса, образованную полостью диафрагмы и фланцем камеры смешения. Гомогенизация топлива достигается при рабочих давлениях топливной системы выше 0,2 МПа. Особенность установки такого типа смесителей при давлениях ниже 0,2 МПа заключается в том, что они устанавливаются не на нагнетании топливного насоса, а на всасывании, с отбором в качестве рабочего потока топлива от нагнетания насоса.

Инжекторная схема смесителя позволяет сочетать достоинства эжекторных и сопловых смесителей. Схема смесителя инжекторной схемы с резонаторами приведена на рис. 2. Инжектируемый поток, проходя через щелевые сопла 5 диафрагмы 3, попадает во фланец камеры смешения 2 и установленные напротив щелевые сопла. Инжектируемый поток возбуждает пластинчатые консольные вибраторы, генерирующие ультразвуковую волну. Размеры щелевых сопел 5 и пластин консольных вибраторов выбраны на основании экспериментальных исследований [4], позволивших установить, что на поток смешиваемого вещества оказывают эффективное воздействие ультразвуковые волны в диапазоне 2,5–7,0 кГц, генерация которых достигается направленным течением смешиваемого вещества при давлении выше 0,2 МПа на плоскую заостренную консольную пластину. Оптимальный диапазон частот ультразвуковой волны достигается подбором пластины вибратора с использованием эмпирической формулы [6]:

$$N = 81,4 dl,$$

где N — частота колебаний вибратора, КГц; d — толщина пластины вибратора, см; l — длина пластины, см.

Возбуждение резонансной частоты колебаний вибраторов обусловлено образованием турбулентных вихрей при истечении направленной затопленной струи топлива из щелевого сопла [2] на расстоянии $\nabla x = 3,4b_0$ от кромки сопла, где b_0 — толщина струи. Кроме того, на поверхностях консольных пластинчатых вибраторов создается разность давления из-за неравномерности потока, набегающего на вибраторы инжектируемого потока [11].

Обсуждение (Discussion)

Рассмотренные схемы смесителей позволяют достигнуть развитого кавитационного течения в камерах смешения на всех режимах работы за счет того, что давление кавитации на входе в камеру смешения постоянно при одинаковой температуре рабочего и инжектируемого потоков для всех коэффициентов инжекции [8].

Смесители-гомогенизаторы инжекторной схемы могут быть установлены на всех системах, по которым осуществляются перекачка топлива: приемной, пополнения расходных топливных цистерн, топливных системах котлоагрегатов [12].

Заключение (Conclusion)

На основании выполненного исследования можно сделать вывод о том, что приоритетное направление развития военной морской техники в результате разработки новых отечественных

технологий в сфере судового машиностроения и приборостроения решает не только проблему импортозамещения, но и позволяет увеличить экономичность энергетической установки корабля и улучшить ее экологические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Питий И. И.* Теоретические основы и методы повышения эффективности использования котлотурбинных энергетических установок / И. И. Питий. — Л.: ВМА им. С. М. Кирова, 1990. — 73 с.
2. *Артемов Г. А.* Системы судовых энергетических установок / Г. А. Артемов [и др.] — Л.: Судостроение, 1990. — 376 с.
3. *Ведрученко В. Р.* Снижение экономического ущерба от вредных выбросов тепловых двигателей использованием альтернативных видов топлива / В. Р. Ведрученко, Н. В. Жданов, Е. С. Лазарев // Омский научный вестник. — 2013. — № 2 (120). — С. 236–240.
4. *Ведрученко В. Р.* Выбор смесительных устройств для получения высокостабильных топливных смесей в системах топливоподготовки энергетических установок / В. Р. Ведрученко [и др.] // Омский научный вестник. — 2013. — № 2 (120). — С. 241–245.
5. *Burak S. R.* Improving Heavy Fuel Oil Usage by Homogenization // Technical Report. — Ashland Specialty Chemical Company, 2010 [Электронный ресурс] / S. R. Burak. — Режим доступа: <https://cv-ao.com/products/homogenizer/improving-heavy-fuel-oil.pdf> (дата обращения: 31.05.2021).
6. *Митягин В. Г.* Проблемы эксплуатации судовых дизелей на различных видах топлива / В. Г. Митягин, В. Н. Окунев, В. В. Мартьянов // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 3. — С. 49а-53.
7. *Ведрученко В. Р.* О выборе схем и разработке технических решений систем топливоподдачи альтернативных и тяжелых топлив в дизелях. Ч. 2 / В. Р. Ведрученко [и др.] // Омский научный вестник. — 2010. — № 3 (93). — С. 138–143.
8. Пат. 2120562 Российская Федерация, МПК F02M 27/08 F02M 43/00 F03M 37/20. Способ обработки тяжелого топлива перед впрыском в камеру сгорания ДВС или котла / М. И. Браславский, В. А. Шляхов; заяв. и патентообладатель М. И. Браславский, В. А. Шляхов; № 96120125/06; Заявлено 08.10.1996; Опубл. 20.10.1998. — 2 с.
9. *Ишков А. М.* Влияние качества топлива на надежность дизельных двигателей в условиях Севера / А. М. Ишков, Е. Л. Иовлева // Наука и образование. — 2015. — № 1 (77). — С. 65–70.
10. *Кавтарадзе Р. З.* Частично-гомогенное сгорание традиционных и альтернативных топлив в дизелях. — Ч. 1: Способы гомогенизации сгорания / Р. З. Кавтарадзе [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. — 2018. — № 1 (61). — С. 37–52.
11. *Лифшиц Л. И.* Гидродинамический вибратор консольным креплением и его применение для получения эмульсий / Л. И. Лифшиц. — Л., 1961. — 22 с.
12. *Царев Р. А.* Оптоэлектронное устройство управления кавитационной обработкой углеводородных топлив / Р. А. Царев // Вестник Самарского государственного университета. — 2010. — № 1 (21). — С. 195–201.

REFERENCES

1. Pitii, I. I. *Teoreticheskie osnovy i metody povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya kotloturbinnnykh energeticheskikh ustanovok*. L.: VMA, 1990.
2. Artemov, G. A., V. P. Voloshin, A. Ya. Shkvar, and V. P. Shostak. *Sistemy sudovykh energeticheskikh ustanovok*. L.: Sudostroenie, 1990.
3. Vedruchenko, V. R., N. V. Zhdanov, and E. S. Lazarev. "Economic impact of harmful emission of heat engines by usage of alternative fuel." *Omsk Scientific Bulletin* 2(120) (2013): 236–240.
4. Vedruchenko, V. R., V. V. Krainov, N. V. Zhdanov, D. K. Kuznetsova. "Choice of mixing devices for high-stability fuel mixture in the fuel processing systems of power plants." 2(120) (2013): 241–245.
5. Burak, S. R. "Improving Heavy Fuel Oil Usage by Homogenization." *Technical Report*. Ashland Specialty Chemical Company, 2010. Web. 31 May 2021. <<https://cv-ao.com/products/homogenizer/improving-heavy-fuel-oil.pdf>>.
6. Mityagin, V. G., V. N. Okunev, and V. V. Mart'yanov. "Problems of ship diesel engines operation with different kinds of fuel." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2011): 49a-53.

7. Vedruchenko, V. R., V. V. Krainov, N. V. Zhdanov, M. V. Kulkov. "About schema selection and technical design for diesel fuel supply systems using alternative and heavy oil fuels. Part 2." *Omsk Scientific Bulletin* 3(93) (2010): 138–143.

8. Braslavskii, M. I., and V. A. Shlyakhov. RU 2 120 562 C1, IPC F02M 27/08 F02M 43/00 F03M 37/20. Sposob obrabotki tyazhelogo topliva pered vpryskom v kameru sgoraniya DVS ili kotla. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Oct. 1998.

9. Ishkov, A. M., and E. L. Iovleva. "Vliyanie kachestva topliva na nadezhnost' dizel'nykh dvigatelei v usloviyakh Severa." *Nauka i obrazovanie* 1(77) (2015): 65–70.

10. Kavtaradze, Revaz, Tamaz Natriashvili, Merab Glonti, and Elshan Bahramov. "Partially homogeneous combustion traditional and alternative fuel in diesel engines part 1. Ways of combustions homogenization." *Alternative Fuel Transport* 1(61) (2018): 37–52.

11. Lifshits, L. I. *Gidrodinamicheskii vibrator konsol'nym krepleniem i ego primenenie dlya polucheniya emul'sii*. L., 1961.

12. Tsaryov, Roman Alexandrovitch. "Optoelectronic device for the control of hydrocarbon fuel cavitation treatment." *Vestnik of the Samara State Aerospace University* 1(21) (2010): 195–201.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Котов Валентин Сергеевич —

кандидат технических наук
Военный институт
(военно-морской политехнический)
ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»
196604, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
г. Пушкин, Кадетский бульвар, д. 1
e-mail: legkieshagi@yandex.ru

Кривошеев Алексей Александрович —

матрос научной роты
Военный институт
(военно-морской политехнический)
ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»
196604, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
г. Пушкин, Кадетский бульвар, д. 1
e-mail: alexey-inc.98@mail.ru

Резникова Римма Константиновна —

кандидат педагогических наук
ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»
197045, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Ушаковская набережная, д. 17/1
e-mail: legkieshagi@yandex.ru

Kotov, Valentin S. —

PhD
Military Institute
(Naval Polytechnic)
of Kuznetsov Naval Academy
1 Kadetsky Boulevard, Pushkin, St. Petersburg,
196604, Russian Federation
e-mail: legkieshagi@yandex.ru

Krivosheev, Alexey A. —

Sailor of the scientific company
Military Institute
(Naval Polytechnic)
of Kuznetsov Naval Academy
1 Kadetsky Boulevard, Pushkin, St. Petersburg,
196604, Russian Federation
e-mail: alexey-inc.98@mail.ru

Reznikova, Rimma K. —

PhD
Kuznetsov Naval Academy
17/1 Ushakovskaya embankment, St. Petersburg,
197045, Russian Federation
e-mail: legkieshagi@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20 мая 2021 г.

Received: May 20, 2021.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-575-585

NETWORK POWER CONTROL OF SCREW-STEERING COLUMN OF ELECTRIC PROPULSION VESSELS

V. I. Brezhnev

Leningrad District Oil Pipeline Administration — The Branch of Transneft Baltic, LLC,
St. Petersburg, Russian Federation

The subject of this work is to study the issue of ensuring regular navigation along the Northern Sea Route, which is much shorter compared to traditional routes passing through the South Seas and the Indian Ocean, as well as the possibility of its transformation into a national transport main waterway of the Russian Federation with a further increase in the economic contribution to the Russian economy of the Arctic zone, which is a strategic territory and it is important for ensuring the implementation of Russian national interests in the Arctic. At the same time, the necessity of using screw-steering columns with electric propulsion, which perform the functions of a steering device mover, for working on ships in harsh climatic conditions, is justified. Their main advantages are noted, namely: high maneuverability with maximum torque and thrust in any direction; reliable design without mechanical restrictions, which can withstand high sharply variable shock loads; high operational characteristics when working in ice and clean water. The problem of step-by-step regulation of power output to a screw-steering column with a main ship power plant, solved using hierarchical routing networks, is considered. It is noted that the size of the route tables supported by the switching equipment increases as a direct dependence of the increase in the size of the network, when the processor time for processing it increases, and the size of the packets exchanged by the communication equipment increases, which increases the load on the network. A general model of the network hierarchy for power monitoring and output, which is based on routers, modules, actuators, interface devices, etc., is proposed. The variants of power output from the main ship's power plant to the screw-steering column are analyzed.

Keywords: power, steering column, diesel, generator, network, regulator, fuel consumption.

For citation:

Brezhnev, Vladislav I. "Network power control of screw-steering column of electric propulsion vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 575–585. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-575-585.

УДК 621.436.038.6

СЕТЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТНЫМ РЕЖИМОМ ВИНТОРУЛЕВОЙ КОЛОНКОЙ СУДНА С ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕМ

В. И. Брежнев

ЛРНУ ООО «Транснефть-Балтика», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предметом исследования настоящей работы является изучение вопроса обеспечения регулярного судоходства по Северному морскому пути, который по сравнению с традиционными маршрутами, проходящими через южные моря и Индийский океан, намного короче, а также возможность его трансформации в национальную транспортную магистраль Российской Федерации с дальнейшим увеличением экономического вклада в российскую экономику Арктической зоны, представляющей собой стратегическую территорию, имеющую важное значение для обеспечения реализации ее национальных интересов в Арктике. При этом обоснована необходимость использования для работы на судах в суровых климатических условиях винторулевых колонок с электродвижением, выполняющих функции движителя рулевого устройства. Отмечаются их основные преимущества, а именно: высокая маневренность с максимальным моментом и тягой в любом направлении; надежная конструкция без механических ограничений, которая выдерживает высокие резко

переменные ударные нагрузки; высокие эксплуатационные характеристики при работе во льдах и чистой воде. Рассмотрена задача ступенчатого регулирования выдачи мощности на винторулевую колонку с главной судовой энергетической установкой, решаемая с использованием сетей иерархической маршрутизации. Отмечается, что величина таблиц маршрутов, поддерживаемых коммутационным оборудованием, увеличивается прямой зависимостью увеличения размеров сети, когда возрастает время процессора для ее обработки, а также увеличивается размер пакетов, которыми обменивается коммуникационное оборудование, что увеличивает нагрузку на сеть. Предлагается общая модель иерархии сети для контроля и выдачи мощности, основу которой составляют маршрутизаторы, модули, исполнительные механизмы, устройства сопряжения и др. Проанализированы варианты выдачи мощности с главной судовой энергетической установки на винторулевую колонку.

Ключевые слова: мощность, винторулевая колонка, дизель, генератор, сеть, регулятор, расход топлива.

Для цитирования:

Брежнев В. И. Сетевое управление мощностным режимом винторулевой колонкой судна с электродвижением / В. И. Брежнев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 575–585. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-575-585.

Введение (Introduction)

Одной из тенденций совершенствования пропульсивного комплекса является применение винторулевых колонок, обеспечивающих повышенную маневренность судов различного назначения. Задача регулирования мощности винторулевой колонки является актуальной, так как использование регулирования выдачи мощности судовой энергетической установки на электродвигатель винторулевой колонки, который расположен в гондоле движительного модуля, приводит в движение винт, позволяет регулировать силу тяги, а также определяет расход топлива. Особенно перспективным является использование такого регулирования мощности на судах двойного действия, работающих как на чистой воде, так и в ледовых условиях. Такое судно при движении в чистой воде потребляет до 8 МВт, а при движении во льдах носом вперед его требуемая мощность возрастает до 16 МВт. В работе предлагаются варианты регулирования мощности главной судовой энергетической установки, отличительной особенностью которых является использование преобразователей частоты. Объект регулирования представляет собой группа дизельных двигателей, работающих на газовом и дизельном топливе совместно с генераторами синхронного типа и комплектным распределительным устройством с элегазовой изоляцией (КРУЭ) [1].

Целью настоящего исследования является разработка модели регулирования мощности, подаваемой на винторулевую колонку от главной судовой энергетической установки. Для достижения обозначенной цели необходимо использовать распределенные сети, а затем показать, что использование в их составе DUAL CAN, DUAL LAN и FIBER OPTIC (сети, которые позволяют соединить между собой коммутационное оборудование) может быть представлено в виде решения задачи с применением этих сетей для регулирования параметров исполнительных механизмов и контроля параметров телеизмерения (позволяет производить удаленные измерения и сбор информации для предоставления оператору, например силы тока, температуры, давления и др.).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Предлагаемое решение. Решение поставленной задачи возможно с помощью использования следующих вариантов. Первый вариант предполагает изменение подачи топлива в главному судовому дизелю, так как дизель и генератор находятся на одном валу, зависимость между количеством топлива и вырабатываемой мощностью будет прямо пропорциональной. Вторым вариантом является отключение части цилиндров двигателя с целью уменьшения вырабатываемой мощности. Третьим вариантом является отключение дизель-генераторов судовой энергетической установки при их параллельной работе на винторулевую колонку (рис. 1) с помощью КРУЭ [2]–[4]. Четвертый вариант предполагает использование автоматического регулятора напряжения в генераторах за счет стабилизации выходного напряжения путем увеличения или уменьшения тока в обмотке

возбуждения [5]–[7]. Данные варианты контроля обеспечат ступенчатое изменение мощности и тем самым дадут возможность изменять силу тяги винта.

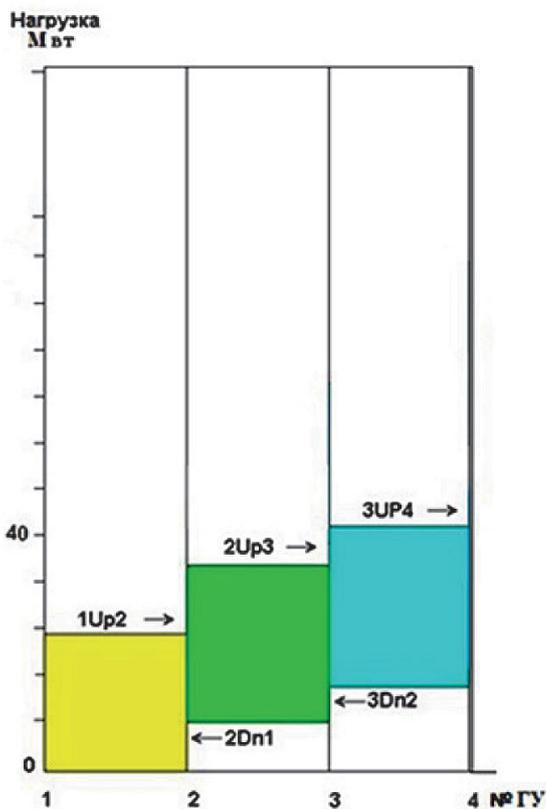


Рис. 1. Параллельная работа дизель-генераторов

Использование сетевых возможностей для ступенчатого изменения мощности, выдаваемой с главной судовой энергетической установки на винторулевую колонку. Для реализации изменения мощности используется SCADA¹, устанавливаемый на серверы и операторские консоли (например, станцию удаленного управления, пульта управления и др.). Сервер сбора и обработки информации в автоматическом режиме непрерывно собирает данные о состоянии работы машин и механизмов. Для повышения надежности системы серверы сбора и обработки информации также резервируются, представляя собой синтез на основе элементов баз знаний и серверно-сетевых технологий алгоритмов и программ распределенного управления рабочими процессами, а также дизель-генераторов для оптимизации работы винторулевой колонки.

Данные, полученные от сервера в виде мнемосхем, трендов, световых табло и текстовых сообщений, поступают на средства отображения информации. В целях дальнейшего изучения внештатных ситуаций часть данных архивируется. Средства нижнего уровня (КИПиА, исполнительные механизмы) обеспечивают сбор данных, формирование и выдачу управляющих команд на устройства, в блоки управления дизель-генераторов и винторулевую колонку.

Управление дизелем базируется на двух электронных модулях управления: главном модуле управления (МСМ — Main Control Module), модуле управления цилиндрами (ССМ — Cylinder control module), которые представляют собой распределенную систему, в которой все электронные модули обмениваются информацией через CAN друг с другом. Система собирает сигналы от различных датчиков, размещенных в разных местах на дизеле, которые подключены к локально установленным модулям. Принимаемые и обрабатываемые сигналы сравниваются с заданными параметрами

¹ SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) — программный пакет, предназначенный для обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления.

управления всех активных процессов дизелей (например, скорости или контроль нагрузки, контроль соотношения воздух / топливо и т. д.).

В состав унифицированной системы управления дизелем (рис. 2) входят: MCM — главный модуль управления; CCM — модуль управления цилиндрами; IOM — модуль входов-выходов; LDU — локальный блок индикации; ESM — модуль обеспечения безопасности двигателя; PDM — модуль распределения мощности. Первый основной модуль управления автоматически регулирует старт и останов дизеля, а также мониторинг безопасности. Если входной сигнал указывает на отклонение от заданного значения, то подается сигнал тревоги. Затем будет дан запрос на уменьшение нагрузки или с ухудшением сигнала производится выключение.

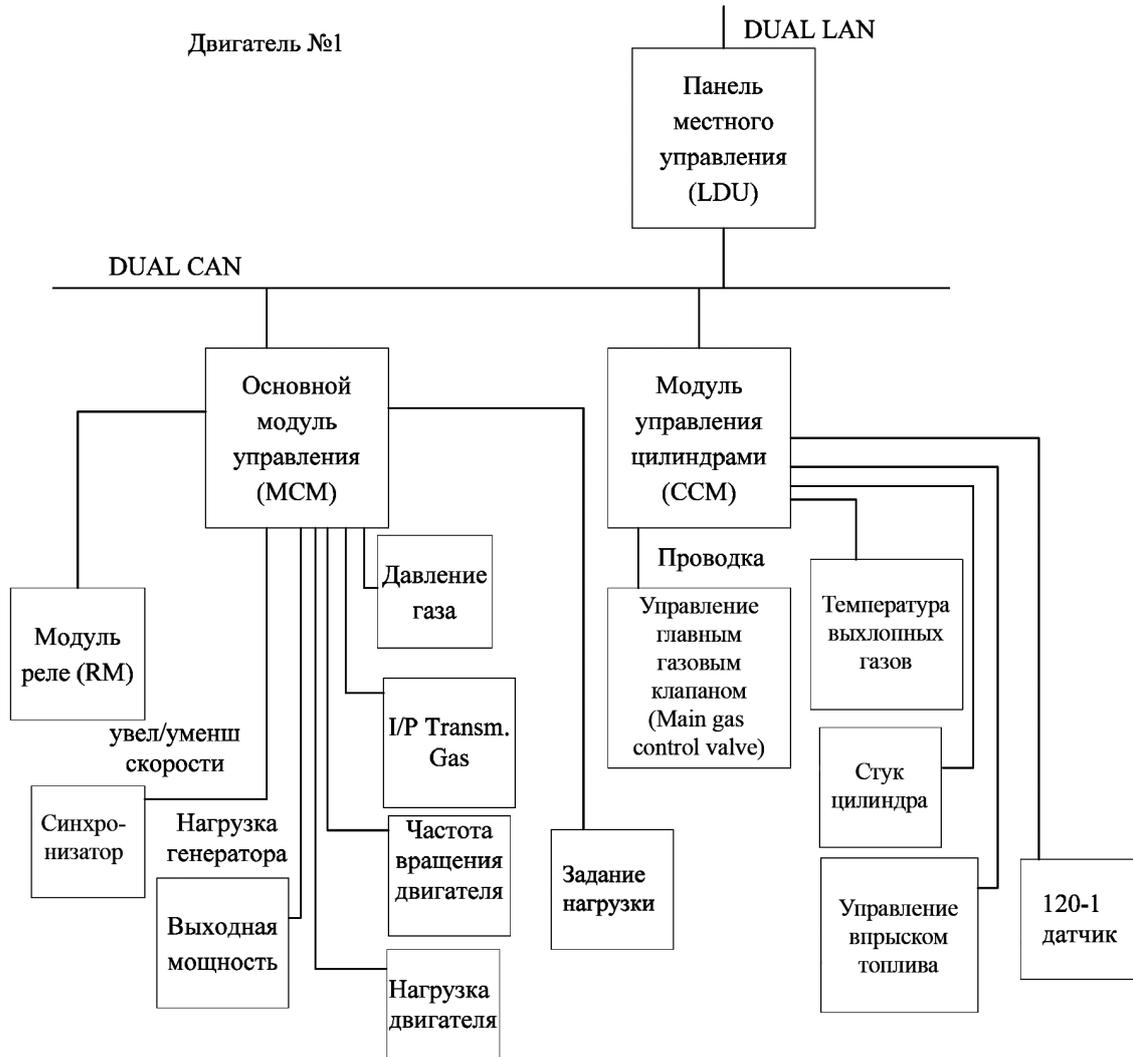


Рис. 2. Унифицированная система управления дизелем

Второй основной модуль управления используется исключительно для сбора сигналов с датчиков и управления перепускным клапаном. Используется несколько модулей управления цилиндрами дизеля, каждый из которых обрабатывает три цилиндра. Все модули монтируются вдоль стороны дизеля рядом с датчиками или блоками управления, которые они считывают и/или контролируют. Кроме того, модули отключают подачу топлива в цилиндры дизеля, рассчитанную на свободный ход судна (без нагрузки) и не тормозят работу других, при этом клапаны газораспределительного механизма в них открыты. При отключении подачи топлива в цилиндры воздух перераспределяется и его отводят и подают в действующие цилиндры. Отключение топливopодачи в цилиндры дизеля осуществляется с помощью электромагнитных клапанов.

Все необходимые процессы основаны на данных, получаемых по DUAL CAN между модулями (рис. 3). Параметры обрабатываются и передаются на внешний интерфейс поста по коммуникационной шине в виде показаний и графиков. Когда дизель запущен и напряжение генератора установлено, генератор может быть соединен с коммутатором. По команде CONNECT от поста будет выполнено активирование синхронизации блока, расположенного в каждой панели генератора. Блок синхронизации будет выполнять регулировку оборотов двигателя и напряжения / частоту / фазу.

Генератор поддерживает ряд опций распределения нагрузки: симметричная нагрузка, асимметричное распределение нагрузки, постоянная нагрузка, совместная ручная нагрузка, настройка внешней нагрузки. В режиме газового топлива (FG), генераторы, работающие в режиме FG, имеют ограничения на изменения нагрузки. Режим разделения нагрузки может быть выбран индивидуально для каждого генератора. Распределение нагрузки основано на активной мощности (кВт). Для распределения нагрузки и контроля частоты скорость увеличивается / уменьшается, сигналы (импульсы) передаются регулятором скорости. Понижение скорости всегда применяется равным около 4 %. В режиме, симметричном распределению, нагрузки работающих параллельно генераторов будут равны. При асимметричном распределении нагрузки один генератор будет загружен на 80 % (Master), а остальные генераторы (Slaves) поделят оставшуюся нагрузку. Генератор будет выбран в качестве основного в течение четырех часов, прежде чем он автоматически перейдет к следующему генератору. Если оставшаяся нагрузка на ведомый генератор падает ниже 30 %, то нагрузка на задающем генераторе будет снижаться. Если нагрузка на ведомых генераторах превышает 80 %, то она распределится симметрично между всеми генераторами [8]–[10].

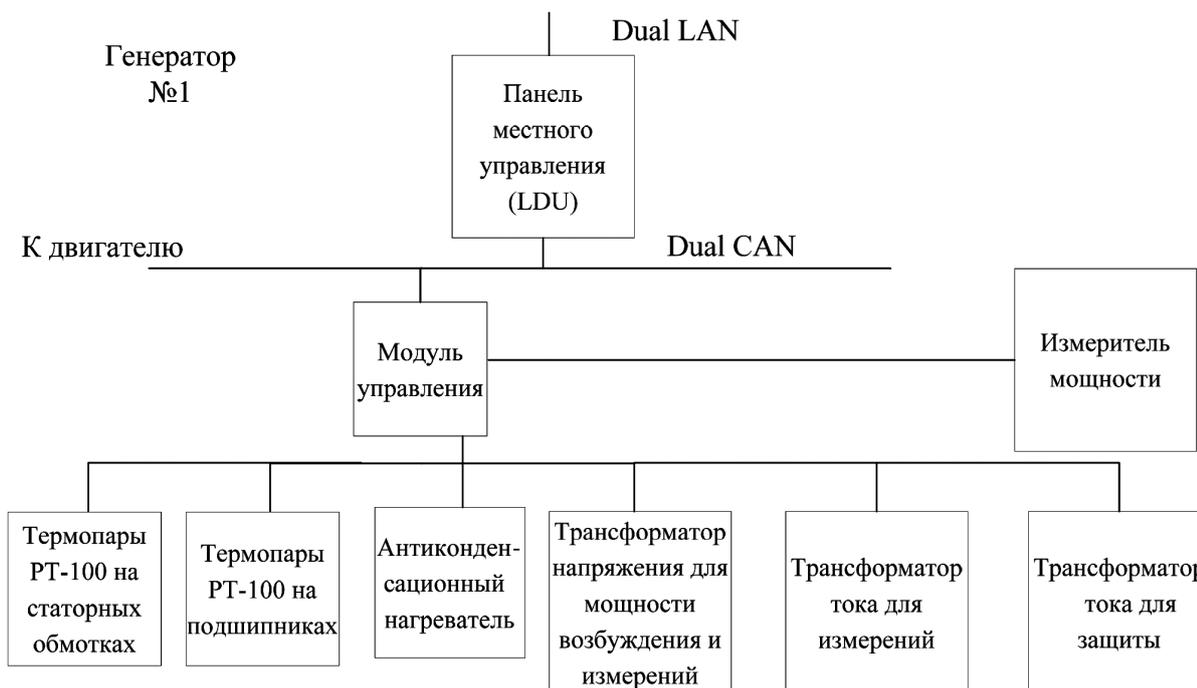


Рис. 3. Элементы для «визуализации» процессов в генераторе

Главная судовая энергетическая установка включает два кормовых подруливающих устройства. Винты подруливающих устройств приводятся в движение электродвигателями переменного тока (АС), которые питаются от преобразователей частоты. Подруливающие устройства имеют четырехлопастные воздушные винты фиксированного шага с воздуховодом. Направленная тяга достигается поворотом подруливающих устройств. Двигатели установлены вертикально внутри корпуса в отсеках силового привода левого и правого борта. Мощность передается от каждого двигателя. Система рулевого управления состоит из подсистемы динамического позиционирования (два

рабочих места в кормовой консоли рубки и переносная панель джойстика DP в рубке); независимой подсистемы джойстиков на консоли FWD Pilothouse; МТС (ручное управление подруливающим устройством) органов управления носовым и кормовым подруливающими устройствами на передней и кормовой консолях рулевой рубки; автопилота, расположенного на консоли FWD Pilothouse; управления кормовым подруливающим устройством МТС в обоих помещениях распределительного щита; регуляторов уровня тяги на панелях преобразователя кормового подруливающего устройства; управления кормовым приводом на местных пультах в отсеках маршевого привода; органов управления на панелях преобразователя носового подруливающего устройства скоростью и направлением носового подруливающего устройства, доступного с ЦПМ DP, Pilothouse на передних, кормовых и мостовых станциях крыла. Управление передается из одного места в другое с помощью логики «предложение и принятие». Оператор инициирует предложение от контролируемой станции, а другая станция может затем нажать кнопку, чтобы принять управление. Органы управления кормовыми и носовыми подруливающими устройствами могут быть сгруппированы или разгруппированы на панелях управления МТС, показанных на местном рулевом управлении кормовыми подруливающими устройствами, которое может осуществляться в каждом отсеке силового привода. Местное управление тягой кормовых подруливающих устройств может осуществляться на местном посту. Скорость и направление носовых подруливающих устройств можно регулировать также на местном посту.

Два преобразователя кормовых подруливающих устройств нереверсивны. Реверс тяги достигается поворотом подруливающего устройства на 180°. При запуске оператором подруливающего устройства в положении, противоположном движению судна, возможно, винт будет вращаться в направлении ветра, противоположном направлению движения. Если это произойдет, то на панели аварийной сигнализации привода и в системе автоматизации появится сигнал об обратном вращении, чтобы предупредить оператора о необходимости повернуть подруливающее устройство для достижения нулевого или прямого вращения перед подачей питания.

Кормовые подруливающие устройства оснащены механизмом блокировки вала для технического обслуживания. Преобразователи мощности кормового подруливающего устройства способны ограничивать крутящий момент гребного двигателя, когда подруливающие устройства работают на высоких скоростях и при экстремальных углах поворота (более 35° по левому или по правому борту). Это ограничение используется в качестве меры предосторожности для предотвращения перегрузки двигателя. Крутящий момент двигателя может быть ограничен до 50 % максимального крутящего момента на высоких скоростях и углах поворота более 40° от средней линии. Если двигательная установка постоянно находится в переднем или заднем положении, крутящий момент гребного двигателя может быть увеличен до 100 %.

Преобразователи носового подруливающего устройства являются реверсивными для обеспечения тяги в любом направлении. Носовые подруливающие устройства установлены внутри туннелей, идущих от левого к правому борту в носовой части корабля. Все рулевое управление сосредоточено в каждой полевой станции VCS подруливающего устройства. Полевые станции подруливающих устройств передают сигналы управления системой к подруливающим устройствам посредством DUAL CAN полевой станции. Для того, чтобы управлять подруливающими устройствами дистанционно, шкафы местного управления в отсеках силового привода и в помещении носового подруливающего устройства должны быть установлены на дистанционное управление. Контроллер полевой станции подруливающего устройства считывает логику. Этот ввод дает возможность удаленным станциям взять на себя управление [11], [12].

Каждый контроллер отвечает за выбор устройства рулевого управления, контролирующего работу двигателей. Когда устройство управления запрашивает управление, микроконтроллер будет ждать пока текущая управляющая станция не откажется от управления. Обычно управление предлагается на текущей контролируемой станции и принимается на следующей станции. Контроллер переключит опорные команды двигателя на новую станцию. Оператор должен установить приближающуюся станцию управления подруливающим устройством (направление и скорость) в теку-

щее требуемое положение, прежде чем принимать управление, предотвращающее несоответствие управления. После того как станция приняла управление, все двигатели будут следовать командам до текущего заданного положения управляющих головок (скорость и направление) в управлении. Если контролируемая станция потеряна, контроллер позволит другой станции взять на себя управление с помощью логики принятия. Все органы управления имеют одинаковую иерархию, за исключением локальных панелей управления отсеков силовых установок левого и правого борта и автопилота передней консоли рулевой рубки.

Винторулевая колонка может поворачиваться на 360° с полным контролем (система рулевого управления или автопилот) или без контроля (местный шкаф) с помощью трех электрических двигателей рулевого управления и двух преобразователей частоты. Электронный блок управления обрабатывает сигналы, поступающие либо от системы рулевого управления, либо от местных систем, не отслеживающих кнопок, а также индикацию направления тяги, журнал доплеровской скорости и индикацию уровня тяги и передает отфильтрованные сигналы на три двигателя рулевого управления. Электродвигатели рулевого управления будут приводиться в действие электронным блоком управления через один из двух частотно-регулируемых приводов до тех пор, пока не будет достигнуто выбранное направление тяги. Кнопки сброса преобразователя частоты расположены на главном шкафу. Для изменения направления тяги на 180° требуется примерно 14 с в зависимости от скорости корпуса. Крутящий момент гребного двигателя снижается на высоких скоростях (более 8 уз) и при экстремальных углах поворота ($> 35^\circ$), чтобы предотвратить перегрузку гребного двигателя. Ограничение крутящего момента гребного двигателя не сигнализируется судовой системой мониторинга аварийной сигнализации или пультом управления. Если двигательная установка постоянно находится в положении «Вперед» или «Назад», крутящий момент гребного двигателя может быть увеличен до максимального значения (100 %).

Электродвигатель винторулевой колонки защищен от тепловой перегрузки датчиками температуры Pt-100, устанавливаемыми на каждую фазу статора, причем их температура должна контролироваться. Статор пропульсивного двигателя винторулевой колонки оборудован двумя датчиками воздушного зазора для контроля воздушного зазора. Датчики воздушного зазора наклеиваются на поверхность сердечника статора. Детектор воздушного зазора предназначен для подачи сигнала тревоги оператору при наличии в воздушном зазоре посторонних предметов. Потеря одного извещателя вызывает тревогу, потеря двух — отключение. Выпрямительные диоды защищены от перенапряжений RC-блоком. Общая структура контроля параметров в винторулевой колонке показана на рис. 4. В случае полного отказа сети с двойным резервированием VCS, VCS и управление DP будут потеряны. В этой ситуации вспомогательное оборудование можно запускать и останавливать с помощью местного управления. При этом управление движителем и подруливающим устройством от MTC и IJS все еще возможно.

Полевые станции подруливающих устройств передают сигналы управления системой к подруливающим устройствам посредством локальных шин ввода / вывода (I / O) внутри полевой станции. Чтобы управлять подруливающими устройствами дистанционно, шкафы местного управления в отсеках силового привода и в помещении носового подруливающего устройства должны быть установлены на дистанционное управление. Микроконтроллер полевой станции подруливающего устройства считывает этот ввод и дает возможность удаленным станциям взять на себя управление. Каждый микроконтроллер отвечает за выбор того, какое рулевое устройство управляет подруливающими. Когда устройство запрашивает управление, микроконтроллер будет ждать, пока текущая управляющая станция не откажется от управления. Обычно управление предлагается на текущей контролируемой станции и принимается на следующей станции. Микроконтроллер переключит опорные команды двигателя на новую станцию. Оператор должен установить приближающуюся станцию управления подруливающим устройством (направление и скорость) в текущее требуемое положение, и прежде чем принимать управление, убедиться в том, что нет другой логики, предотвращающей несоответствие управления. После того как станция приняла управление, все

двигатели будут следовать командам до текущего заданного положения управляющих головок (скорость и направление). Если контролируемая станция потеряна, микроконтроллер позволит другой станции взять на себя управление через логику принятия. Все органы управления имеют одинаковую иерархию, за исключением панелей местного управления отсеков силовых установок левого и правого борта и автопилота на передней консоли рулевой рубки [13], [14].

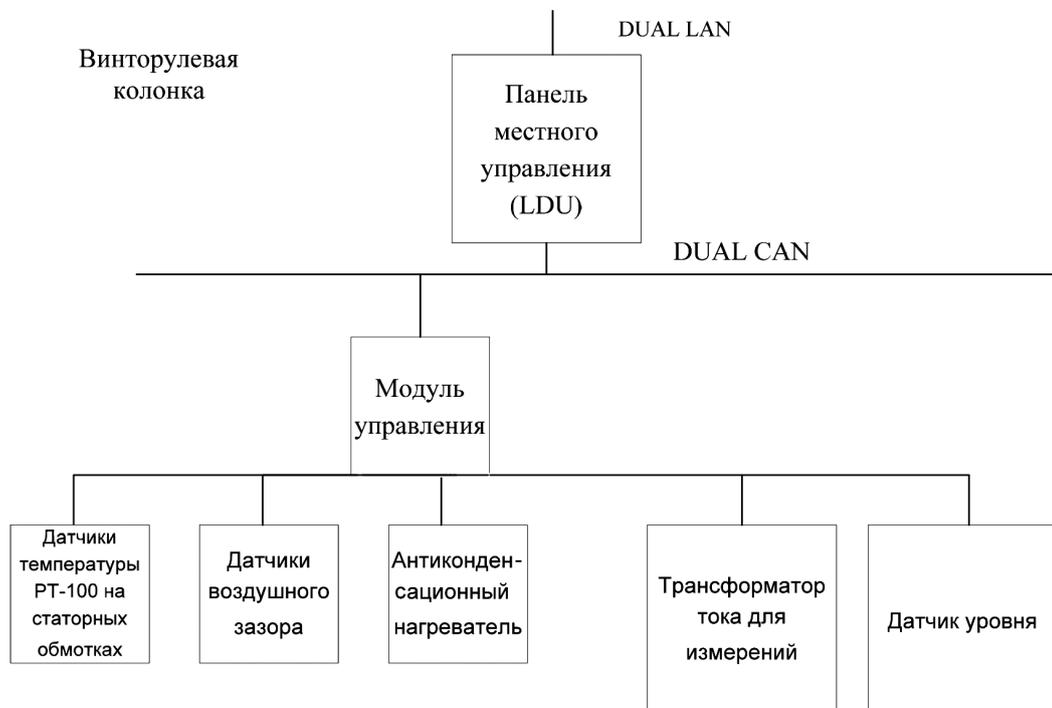


Рис. 4. Общая структура контроля параметров в винторулевой колонке

Шкафы преобразователя носового подруливающего устройства позволяют локально управлять скоростью носового подруливающего устройства, запускать или останавливать преобразователь, а также отображать аварийные сигналы и состояние привода. Каждое из кормовых подруливающих устройств имеет шкаф местного управления кормовым подруливающим устройством на распределительной коробке в соответствующем отсеке силового привода, из которого можно локально управлять рулевым управлением подруливающего устройства. Панель жидкокристаллического дисплея также установлена на шкафу для отображения направления тяги и скорости двигателя. Уровень тяги нельзя контролировать из шкафа местного управления кормовым подруливающим устройством. Регулировка тяги доступна в шкафах преобразователя кормового подруливающего устройства или на более высоком уровне управления. На шкафах преобразователя кормового подруливающего устройства рулевое управление отсутствует. Заметка *Кнопки DRIVE CONTROL* на шкафу местного управления кормовым подруливающим устройством не подключена. Управление локальным приводом из шкафа местного управления кормовым подруливающим устройством невозможно. Все рулевое управление кормовыми подруливающими устройствами централизовано через шкаф местного управления кормовыми подруливающими устройствами. В дистанционном режиме микроконтроллеры системы рулевого управления, расположенные на полевых станциях, полностью контролируют рулевое управление системы. Все шкафы местного управления могут забрать управление с микроконтроллеров, выбрав локальное управление.

Результаты (Results)

На основе результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Обоснована необходимость совершенствования систем регулирования мощности, передаваемой на винторулевую колонку.

2. Разработана структура системы контроля и управления параметрами передачи мощности от главных судовых двигателей винторулевой колонке.
3. Обеспечена возможность сохранения работоспособности судна в случае полного отказа сети с двойным резервированием.
4. Раскрыты новые возможности управления дизелем, генератором и винторулевой колонкой через сети.
5. Раскрыта логика перехода управления с одного поста на другой.

Обсуждение (Discussion)

Проведенные исследования предполагается использовать для ступенчатого изменения выдачи мощности на винторулевую колонку. Сетевые возможности раскрывают большие возможности для изменения мощности — сеть содержит иерархию уровней, где каждый последующий уровень передает данные и управление предыдущему (более низкому) уровню до тех пор, пока данные не опустятся на самый нижний уровень. Под нижним уровнем находится физическая обстановка, через которую происходит обмен данными.

Заключение (Conclusion)

В результате данного исследования разработана модель сетевого взаимодействия при ступенчатой выдаче мощности с главной судовой энергетической установки на винторулевую колонку, позволяющей обеспечивать необходимое количество мощности для ее потребления. Разработанная модель имеет сложную структуру, которая включает большое количество измерительных и исполнительных составляющих. При этом следует отметить, что выбор оптимального режима выдачи мощности — непростая задача, требующая исследования. Выдача мощности, позволяет сделать вывод о том, что ее значения также зависят от условий эксплуатации судна и его характеристик. Кроме того, при поломке сетевого управления в части регулирования мощности путем отключения цилиндров может оказаться в нерабочем состоянии половина дизеля. В случае идеального применения модели сетевого взаимодействия для дизелей, состоящих из восьми и более цилиндров, экономия топлива может составить до 30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Титов И. Л.* Использование эргономических систем в газовых и двухтопливных двигателях для распределения нагрузки / И. Л. Титов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 196–205. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-196-205.
2. *Нырков А. П.* Модели мониторинга и управления процессами стабилизации обменных колебаний мощности в автономных электроэнергетических системах / А. П. Нырков, А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Проблемы управления. — 2016. — № 4. — С. 22–28.
3. *Железняк А. А.* Идентификация процесса управления регулятора оборотов генератора двигателя судна / А. А. Железняк, В. А. Доровской, Л. Н. Безменникова // Научный вестник воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. — 2015. — № 2 (6). — С. 67–71.
4. *Жиленков А. А.* Уточненная математическая модель газодизеля для исследования многогенераторных систем / А. А. Жиленков [и др.] // Датчики и системы. — 2016. — № 8–9 (206). — С. 33–41.
5. *Железняк А. А.* Совершенствование методов и средств управления судовой электроэнергетической установкой рыбопромыслового судна: моногр. / А. А. Железняк. — Ульяновск: Зебра, 2019. — 126 с.
6. *Железняк А. А.* Мониторинг данных микропроцессорных сетей управления судовыми электроэнергетическими системами / А. А. Железняк, В. А. Доровской // Системы управления и информационные технологии. — 2015. — № 4 (62). — С. 89–94.
7. *Черный С. Г.* Интеллектуальная поддержка принятия решений при оптимальном управлении для судовых электроэнергетических систем / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 68–75.

8. Черный С. Г. Повышение производительности микропроцессорной сети управления на платформе ethernet для системы буровых комплексов / С. Г. Черный // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2016. — № 1. — С. 2–10.

9. Жиленков А. А. Исследование автоколебательных процессов в комбинированных автономных электроэнергетических системах / А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Контроль. Диагностика. — 2016. — № 5. — С. 61–67. DOI: 10.14489/td.2016.05.pp.061–067.

10. Ныркoв А. П. Программно-аппаратная реализация системы предупреждения аварийной ситуации для объектов морского транспорта / А. П. Ныркoв [и др.] // Автоматизация в промышленности. — 2016. — № 2. — С. 56–60.

11. Nyrkov A. P. Hard- and software implementation of emergency prevention system for maritime transport / A. P. Nyrkov, A. A. Zhilenkov, S. S. Sokolov, S. G. Chernyi // Automation and Remote Control. — 2018. — Vol. 79. — Is. 1. — Pp. 195–202. DOI: 10.1134/S0005117918010174.

12. Zhilenkov A. A. Analytical methods of destabilizing factors of improving the technical systems efficiency / A. A. Zhilenkov [et al.] // International Journal of Energy. — 2017. — Vol. 11. — Pp. 46–49.

13. Nyrkov A. P. Development of underwater robotics / A. P. Nyrkov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 803. — Is. 1. — Pp. 012108. DOI: 10.1088/1742–6596/803/1/012108.

14. Nyrkov A. Mathematical models for solving problems of reliability maritime system / A. Nyrkov, [et al.] // Lecture Notes in Electrical Engineering. — Springer, Singapore, 2018. — Pp. 387–394.

REFERENCES

1. Titov, Ivan Leonidovich. “Ergonomic use systems in gas and dual fuel engines for load balancing.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 196–205. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-196-205

2. Nyrkov, A. P., A. A. Zhilenkov, and S. G. Chernyi. “Modeli monitoringa i upravleniya protsessami stabilizatsii obmennykh kolebaniy moshchnosti v avtonomnykh elektroenergeticheskikh sistemakh.” *Problemy upravleniya* 4 (2016): 22–28.

3. Zheleznyak, A. A., V. A. Dorovskoy, and L. N. Bezmennikova. “Identification of the process control for speed control of engine generator vessel.” *Nauchnyi vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Informatsionnye tekhnologii v stroitel'nykh, sotsial'nykh i ekonomicheskikh sistemakh* 2(6) (2015): 67–71.

4. Zhilenkov, Anton A., Sergei G. Chernyi, Ivan L. Titov, and Aleksandr S. Bordug. “Developing the specified mathematical model of combined engine for the study of process.” *Sensors & Systems* 8–9 (206) (2016): 33–41.

5. Zheleznyak, A. A. *Sovershenstvovanie metodov i sredstv upravleniya sudovoi elektroenergeticheskoi ustanovkoi rybopromyslovogo sudna: monografiya*. Ul'yanovsk: Zebra, 2019.

6. Zheleznyak, A. A., and V. A. Dorovskoi. “Monitoring dannykh mikroprotsessornykh setei upravleniya sudovymi elektroenergeticheskimi sistemami.” *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* 4(62) (2015): 89–94.

7. Chernyi, S. G., and A. A. Zhilenkov. “Intellectual decision support at the optimum system for ships electrical power systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(25) (2014): 68–75.

8. Chernyi, S. G. “Improving performance of microprocessor network management platform for ethernet systems drilling rigs.” *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics* 1 (2016): 2–10.

9. Zhilenkov, A. A., and S. G. Chernyi. “The investigation of the self-sustained oscillations in a combined autonomous electric energy systems.” *Testing. Diagnostics* 5 (2016): 61–67. DOI: 10.14489/td.2016.05.pp.061–067

10. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, A. A. Zhilenkov, and S. G. Chernyi. “Programmno-apparatnaya realizatsiya sistemy preduprezhdeniya avariinoy situatsii dlya ob'ektov morskogo transporta.” *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* 2 (2016): 56–60.

11. Nyrkov, A. P., A. A. Zhilenkov, S. S. Sokolov, and S. G. Chernyi. “Hard- and software implementation of emergency prevention system for maritime transport.” *Automation and Remote Control* 79.1 (2018): 195–202. DOI: 10.1134/S0005117918010174.

12. Zhilenkov, A. A., S. S. Sokolov, A. P. Nyrkov, and S. G. Chernyi. “Analytical methods of destabilizing factors of improving the technical systems efficiency.” *International Journal of Energy* 11 (2017): 46–49.

13. Nyrkov, A. P., A. A. Zhilenkov, V. V. Korotkov, S. S. Sokolov, and S. G. Chernyi. "Development of underwater robotics." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 803. No. 1. IOP Publishing, 2017. 012108. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012108.

14. Nyrkov, A., K. Goloskokov, E. Koroleva, S. Sokolov, A. Zhilenkov, and S. Chernyi. "Mathematical models for solving problems of reliability maritime system." *Advances in Systems, Control and Automation*. Springer, Singapore, 2018. 387-394.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Брежнев Владислав Игоревич —
инженер-электроник
ЛРНУ ООО «Транснефть-Балтика»
195009, Российская Федерация,
Санкт-Петербург,
Арсенальная набережная, 11, литер А
e-mail: vladislav_br@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Brezhnev, Vladislav I. —
Electronic engineer
Leningrad District Oil Pipeline Administration —
The Branch of Transneft Baltic, LLC
11/A Arsenalnaya embankment, St. Petersburg, 195009,
Russian Federation
e-mail: vladislav_br@list.ru

*Статья поступила в редакцию 12 мая 2021 г.
Received: May 12, 2021.*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF DIRECT FLUX AND TORQUE CONTROL TECHNOLOGY FOR DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR WITH A ROBUST CONTROL USING MODIFIED SUPER-TWISTING ALGORITHMS

A. N. J. Almakki¹, A. A. Mazalov^{1,2}

¹ — Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russian Federation

² — Southern Federal University, Rostov-On-Don, Russian Federation

A robust direct flux and torque control (DFTC) technique of a doubly-fed induction generator (DFIG) for wind turbine applications (WTA) is presented in the paper. The main advantages of traditional DFTC control method are its simple structure, robust technique and good dynamic response compared to the field-oriented control (FOC). The use of a classical hysteresis comparator and a predefined lookup table will inevitably lead to select a non-optimal rotor voltage vector in terms of reducing rotor flux errors, harmonic distortion (THD) current, and electromagnetic torque undulations. In this research work, a new approach of DFTC technique of DFIG based modified super-twisting algorithms (MSTA) and modified space vector modulation (MSVM) is developed by replacing the traditional lookup table and two hysteresis comparators. Theoretical principles of this method are presented along with simulation results. Analysis of DFTC–MSVM control scheme based MSTA controllers have been done in MATLAB/Simulink environment. The machine (DFIG 1,5MW) is tested in association with a wind turbine. Simulation results are presented. The proposed DFTC control technique takes full advantage and the electromagnetic torque regulation objective of DFIG is confirmed by the numerical simulation results compared to the traditional DFTC control technique.

Keywords: robust direct flux and torque control, doubly-fed induction generator, variable-speed wind turbine applications, modified super-twisting algorithms, modified space vector modulation.

For citation:

Almakki, Ali Nadhim Jbarah, and Andrey A. Mazalov. "Improving the efficiency of direct flux and torque control technology for doubly-fed induction generator with a robust control using modified super-twisting algorithms." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 586–603. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-586-603.

УДК 621.311.2

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ДВОЙНЫМ ПИТАНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ СУПЕРСКРУЧИВАНИЯ

А. Н. Д. Алмакки¹, А. А. Мазалов^{1,2}

¹ — ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ», Казань, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону, Российская Федерация

В данной работе представлена технология прямого управления потоком и крутящим моментом (DFTC) асинхронного генератора с двойным питанием (DFIG) для применения в ветроэнергетических установках. Отмечается, что основными преимуществами традиционного прямого управления потоком и крутящим моментом (DFTC) являются его простая структура, надежность и хорошая динамическая реакция в сравнении с технологией управления полем (FOC). Использование классического гистерезисного компаратора и заранее заданной таблицы значений неизбежно приведет к выбору неоптимального вектора напряжения ротора с точки зрения уменьшения колебаний потока ротора, токов гармонических искажений (THD) и колебаний электромагнитного момента. Рассмотрен новый подход к методу DFTC на основе

модифицированного алгоритма суперскручивания (MSTA) и модифицированной пространственной векторной модуляции (MSVM), главной особенностью которого является замена традиционной таблицы значений и двух гистерезисных компараторов. Теоретические принципы этого метода представлены вместе с результатами моделирования. Анализ системы управления DFTC–MSVM на основе метода MSTA был проведен в MATLAB/Simulink. Работа асинхронного генератора с двойным питанием (1,5 МВт) была проверена вместе с ветровой турбиной. В работе приведены также результаты моделирования. Предложенный метод управления DFTC в полной мере использует преимущества регулирования электромагнитного момента DFIG, имеет улучшенные характеристики по сравнению с традиционным методом управления DFTC, что подтверждено результатами численного моделирования.

Ключевые слова: робастное управление, прямой поток, асинхронный генератор с двойным питанием, ветротурбина с переменной скоростью, модифицированные алгоритмы суперскручивания, модифицированная пространственная векторная модуляция.

Для цитирования:

Алмакки А. Н. Д. Повышение эффективности технологии прямого управления потоком для асинхронного генератора с двойным питанием с использованием модифицированных алгоритмов суперскручивания / А. Н. Д. Алмакки, А. А. Мазалов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 586–603. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-586-603.

Introduction

The direct flux and torque control (DFTC) strategy has been widely used in the AC machines drive because of its many properties such as robustness against the AC machines parameter variation, simplicity, and quick electromagnetic torque response [1]. In [2], the authors proposed the use of a DFTC method to control the induction motor drive. In [3], the DFTC technique was proposed to reduce the flux and electromagnetic torque undulation of permanent magnet synchronous motor (PMSM). Classical DFTC technique is proposed to regulate the rotor flux and torque of a doubly-fed induction generator (DFIG) [4]. The numerical simulation shows the superiority of the DFTC technique compared to field-oriented control. In [5], the authors proposed the use of a DFTC method to regulate the torque and flux of the dual stator induction motor (DSIM). DFTC control was proposed to control the squirrel cage induction generator (SCIG) [6]. In [7], the DFTC method was proposed to reduce the torque ripple of the brushless DC electric motor. The performance and efficiency of the five-phase PMSM drive were improved by using the fuzzy DFTC control method, and this was confirmed by the results obtained during the application of this method [8]. In [9], the authors designed the use of a DFTC with feedforward neural network controllers and five-phase neural modified space vector modulation (MSVM) strategy applied to the five-phase IMPSM drive. In [10], four-level DFTC method based on neural algorithm has been proposed. The electromagnetic torque ripple was reduced when use the neural algorithm.

In the basic DFTC technique, both the stator flux and electromagnetic torque errors between estimated and reference values are directly compared, and the appropriate voltage vector is produced by a traditional lookup table. This simple structure allows quick flux and electromagnetic torque responses to be achieved while increasing the robustness against the parameter variations. However, the DFTC technique shows some disadvantages such as switching frequency varies according to the change of the AC machine parameters and the rotor speed and large electromagnetic torque and stator flux undulations in the low-speed region and cannot guarantee the robustness of speed control against unmodeled uncertainties. On the other hand, the electromagnetic torque ripples are large in the case of high-power applications and this is due to the low switching frequency of the inverter [11].

Recently, several research works have been carried out in order to improve the performance of the classical DFTC technique. Among these, a voltage selection and electromagnetic torque ripple reduction algorithm for a three-level inverter system [12], and a flux and electromagnetic torque undulations minimization algorithm for a traditional inverter [13] are presented. Particularly, for high-power AC machines applications, the electromagnetic torque undulations can be drastically minimized using a three-level inverter DFTC system [14]. In the DFTC technique, speed control effectiveness is still affected by external

load disturbances and parameter variations. A hybrid control strategy was designed in [15], where the neural algorithm is used a switching table to generate the switching states of the inverter, whereas the fuzzy logic controller (FLC) was used to generate the reference electromagnetic torque. The work in [16] suggests SVM strategy-based DFTC for DFIG-based wind turbines and the references for the SVM are generated from the classical PI controllers. The neural algorithms are also used in place of the switching table [17]. The neural algorithms are having issues with weight convergence, stability, and learning speed. The work designed in [18] uses a neural-based controller for DFTC fed DFIG-based wind power. In [19], the DFTC method based on closed-loop torque control has been proposed. However, the magnitude of torque linkage is adjusted to improve the effectiveness of the induction motor. In [20], the DFTC method based on closed-loop stator flux control has been proposed. In this proposed DFTC technique, the magnitude of flux linkage is adjusted to improve the effectiveness of the induction motor. In [21], the authors proposed the use of a DFTC with both closed-loop torque and flux controls applied to the induction motor drive.

In literature, many implementations are designed to the nonlinear DFTC with SVM technique to improve the dynamic performance and to minimize the electromagnetic torque/flux undulations of the DFIG-based wind turbine. In [22], the authors proposed the use of the DFTC with super twisting algorithms (STA) applied to the DFIG-based wind turbine. A novel DFTC technique using FLC and second-order sliding mode controllers was proposed to improve the performance of the DFIG-based wind turbines [23]. The simulation results show the performance of the proposed DFTC technique compared to the classical DFTC method. STA controller and neuro-fuzzy are combined to improve the performance of the DFTC method for the DFIG-based wind turbine [24]. The simulation results show the performance of the design of the proposed DFTC method compared to the classical DFTC technique. The major disadvantage of DFTC-STA, are the oscillations of the electromagnetic torque and the harmonics of the stator currents generated by the DFIG, because of the variable switching frequency. For this, in this work, we proposed a new nonlinear method to improve the performance and effectiveness of the control by STA controllers. Thus, reducing ripples at the level of electromagnetic torque and rotor flux. Another method based on the FLC method is proposed in order to improve the performance of the DFTC technique of the DFIG-based wind turbine [25]. In [26], a modified DFTC technique was proposed based on hysteresis comparators and variable gain PI controllers, where a PI controller was adjusted by a particle swarm optimization (PSO) algorithm.

In this work, rotor flux and electromagnetic torque controller using the modified super twisting algorithms (MSTA) and modified SVM technique (MSVM) is proposed. The drawbacks of the DFIG system including electromagnetic torque ripple, harmonic distortion of current, and rotor flux ripple are minimized by the MSTA controllers and MSVM technique, and the responses dynamic is improved compared to the traditional DFTC technique with PI controllers. The advantages of the designed MSTA controller are (d) simple in design, (c) simple control strategy, (e) easily tunable (b) no additional hardware is required, and (a) accurate response in dynamic conditions. The stability of the modified STA is proven using the Lyapunov theorem. Numerical simulation results are presented to verify the feasibility and performances of the DFTC with designed MSTA controllers and MSVM techniques.

The remaining paper is organized as follows: Section 2 presents the mathematical model of wind turbine and the DFIG, followed by a brief discussion on STA controller in Section 3. In section 4, the novel DFTC control using modified STA controllers is applied to the DFIG control. Section 5 presents the simulation results followed by the conclusion.

Methods and Materials

System modeling

Wind turbine model. Wind energy is one of the most widely used and popular sources in recent times. A wind turbine is a device that transforms the kinetic energy of the wind into mechanical energy, known as wind energy, which is then most often transformed into electrical energy. The mechanical power obtained from the turbine is given by the following equation [23], [24]:

$$P_t = \frac{1}{2} R^2 \rho v^3 C_p(\lambda, \beta). \quad (1)$$

Where, v is the wind speed (m/s), ρ is the air density (kg/m³), R is the radius of the turbine (m), and C_p is the power coefficient which is a function of both blade pitch angle β (deg), and tip speed ratio λ .

In this work, the power coefficient C_p equation is approximated using a non-linear function according to [27].

$$C_p(\lambda, \beta) = (\beta - 2)(0,5 - 0,167) \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3(\beta - 2)} \right] - 0,0018 (\beta - 2)(\lambda - 3). \quad (2)$$

The tip speed ratio is given by:

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{v}. \quad (3)$$

Where Ω_r is the rotational speed of the wind turbine.

Dynamic model of DFIG. The DFIG is the most widely used generator in the field of electric power generation using wind energy, and this is due to its advantages. DFIG is a machine that uses the kinetic energy of the wind to produce an electric current. In [22], the Park model is more used in giving a mathematical model of the DFIG. The dynamics model of the DFIG is written as follow [27]:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - \omega_r \psi_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr}; \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \omega_r \psi_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr}; \\ V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{ds}; \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} \end{cases} \quad (4)$$

The rotor and stator pulsations and rotor speed are interconnected by the following equation: $\omega_s = \omega_r + \omega$. Where ω_r and ω_s are respectively the rotor and stator electrical pulsations, while ω is the mechanical one. The rotor and stator flux can be written as follows:

$$\begin{cases} \psi_{dr} = M I_{ds} + L_r I_{dr}; \\ \psi_{qr} = M I_{qs} + L_r I_{qr}; \\ \psi_{ds} = M I_{dr} + L_s I_{ds}; \\ \psi_{qs} = M I_{qr} + L_s I_{qs} \end{cases} \quad (5)$$

$(V_{dr}, V_{qr}, V_{ds}, V_{qs}), (\psi_{dr}, \psi_{qr}, \psi_{ds}, \psi_{qs}), (I_{dr}, I_{qr}, I_{ds}, I_{qs})$, are respectively the stator and rotor voltages, fluxes and currents, R_r and R_s are respectively the resistances of the stator and rotor windings, L_r, L_s , and M are respectively the inductance own rotor, stator, and the mutual inductance between two coils.

The mechanical equation of the DFIG is:

$$T_e = T_r + J \frac{d\Omega}{dt} + F_r \Omega. \quad (6)$$

The electromagnetic torque established by the DFIG can be written in terms of flux and currents by (7):

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{M}{L_s} n_p (-\psi_{ds} I_{qr} + \psi_{qs} I_{dr}). \quad (7)$$

Where J is the inertia, Ω is the mechanical rotor speed, T_r is the load torque, and F_r is the viscous friction coefficient. The reactive and active powers of the stator side are defined as:

$$\begin{cases} Q_s = 1,5(-V_{ds} I_{qs} + V_{qs} I_{ds}); \\ P_s = 1,5(V_{qs} I_{qs} + V_{ds} I_{ds}). \end{cases} \quad (8)$$

In order to develop a decoupled control of the reactive and active powers, we use a Park reference frame linked to the stator flux. By supposing that the d -axis oriented along the stator flux position and basing on equation (9) with neglecting R_s we can write [28]:

$$\Psi_{qs} = 0 \quad \text{and} \quad \Psi_s = \Psi_{ds}; \quad (9)$$

$$\begin{cases} V_{qs} = \Psi_s \omega_s; \\ V_{ds} = 0; \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} I_{qs} = -I_{qr} \frac{M}{L_s}; \\ I_{ds} = \frac{\Psi_s}{L_s} - I_{dr} \frac{M}{L_s}. \end{cases} \quad (11)$$

Equation (8) can be written as:

$$\begin{cases} Q_s = -\frac{3}{2} \left(-\frac{\omega_s \Psi_s^2}{L_s} + \frac{\omega_s \Psi_s M}{L_s} I_{dr} \right); \\ P_s = (-1.5) I_{qr} \frac{\omega_s \Psi_s M}{L_s}. \end{cases} \quad (12)$$

Thus, the torque equation can be written as follows:

$$T_e = -1.5 \frac{M}{L_s} n_p I_{qr} \Psi_{ds}. \quad (13)$$

Modified STA controller

A system with a variable structure is a system whose structure changes during its operation. It is characterized by the choice of a function and switching logic, this choice allows the system to switch from one structure to another at any time [29]. Sliding mode control (SMC) is a kind of variable structure system. The objective of the SMC technique is to keep the surface at zero. The major drawback of the SMC technique is the chattering phenomenon [30]. Several methods have been suggested in order to reduce this problem, for example neural algorithm (NA), fuzzy logic (FL), neuro-fuzzy algorithm (NFA), synergetic control (SC), second-order sliding mode (SOSM), and super twisting algorithm.

The super twisting algorithm is a kind of SOSM controller. It is one of the most famous and most widely used controls in the field of AC motor control. STA method reduces more the chattering phenomena compared to the classical SMC controller [31]. For robust and high effectiveness controller, an intelligent STA controller was studied in the literature [32]–[39]. In [40], the authors proposed the use of a direct field-oriented control with traditional STA controllers applied to the six-phase induction motor. The experimental results show the superiority of the proposed technique. Synergetic control and STA controller are combined to control and regulate the power quality of DFIG-based dual-rotor wind power [41]. On the other hand, STA is a simple algorithm, more robust, and easy to apply compared to the traditional SMC method. When using STA, we do not need the mathematical form of the studied system, as it is applied directly and can be used in place of the classic controllers, for example hysteresis comparator and PI controller. Equation (14) represents the form of the STA controller [42]:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t); \quad (14)$$

$$u_1(t) = \lambda_1 \sqrt{|S|} \cdot \text{sign}(S); \quad (15)$$

$$u_2(t) = \lambda_2 \int \text{sign}(S) \cdot dt \quad (16)$$

STA controller can be expressed by the following equation:

$$u(t) = \lambda_1 \sqrt{|S|} \cdot \text{sign}(S) + \lambda_2 \int \text{sign}(S) \cdot dt \quad (17)$$

In this section, a new STA technique was designed to minimize the chattering phenomena. The designed technique named modified STA (MSTA) controller is an effective controller for uncertain systems and it overcomes the main drawbacks of the traditional SMC and STA methods. The MSTA controller is a modified STA controller. The MSTA controller is a simple structure, robust controller, and easy to adjust. The control input of the designed MSTA controller comprises three inputs as (18):

$$w(t) = w_1(t) + w_2(t) + w_3(t); \quad (18)$$

$$w_1(t) = k_1 \sqrt{|S|} \cdot \text{sign}(S); \quad (19)$$

$$w_2(t) = k_2 \int \text{sign}(S) \cdot dt; \quad (20)$$

$$w_3(t) = S. \quad (21)$$

Equation (22) shows the principle of the proposed MSTA controller. This proposed controller is simple structure, robust controller and easy to implement:

$$w(t) = k_1 \sqrt{|S|} \text{sign}(S) + k_2 \int \text{sign}(S) dt + S. \quad (22)$$

Where k_1 and k_2 are scalar coefficients.

This suggested technique will be used to improve the effectiveness of the DFTC control. On the other hand, Figure 1 shows a block diagram representation of the MSTA controller.

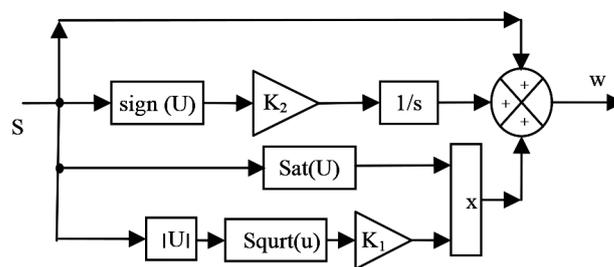


Figure 1. Block diagram of the MSTA controller

This proposed controller is used in this paper for reducing an electromagnetic torque ripple, stator current ripple, rotor flux ripple, and harmonic distortion of stator/rotor currents of the DFIG-based wind turbine system using the DFTC method which the inverter was controlled by the modified SVM strategy.

DFTC with MSTA controllers

This work proposes a novel design of DFTC structure for DFIG-based wind turbine, that replaces the traditional hysteresis controllers and switching table, to enhance the control technique effectiveness such as minimizing the electromagnetic torque and rotor flux undulations, reducing the low THD in the output stator current by controlling the rotor side converter (RSC) of the DFIG.

DFTC–MSTA method with modified SVM technique uses the electromagnetic torque and rotor flux as primary control variables, which are obtained directly from the DFIG measurements. Electromagnetic torque and rotor flux control loops are the two basic loops of the DFTC–MSTA fed DFIG-based wind turbine system and are shown in Figure 2. From Figure 2, the DFTC–MSTA fed DFIG drive mainly consists of rotor flux and electromagnetic torque estimation, DFTC technique, and modified MSVM strategy. Since the DFTC–MSTA control structure is a robust and simple algorithm; it can be used for several AC machines kinds (synchronous, asynchronous...). This proposed DFTC technique ensures excellent electromagnetic

torque or speed control without any mechanical information. Moreover, sensitivity to machine parameters is lower for the proposed DFTC technique in comparison with traditional DFTC and field-oriented control techniques.

The DFTC–MSTA objective is to regulate the rotor flux and the electromagnetic torque of the DFIG-based wind turbine. The electromagnetic torque is regulated using the quadrature axis rotor voltage V_{qr} , while the rotor flux is regulated using the direct axis rotor voltage V_{dr} .

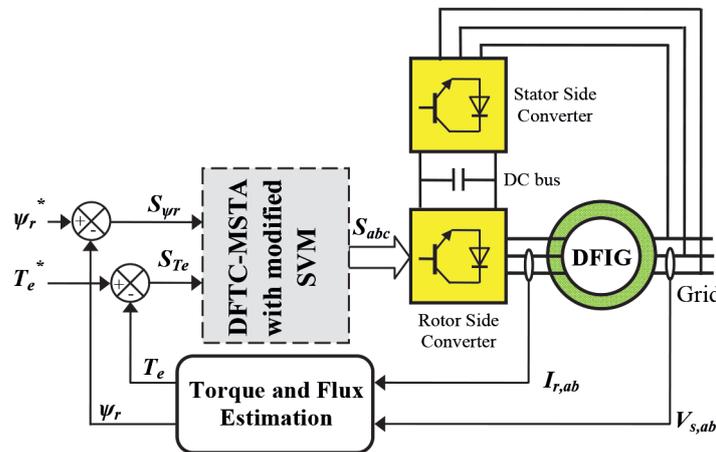


Figure 2. Block diagram of the DFIG with DFTC–MSTA

The phase and amplitude of the rotor flux are estimated by the relation equations (23) to (25):

$$\begin{cases} \Psi_{r\beta} = \int_0^t (-R_r i_{r\beta} + V_{r\beta}) dt; \\ \Psi_{r\alpha} = \int_0^t (-R_r i_{r\alpha} + V_{r\alpha}) dt. \end{cases} \quad (23)$$

The magnitude and phase of rotor flux are described as follows:

$$\Psi_r = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2}; \quad (24)$$

$$\theta_r = \arctg\left(\frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{r\alpha}}\right). \quad (25)$$

With

$$\left|\overline{\Psi_r}\right| = \frac{\left|V_r\right|}{\omega_r}. \quad (26)$$

Consequently, the estimation of the rotor flux is based on the parameter of the rotor resistance. The rotor voltage and rotor current are measurable quantities. While the electromagnetic torque can be estimated from the measurement of the rotor current and the estimation of the rotor flux.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{M}{L_s} n_p (-\Psi_{ds} I_{qr} + \Psi_{qs} I_{dr}) \quad (27)$$

Electromagnetic torque and rotor flux MSTA controllers are used to influence respectively the two rotor voltage components as in (28) and (29):

$$V_{qr}^* = k_1 \sqrt{|S_{Te}|} \text{sign}(S_{Te}) + k_2 \int \text{sign}(S_{Te}) dt + S_{Te}; \quad (28)$$

$$V_{dr}^* = k_3 \sqrt{|S_{\Psi_r}|} \text{sign}(S_{\Psi_r}) + k_4 \int \text{sign}(S_{\Psi_r}) dt + S_{\Psi_r}. \quad (29)$$

Where the sliding mode variables are the rotor flux magnitude error $S_{\psi_r} = \psi_r^* - \psi_r$ and the electromagnetic torque error $S_{T_e} = T_e^* - T_e$, and the control gains k_3 , k_4 , k_1 and k_2 should check the stability conditions.

Results and Discussion

The designed DFTC methods is simulated with the MATLAB software by considering a 1.5 MW doubly-fed induction generator. The parameters of DFIG used for the numerical simulation studies are specified in Table 1. The three DFTC control methods; DFTC-PI, DFTC-STA and DFTC–MSTA are simulated and compared in terms of stator current harmonics distortion, electromagnetic torque ripple, rotor flux ripple, reference tracking, time response, and robustness against generator parameter variations.

Table 1

The DFIG parameters [23, 27]

Parameters	Rated Value	Unity
Number of pairs poles	2	
Nominal power	1,5	MW
Stator resistance	0,012	Ω
Stator frequency	50	Hz
Stator voltage	398	V
Stator inductance	0,0137	H
Rotor resistance	0,021	Ω
Mutual inductance	0,0135	H
Rotor inductance	0,0136	H
Viscous friction	0,0024	Nm/s
Inertia	1000	Kg m ²

First test

In this case, the effectiveness of the designed strategies (DFTC-PI, DFTC-STA, and DFTC–MSTA) is tested under reference electromagnetic torque and rotor flux variation. The reference values of electromagnetic torque and rotor flux are set at 0 *N.m* and 1.6 *wb*, respectively. Figures 3–5 show the obtained simulation results from this test. The waveforms are taken from the 0 to 1.4 sec for better illustrations. It is shown that the MSTA controller has high effectiveness compared to PI and STA controllers. From Figures 3a and 3b, we notice that the electromagnetic torque and rotor flux follow the references precisely.

Figure 3c represents the current signal for designed techniques. Starting from Figure 3c, we notice that the stator current is related to the system, as well as the reference values of electromagnetic torque and rotor flux.

From Figure 4, we notice that the DFTC control with the proposed MSTA controller greatly reduced the ripples of both electromagnetic torque, rotor flux, and stator current of the DFIG compared to DFTC-PI and DFTC-STA control techniques. The DFTC–MSTA control scheme reduces more the ripples in torque, rotor flux and current compared to DFTC-PI and DFTC-STA methods (see Figure 4). On the other hand, Figure 5a, Figure 5, *b*, and 5, *c* show the THD of one phase stator current of the DFIG obtained using Fast Fourier Transform method for the designed DFTC techniques (DFTC-PI, DFTC-STA, and DFTC–MSTA). It can be observed through these figures that the THD value is more minimized for the DFTC–MSTA (0.20 %) when compared to the DFTC-PI (0,53 %) and DFTC-STA (0,31 %). Based on the obtained results, it can be said that DFTC–MSTA has proven effective in reducing the value of ripples both in electromagnetic torque and stator current.

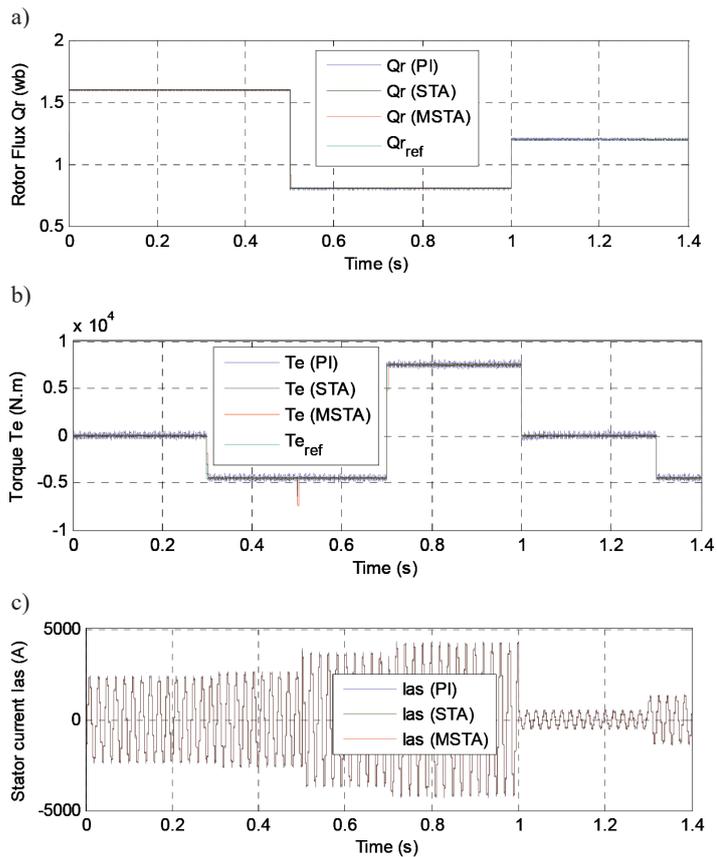


Figure 3: *a* — Flux; *b* — Torque; *c* — Current

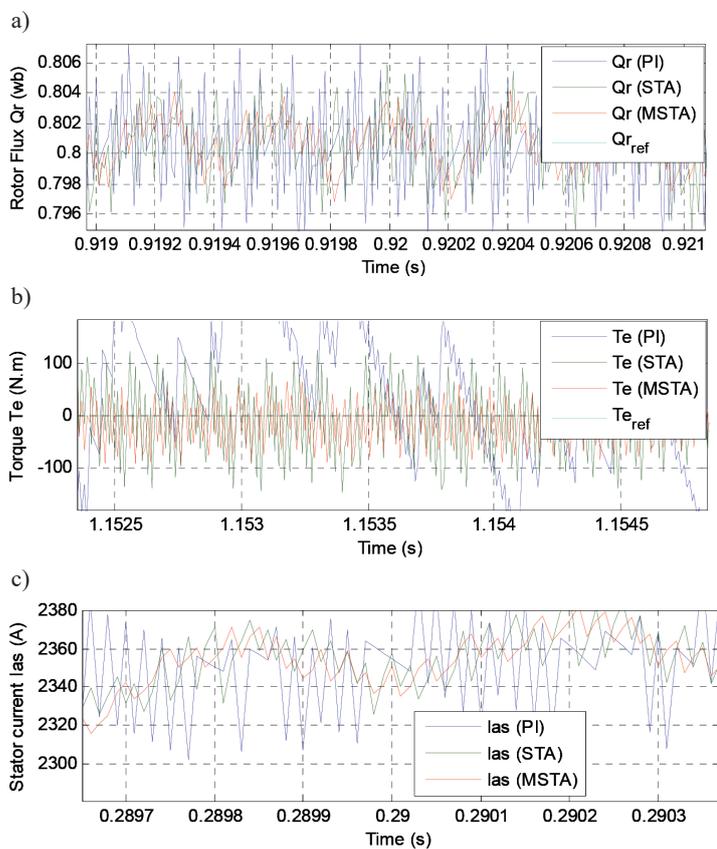


Figure 4: *a* — Zoom (Flux);
b — Zoom (Torque); *c* — Zoom (Current)

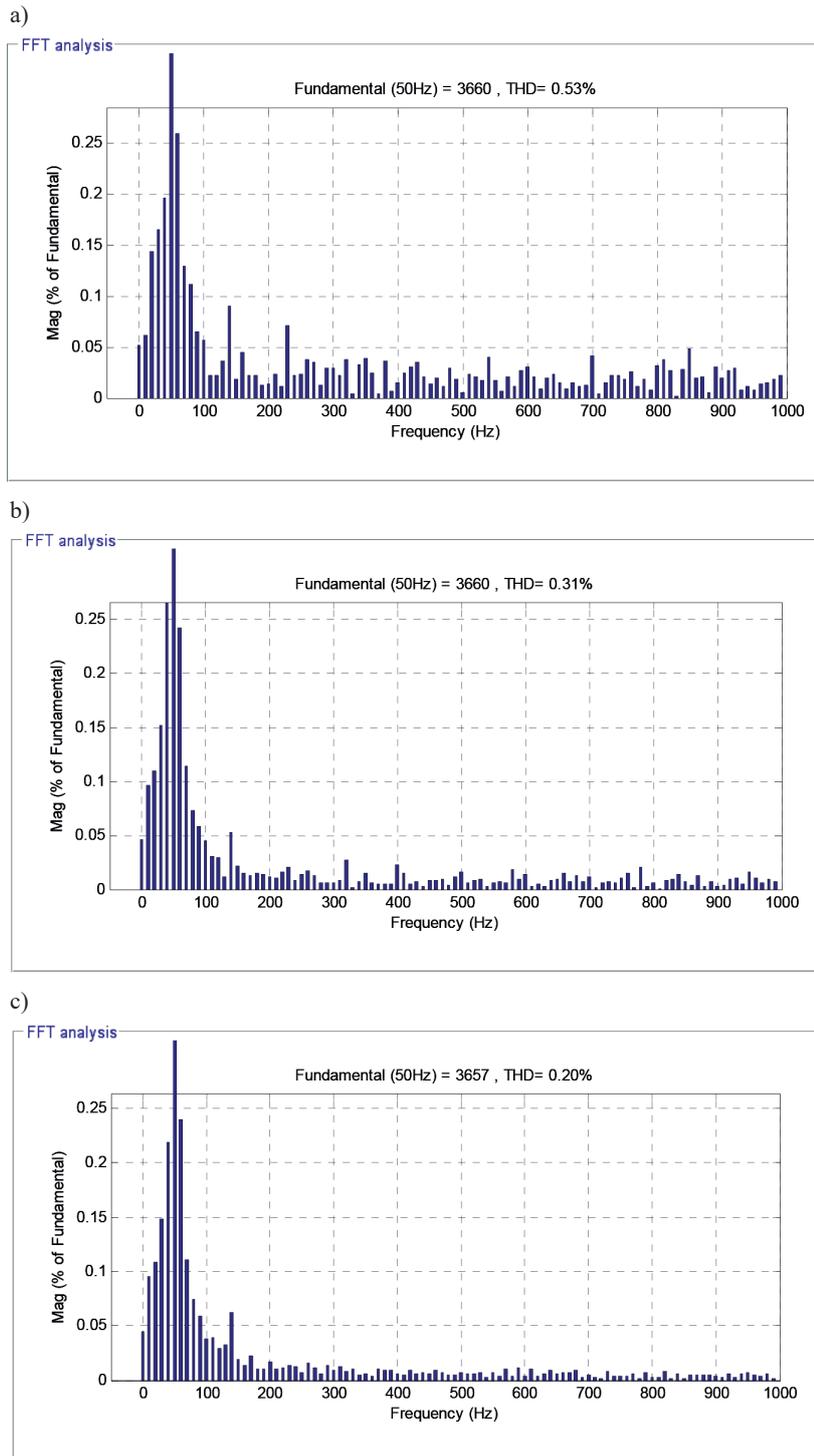


Figure 5: *a* — THD (DFTC-PI);
b — THD (DFTC-STA); *c* — THD (DFTC-MSTA)

Second test

In this test, the effectiveness of the DFTC-MSTA technique is tested under machine parameters and electromagnetic torque/flux variation. The DFIG is running at its nominal speed. The rotor and stator resistance of the DFIG is doubled and the values of inductances L_s , L_r and M are divided by 2. Figures 6 to 8 show the simulation results of the STA, MSTA, and PI controllers under described conditions. As shown by these figures, we notice that parameter variations of the DFIG increase slightly the time-response of the DFTC-PI technique compared to DFTC-STA and DFTC-MSTA methods. Electromagnetic torque and

rotor flux also remain very well referenced for all the proposed controls (see Figure 6). On the other hand, these results show that these variations present a clear effect on the electromagnetic torque, stator current and rotor flux curves and that the effect appears more important for the DFTC-PI and DFTC-STA techniques than that with the DFTC-MSTA control method (see Figure 7). The THD current of the DFTC-PI and DFTC-MSTA is shown in Figures 8, *a*, 8, *b* and 8, *c*, respectively. From these figures, it may observe that the current THD is marginally less with the MSTA controller when compared with traditional PI controller and STA controller fed DFTC-based DFIG. Thus, it can be concluded that the designed DFTC-MSTA control method and in addition to its efficiency in minimizing THD current has kept the most important advantage of the DFTC-PI and DFTC-STA witch is simplicity.

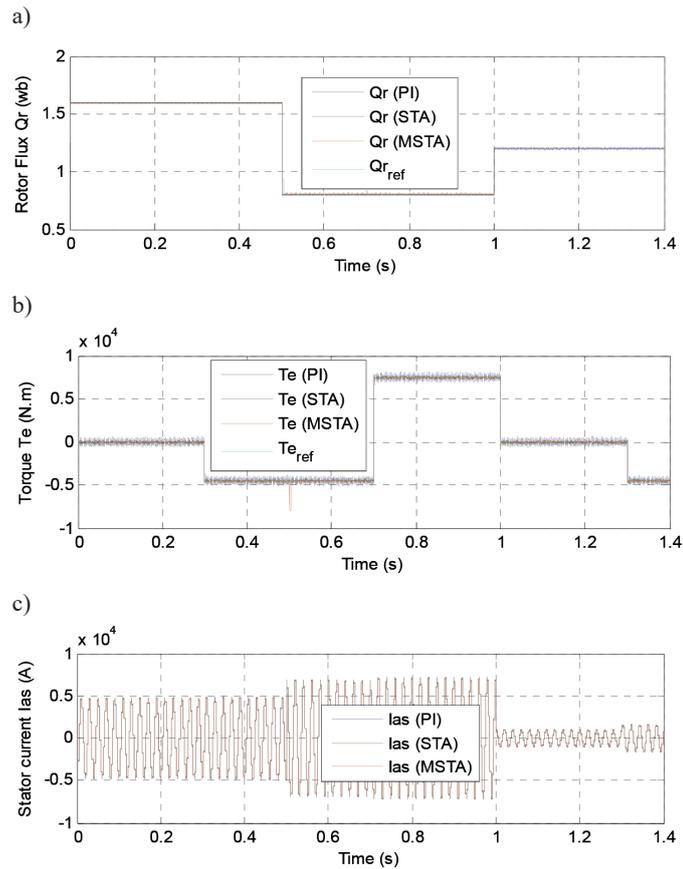
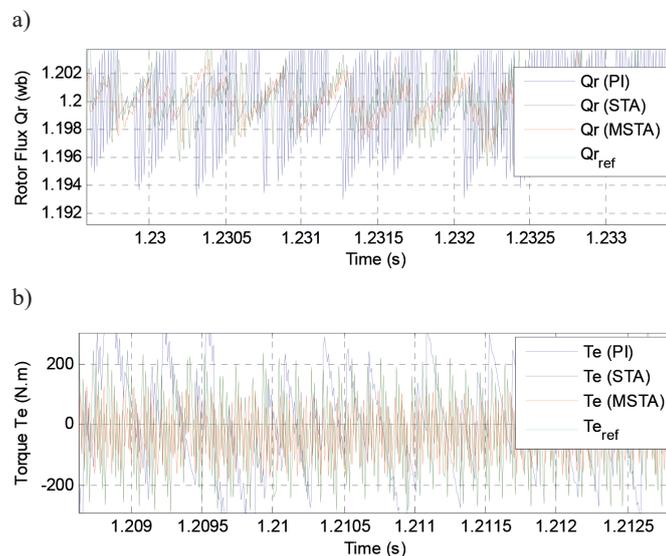


Figure 6: *a* — Flux; *b* — Torque; *c* — Current



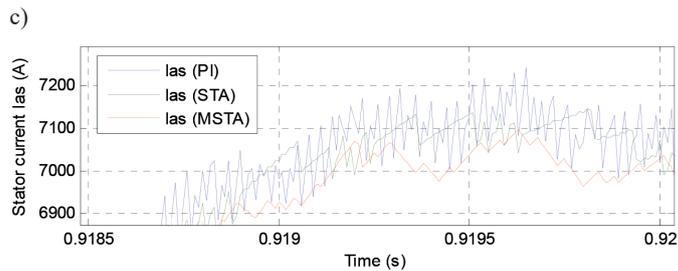


Figure 7: *a* — Zoom (Flux);
b — Zoom (Torque); *c* — Zoom (Current)

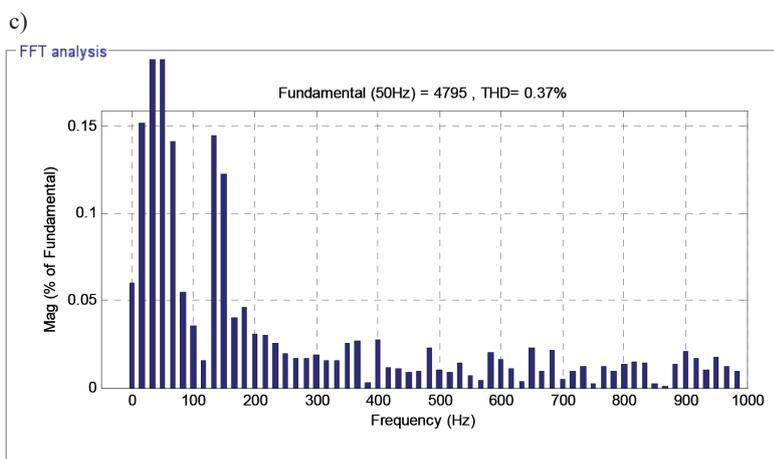
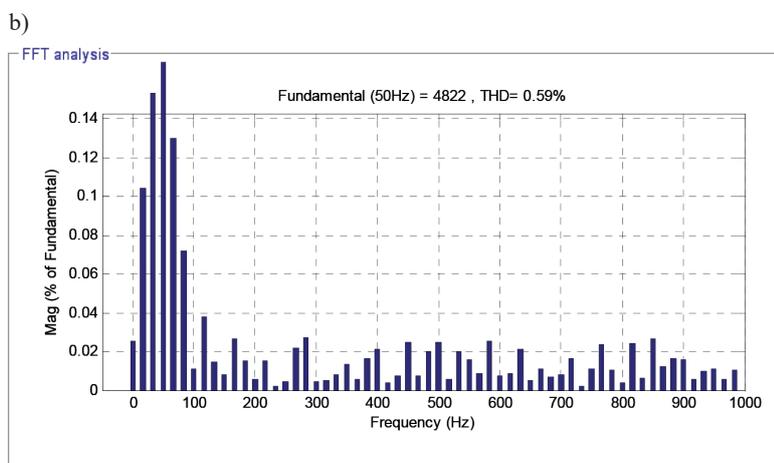
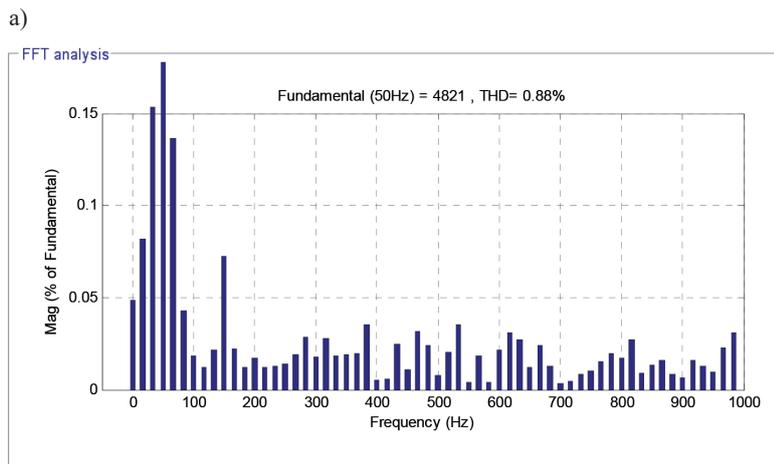


Figure 8: *a* — THD (DFTC-PI);
b — THD (DFTC-STA); *c* — THD (DFTC-MSTA)

In the end, we will compare the proposed DFTC method in this work with some scientific works, and this is according to the THD value of stator current. The values are shown in Table 2.

Table 2

Compare THD current with other control techniques

		THD,%
Ref.[22]	Classical DTC	2,57
	SOCSM-DTC	0,98
Ref.[23]		1,15
Ref. [27]	FOC	3,7
Ref. [43]	DPC	2,56
Ref. [28]		1,14
Proposed techniques	DFTC-PI	0,53
	DFTC-STA	0,31
	DFTC-MSTA	0,20

Where, DPC is the direct power control, and FOC is the field-oriented control. Through this table, we note that the proposed DFTC with proposed MSTA controller gives a lower THD value compared to the rest of the methods implemented in various scientific works. Accordingly, it can be concluded that the DFTC with proposed MSTA controller is solid and robust compared to some controls. This is due to the use of proposed MSTA controllers.

Conclusion

In this paper, a modified STA controller was proposed to regulate and control the electromagnetic torque and rotor flux of the doubly-fed induction generator based on the wind turbine. The proposed non-linear control leads to improve the control effectiveness of the control structure that is based on modified STA controller by reducing electromagnetic torque and rotor flux undulations under variable load torque and flux references. The modified STA controller was used to define the attractive control part of the traditional STA technique and PI controller.

The proposed modified STA controller was compared with the traditional PI controller and traditional STA method. The obtained results illustrated the performances of the proposed modified STA controller even in the presence of time-varying reference trajectory, load torque changing, and DFIG parameter variations. In addition, electromagnetic torque and rotor flux undulations were largely reduced and response time was improved using the proposed modified STA controller. Moreover, robustness, stability, and high decoupling between the control axes were ensured. Finally, the robustness, suggested a good solution to improve the DFTC method characteristics applied for wind power systems, which helps to ensure high quality of electromagnetic torque and rotor flux.

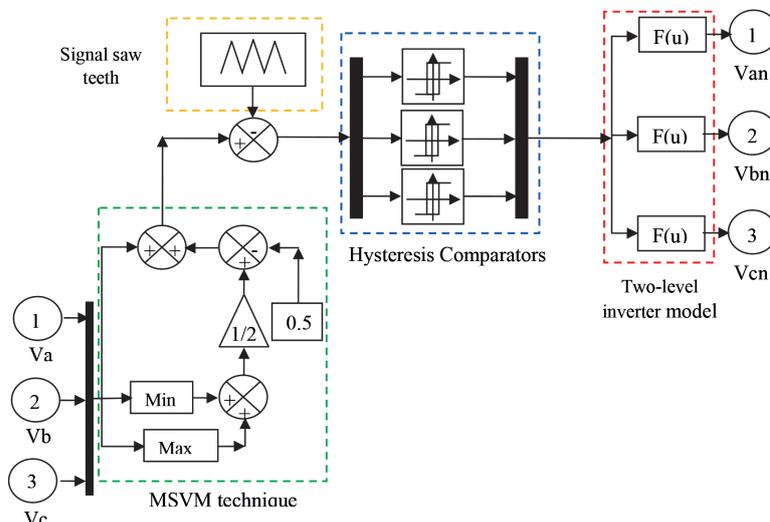


Figure 9. Block diagram of the modified SVM technique

Appendix

The modified SVM technique is a new modulation structure. It has several advantages, including simplicity and ease of implementation, unlike the traditional method.

Depends on the calculation of the maximum and minimum values of three-phase voltages. This technique was used in this paper to control the inverter of the DFIG. This technique is detailed in [16], [23]. The block diagram of the modified SVM technique is shown in Figure 9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kebbati Y.* Modular approach for an ASIC integration of electrical drive controls / Y. Kebbati // International journal of engineering. — 2011. — Vol. 24. — No. 2 (Transactions B: Applications). — Pp. 107–118.
2. *Hakami S. S.* Low-speed performance improvement of direct torque control for induction motor drives fed by three-level NPC inverter / S. S. Hakami, I. Mohd Alsofyani, K-B. Lee // Electronics. — 2020. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 77. DOI: 10.3390/electronics9010077.
3. *Younesi A.* An improved nonlinear model predictive direct speed control of permanent magnet synchronous motors / A. Younesi, S. Tohidi, M. R. Feyzi, M. Baradarannia // International Transactions on Electrical Energy Systems. — 2018. — Vol. 28. — Is. 5. — Pp. e2535. DOI: 10.1002/etep.2535.
4. *Jaladi K. K.* A new hybrid control scheme for minimizing torque and flux ripple for DFIG-based WES under random change in wind speed / K. K. Jaladi, K. S. Sandhu // International Transactions on Electrical Energy Systems. — 2019. — Vol. 29. — Is. 4. — Pp. e2818. DOI: 10.1002/20-50-7038.2818.
5. *Moati Y.* Investigating the performances of direct torque and flux control for dual stator induction motor with direct and indirect matrix converter / Y. Moati, K. Kouzi // Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. — 2020. — Vol. 64. — Is. 1. — Pp. 97–105. DOI: 10.3311/PPee.14977.
6. *Laddi T.* A proposed strategy for power management of a standalone wind energy conversion system with storage battery / T. Laddi, N. Taib, D. Aouzellag // Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. — 2020. — Vol. 64. — Is. 3. — Pp. 229–238. DOI: 10.3311/PPee.15094.
7. *Coballes-Pantoja J.* Parallel loop control for torque and angular velocity of BLDC motors with DTC commutation / J. Coballes-Pantoja, R. Gómez-Fuentes, J. R. Noriega, L. A. García-Delgado // Electronics. — 2020. — Vol. 9. — Is. 2. — Pp. 279. DOI: 10.3390/electronics9020279.
8. *Mehedi F.* Direct torque fuzzy controlled drive for multi-phase IPMSM based on SVM technique / F. Mehedi, A. Yahdou, A. B. Djilali, H. Benbouhenni // Journal Européen des Systèmes Automatisés. — 2020. — Vol. 53. — Is. 2. — Pp. 259–266. DOI: 10.18280/jesa.530213.
9. *Mehedi F.* Feedforward neural network-DTC of multi-phase permanent magnet synchronous motor using five-phase neural space vector pulse width modulation strategy / F. Mehedi, H. Benbouhenni, L. Nezli, D. Boudana // Journal Européen des Systèmes Automatisés. — 2021. — Vol. 54. — Is. 2. — Pp. 345–354. DOI: 10.18280/jesa.540217.
10. *Benbouhenni H.* Four-level DTC with six sectors based on neural networks of IM drives / H. Benbouhenni // Acta Electrotechnica. — 2018. — Vol. 59. — No. 4. — Pp. 292–300.
11. *Mazaheri Body K.* On line determination of optimal hysteresis band amplitudes in direct torque control of induction motor drives / K. Mazaheri Body, S. Vaez Zadeh // International Journal of Engineering. — 2002. — Vol. 15. — Is. 4. — Pp. 329–338.
12. *Kosmodamianskii A. S.* Direct torque control of induction motors fed by a single frequency converter / A. S. Kosmodamianskii, V. I. Vorob'ev, A. A. Pugachev // Russian Electrical Engineering. — 2015. — Vol. 86. — Is. 9. — Pp. 527–533. DOI: 10.3103/S106837121509–0060.
13. *Alekseev V. V.* Analysis of the dynamic performance of a variable-frequency induction motor drive using various control structures and algorithms / V. V. Alekseev, A. P. Emel'yanov, A. E. Kozyaruk // Russian Electrical Engineering. — 2016. — Vol. 87. — Is. 4. — Pp. 181–188. DOI: 10.3103/S1–068371216040027.
14. *Cirrinzione M.* Sensorless direct torque control of an induction motor by a TLS-based MRAS observer with adaptive integration / M. Cirrinzione, M. Pucci // Automatica. — 2005. — Vol. 41. — Is. 11. — Pp. 1843–1854. DOI: 10.1016/j.automatica.2005.06.004.
15. *Benbouhenni H.* Seven-level direct torque control of induction motor based on artificial neural networks with regulation speed using fuzzy PI controller / H. Benbouhenni // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. — 2018. — Vol. 14. — Is. 1. — Pp. 85–94. DOI: 10.22068/IJEEE.14.1.85
16. *Benbouhenni H.* Torque ripple reduction of DTC DFIG drive using neural PI regulators / H. Benbouhenni // Majlesi Journal of Energy Management. — 2019. — Vol. 8. — Is. 2. — Pp. 21–26.

17. *Benbouhenni H.* Two-level DTC based on ANN controller of DFIG using 7-level hysteresis command to reduce flux ripple comparing with traditional command / H. Benbouhenni, Z. Boudjema // 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS). — IEEE, 2018. — Pp. 1–8. DOI: 10.1109/ICASS.2018.8652013.
18. *Buja G. S.* Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-a survey / G. S. Buja, M. P. Kazmierkowski // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2004. — Vol. 51. — Is. 4. — Pp. 744–757. DOI: 10.1109/TIE.2004.831717.
19. *Świerczyński D.* Universal structure of direct torque control for AC motor drives / D. Świerczyński, M. Zelchowski // Przegląd Elektrotechniczny. — 2004. — Vol. 80. — Is. 5. — Pp. 489–492.
20. *Janecke M.* Fast torque control of an IGBT-inverter-fed three-phase A.C. drive in the whole speed range-experimental result / M. Janecke, F. Hoffmann // 6th Europ. Conf. on Power Electronics. — 1995. — Vol. 3. — Pp. 399–404.
21. *Boudjema Z.* A novel direct torque control using second order continuous sliding mode of a doubly fed induction generator for a wind energy conversion system / Z. Boudjema, R. Taleb, Y. Djerriri, A. Yahdou // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. — 2017. — Vol. 25. — Is. 2. — Pp. 965–975. DOI: 10.3906/elk-1510-89.
22. *Boudjema Z.* Fuzzy sliding mode control of a doubly fed induction generator for energy conversion / Z. Boudjema, A. Meroufel, Y. Djerriri, E. Bounadja // Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering. — 2013. — Vol. 6. — Is. 2. — Pp. 7–14.
23. *Benbouhenni H.* Utilization of an ANFIS-STSM algorithm to minimize total harmonic distortion / H. Benbouhenni // International Journal of Smart Grid. — 2020. — Vol. 4. — Is. 2. — Pp. 56–67.
24. *Ayrir W.* Fuzzy 12 sectors improved direct torque control of a DFIG with stator power factor control strategy / W. Ayrir, A. Haddi // International Transactions on Electrical Energy Systems. — 2019. — Vol. 29. — Is. 10. — Pp. e12092. DOI: 10.1002/2050-7038.12092.
25. *Amer M.* Optimal DTC control strategy of DFIG using variable gain PI and hysteresis controllers adjusted by PSO algorithm / M. Amer, A. Miloudi, F. Lakdja // Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. — 2020. — Vol. 64. — Is. 1. — Pp. 74–86. DOI: 10.3311/PPee.14237.
26. *Amrane F.* Design and implementation of high-performance field-oriented control for grid-connected doubly fed induction generator via hysteresis rotor current controller / F. Amrane, A. Chaiba, B. Badr Eddine, S. Mekhilef // Rev. Roum. Sci. Tech.-Electrotechn. Et Energ. — 2016. — Vol. 61. — Is. 4. — Pp. 319–324.
27. *Amrane F.* A novel direct power control for grid-connected doubly fed induction generator based on hybrid artificial intelligent control with space vector modulation / F. Amrane, A. Chaiba // Rev. Sci. Techni.-Electrotechn. Et Energ. — 2016. — Vol. 61. — Is. 3. — Pp. 263–268.
28. *Farid B.* Fuzzy super twisting algorithm dual direct torque control of doubly fed induction machine / B. Farid, B. Tarek, B. Sebti // International Journal of Electrical and Computer Engineering. — 2021. — Vol. 11. — Is. 5. — Pp. 3782–3790.
29. *Hu J.* Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding-mode control approach / J. Hu, H. Nian, B. Hu, Y. He, Z. Q. Zhu // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2010. — Vol. 25. — Is. 4. — Pp. 1028–1039. DOI: 10.1109/TEC.2010.2048754.
30. *Kelkoul B.* Stability analysis and study between classical sliding mode control (SMC) and super twisting algorithm (STA) for doubly fed induction generator (DFIG) under wind turbine / B. Kelkoul, A. Boumediene // Energy. — 2021. — Vol. 214. — Pp. 118871. DOI: 10.1016/j.e-nergy.2020.118871.
31. *Nasiri M.* Super-twisting sliding mode control for gear less PMSG-based wind turbine / M. Nasiri, S. Mobayen, Q. M. Zhu // Complexity. — 2019. — Vol. 2019. DOI: 10.1155/2019/6141607.
32. *Benbouhenni H.* Rotor flux and torque ripples minimization for direct torque control of DFIG by NSTSM algorithm / H. Benbouhenni // Majlesi Journal of Energy Management. — 2018. — Vol. 7. — No. 3. — Pp. 1–9.
33. *Benbouhenni H.* Stator current and rotor flux ripples reduction of DTC DFIG drive using FSTSMC algorithm / H. Benbouhenni // International Journal of Smart Grid. — 2019. — Vol. 3. — No. 4. — Pp. 226–234.
34. *Benbouhenni H.* DPC based on ANFIS super-twisting sliding mode algorithm of a doubly-fed induction generator for wind energy system / H. Benbouhenni, Z. Boudjema, A. Belaidi // Journal Européen des Systèmes Automatisés. — 2020. — Vol. 53. — No. 1. — Pp. 69–80. DOI: 10.18280/jesa.530109.
35. *Benbouhenni H.* Direct power control with NSTSM algorithm for DFIG using SVPWM technique / H. Benbouhenni, Z. Boudjema, A. Belaidi // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. — 2021. — Vol. 17. — No. 1. — Pp. 1518. DOI: 10.22068/IJEEE.17.1.1518.
36. *Benbouhenni H.* Comparison study between neural STSM and ANFIS-STSM method in DPC control scheme of DFIG-based dual-rotor wind turbines / H. Benbouhenni, Z. Boudjema, A. Belaidi // International Journal of Mathematics and Computers in Simulation. — 2020. — Vol. 14. — Pp. 33–46. DOI: 10.46300/91012.2020.14.7.

37. Benbouhenni H. Robust direct power control of a DFIG fed by a five-level NPC inverter using neural SVPWM technique / H. Benbouhenni // *TECNICA ITALIANA-Italian Journal of Engineering Science*. — 2021. — Vol. 65. — No. 1. — Pp. 119–128. DOI: 10.18280/ti-ijes.650118.
38. Benbouhenni H. A Novel Direct Active and Reactive Power Control Method Using Fuzzy Super Twisting Algorithms and Modified Space Vector Modulation Technique for an Asynchronous Generator-based Dual-rotor Wind Powers / H. Benbouhenni // *Iranian (Iranica) Journal of Energy and Environment*. — 2021. — Vol. 12. — Is. 2. — Pp. 109–117. DOI: 10.5829/IJEE.2021.12.02.02
39. Yaichi I. Super-twisting sliding mode control of a doubly-fed induction generator based on the SVM strategy / I. Yaichi, A. Semmah, P. Wira, Y. Djeriri // *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. — 2019. — Vol. 63. — No. 3. — Pp. 178–190. DOI: 10.3311/PPee.13726.
40. Listwan J. Application of super-twisting sliding mode controllers in direct field-oriented control system of six-phase induction motor: experimental studies / J. Listwan // *Power Electronics and Drives*. — 2018. — Vol. 3(38). — No. 1. DOI: 10.2478/pead-2018–0013.
41. Benbouhenni H. Combining synergetic control and super twisting algorithm to reduce the active power undulations of doubly fed induction generator for dual-rotor wind turbine system / H. Benbouhenni, S. Lemdani // *Electrical Engineering & Electromechanics*. — 2021. — No. 3. — Pp. 8–17. DOI: 10.20998/2074–272X.2021.3.02.
42. Benbouhenni H. A comparative study between DTC-NSTMC and DTC-FSTSMC control scheme for a DFIG-based wind turbine / H. Benbouhenni // *Majlesi Journal of Energy Management*. — 2018. — Vol. 7. — No. 4. — Pp. 43–53.
43. Tavakoli S. M. Comparison between different DPC methods applied to DFIG wind turbines / S. M. Tavakoli, M. A. Pourmina, M. R. Zolghadri // *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*. — 2013. — Vol. 3. — No. 2. — Pp. 446–452.

REFERENCES

1. Kebbati, Youssef. “Modular approach for an ASIC integration of electrical drive controls.” *International journal of engineering* 24.2 (2011): 107–118.
2. Hakami, Samer Saleh, Ibrahim Mohd Alsofyani, and Kyo-Beum Lee. “Low-Speed Performance Improvement of Direct Torque Control for Induction Motor Drives Fed by Three-Level NPC Inverter.” *Electronics* 9.1 (2020): 77. DOI: 10.3390/electronics9010077.
3. Younesi, Aria, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi, and Mehdi Baradarannia. “An improved nonlinear model predictive direct speed control of permanent magnet synchronous motors.” *International Transactions on Electrical Energy Systems* 28.5 (2018): e2535. DOI: 10.1002/etep.2-535.
4. Jaladi, Kiran Kumar, and Kanwarjit Singh Sandhu. “A new hybrid control scheme for minimizing torque and flux ripple for DFIG-based WES under random change in wind speed.” *International Transactions on Electrical Energy Systems* 29.4 (2019): e2818. DOI: 10.1002/2050-7038.2818.
5. Moati, Yahia, and Katia Kouzi. “Investigating the performances of direct torque and flux control for dual stator induction motor with direct and indirect matrix converter.” *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science* 64.1 (2020): 97–105. DOI: 10.3311/PPee.14977.
6. Laddi, Toufik, Nabil Taib, and Djamel Aouzellag. “A Proposed Strategy for Power Management of a Standalone Wind Energy Conversion System with Storage Battery.” *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science* 64.3 (2020): 229–238. DOI: 10.3–311/PPee.15094.
7. Coballes-Pantoja J., R. Gómez-Fuentes, J. R. Noriega, and L. A. García-Delgado. “Parallel loop control for torque and angular velocity of BLDC motors with DTC commutation.” *Electronics* 9.2 (2020): 279. DOI: 10.3390/electronics9020279.
8. Mehedi, Fayçal, Adil Yahdou, Abdelkadir Belhadj Djilali, and Habib Benbouhenni. “Direct torque fuzzy controlled drive for multi-phase IPMSM based on SVM technique.” *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 53.2 (2020): 259–266. DOI: 10.18280/jesa.530213.
9. Mehedi, Fayçal, Habib Benbouhenni, Lazhari Nezli, and Djamel Boudana. “Feedforward neural network-DTC of multi-phase permanent magnet synchronous motor using five-phase neural space vector pulse width modulation strategy.” *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 54.2 (2021): 345–354. DOI: 10.18280/jesa.540217.
10. Benbouhenni, Habib. “Four-level DTC with six sectors based on neural network of IM drives.” *Acta Electrotechnica* 59.4 (2018): 292–300.
11. Mazaheri Body, Kiumars, and S. Vaez Zadeh. “On Line Determination of Optimal Hysteresis Band Amplitudes in Direct Torque Control of Induction Motor Drives.” *International Journal of Engineering* 15.4 (2002): 329–338.

12. Kosmodamianskii, A.S., V. I. Vorob'ev, and A. A. Pugachev. "Direct torque control of induction motors fed by a single frequency converter." *Russian Electrical Engineering* 86.9 (2015): 527–533. DOI: 10.3103/S1068371215090060.
13. Alekseev, V. V., A. P. Emel'yanov, and A. E. Kozyaruk. "Analysis of the dynamic performance of a variable-frequency induction motor drive using various control structures and algorithms." *Russian Electrical Engineering* 87.4 (2016): 181–188. DOI: 10.3103/S1-068371216040027.
14. Cirrincione, Maurizio and Marcello Pucci. "Sensorless direct torque control of an induction motor by a TLS-based MRAS observer with adaptive integration." *Automatica* 41.11 (2005): 1843–1854. DOI: 10.1016/j.automatica.2005.06.004.
15. Benbouhenni, Habib. "Seven-level direct torque control of induction motor based on artificial neural networks with regulation speed using fuzzy PI controller." *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 14.1 (2018): 85–94. DOI: 10.22068/IJEEE.14.1.85.
16. Benbouhenni, Habib. "Torque ripple reduction of DTC DFIG drive using neural PI regulators." *Majlesi Journal of Energy Management* 8.2 (2019): 21–26.
17. Benbouhenni, Habib, and Zinelaabidine Boudjema. "Two-level DTC based on ANN controller of DFIG using 7-level hysteresis command to reduce flux ripple comparing with traditional command." *2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS)*. IEEE, 2018. 1–8. DOI: 10.1109/ICASS.2018.8652013.
18. Buja, Giuseppe S., and Marian P. Kazmierkowski. "Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors—a survey." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 51.4 (2004): 744–757. DOI: 10.1109/TIE.2004.831717.
19. Świerczyński, D., and M. Żelechowski. "Universal structure of direct torque control for AC motor drives." *Przeгляд Elektrotechniczny* 80.5 (2004): 489–492.
20. Janecke, M., and F. Hoffmann. "Fast torque control of an IGBT-inverter-fed three-phase A.C. drive in the whole speed range—experimental result." *6th Europ. Conf. on Power Electronics*. Vol. 3. 1995. 399–404.
21. Boudjema, Zinelaabidine, Rachid Taleb, Youcef Djerriri, and Adil Yahdou. "A novel direct torque control using second order continuous sliding mode of a doubly fed induction generator for a wind energy conversion system." *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* 25.2 (2017): 965–975. DOI: 10.3906/elk-1510–89.
22. Boudjema, Zinelaabidine, Abdelkader Meroufel, Youcef Djerriri, and Elhadj Bounadja. "Fuzzy sliding mode control of a doubly fed induction generator for energy conversion." *Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering* 6.2 (2013): 7–14.
23. Benbouhenni, Habib. "Utilization of an ANFIS-STSM algorithm to minimize total harmonic distortion." *International Journal of Smart Grid* 4.2 (2020): 56–67.
24. Ayrir, Wiam, and Ali Haddi. "Fuzzy 12 sectors improved direct torque control of a DFIG with stator power factor control strategy." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 29.10 (2019): e12092. DOI: 10.1002/2050–7038.12092.
25. Amer, Mokhtar, Abdallah Miloudi, and Fatiha Lakdja. "Optimal DTC control strategy of DFIG using variable gain PI and hysteresis controllers adjusted by PSO algorithm." *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science* 64.1 (2020): 74–86. DOI: 10.3311/PPee.14237.
26. Amrane, Fayssal, Azeddine Chaiba, Badr Eddine Babes, and Saad Mekhilef. "Design and implementation of high-performance field-oriented control for grid-connected doubly fed induction generator via hysteresis rotor current controller." *Rev. Roum. Sci. Tech.-Electrotechn. Et Energ.* 61.4 (2016): 319–324.
27. Amrane, Fayssal, and Azeddine Chaiba. "A novel direct power control for grid-connected doubly fed induction generator based on hybrid artificial intelligent control with space vector modulation." *Rev. Sci. Techni.-Electrotechn. Et Energ.* 61.3 (2016): 263–268.
28. Farid, Boumaraf, Boutabba Tarek, and Belkacem Sebti. "Fuzzy super twisting algorithm dual direct torque control of doubly fed induction machine." *International Journal of Electrical & Computer Engineering* 11.5 (2021): 3782–3790.
29. Hu, Jiabing, Heng Nian, Bin Hu, Yikang He, and Z. Q. Zhu. "Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding-mode control approach." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 25.4 (2010): 1028–1039. DOI: 10.1109/TEC.2010.2048754.
30. Kelkoul, Bahia, and Abdelmajid Boumediene. "Stability analysis and study between classical sliding mode control (SMC) and super twisting algorithm (STA) for doubly fed induction generator (DFIG) under wind turbine." *Energy* 214 (2021): 118871. DOI: 10.1016/j.e-nergy.2020.118871.
31. Nasiri, Mojtaba, Saleh Mobayen, and Quan Min Zhu. "Super-twisting sliding mode control for gear less PMSG-based wind turbine." *Complexity* 2019 (2019). DOI: 10.1155/-2019/6141607.
32. Benbouhenni, Habib. "Rotor flux and torque ripples minimization for direct torque control of DFIG by NSTSM algorithm." *Majlesi Journal of Energy Management* 7.3 (2018): 1–9.

33. Benbouhenni, Habib. “Stator current and rotor flux ripples reduction of DTC DFIG drive using FSTSMC algorithm.” *International Journal of Smart Grid* 3.4 (2019): 226–234.
34. Benbouhenni, Habib, Zinelaabidine Boudjema, and Abdelkader Belaidi. “DPC based on ANFIS super-twisting sliding mode algorithm of a doubly-fed induction generator for wind energy system.” *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 53.1 (2020): 69–80. DOI: 10.18280/jesa.530109.
35. Benbouhenni, Habib, Zinelaabidine Boudjema, and Abdelkader Belaidi. “Direct power control with NSTSM algorithm for DFIG using SVPWM technique.” *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering* 17.1 (2021): 1518. DOI: 10.22068/IJEEE.17.1.1518.
36. Benbouhenni, Habib, Zinelaabidine Boudjema, and Abdelkader Belaidi. “Comparison study between neural STSM and ANFIS-STSM method in DPC control scheme of DFIG-based dual-rotor wind turbines.” *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation* 14 (2020): 33–46. DOI: 10.46300/91012.2020.14.7
37. Benbouhenni, Habib. “Robust direct power control of a DFIG fed by a five-level NPC inverter using neural SVPWM technique.” *TECNICA ITALIANA-Italian Journal of Engineering Science* 65.1 (2021): 119–128. DOI: 10.18280/ti-ijes.650118.
38. Benbouhenni, Habib. “A Novel Direct Active and Reactive Power Control Method Using Fuzzy Super Twisting Algorithms and Modified Space Vector Modulation Technique for an Asynchronous Generator-based Dual-rotor Wind Powers.” *Iranian (Iranica) Journal of Energy and Environment* 12.2 (2021): 109–117. DOI: 10.5829/IJEE.2021.12.02.02.
39. Yaichi, Ibrahim, Abdelhafid Semmah, Patrice Wira, and Youcef Djeriri. “Super-twisting sliding mode control of a doubly-fed induction generator based on the SVM strategy.” *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science* 63.3 (2019): 178–190. DOI: 10.3311/PPee.13726.
40. Listwan, Jacek. “Application of super-twisting sliding mode controllers in direct field-oriented control system of six-phase induction motor: experimental studies.” *Power Electronics and Drives* 3(38).1 (2018). DOI: 10.2478/pead-2018-0013.
41. Benbouhenni, Habib, and Soufiane Lemdani. “Combining synergetic control and super twisting algorithm to reduce the active power undulations of doubly fed induction generator for dual-rotor wind turbine system.” *Electrical Engineering & Electromechanics* 3 (2021): 8–17. DOI: 10.20998/2074-272X.2021.3.02.
42. Benbouhenni, Habib. “A comparative study between DTC-NSTMC and DTC-FSTSMC control scheme for a DFIG-based wind turbine.” *Majlesi Journal of Energy Management* 7.4 (2018): 43–53.
43. Tavakoli, Seyed Mohammad, Mohammad Ali Pourmina, and Mohammad Reza Zolghadri. “Comparison between different DPC methods applied to DFIG wind turbines.” *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 3.2 (2013): 446–452.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алмакки Али Надхим Джбарак — аспирант
 Научный руководитель:
 Мазалов Андрей Андреевич
 ФГБОУ ВО «Казанский национальный
 исследовательский технический университет
 им. А. Н. Туполева–КАИ»
 420111, Российская Федерация, г. Казань,
 ул. К. Маркса 10
 e-mail: alinadhimj@gmail.com
Мазалов Андрей Андреевич —
 кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «Казанский национальный
 исследовательский
 технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ»
 420111, Российская Федерация, г. Казань,
 ул. К. Маркса, 10
 ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет»
 344006, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону,
 ул. Б. Садовая 105/42.
 e-mail: anmaz8@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Almakki, Ali Nadhim Jbarah — Postgraduate
 Supervisor:
 Mazalov, Andrey A.
 Kazan National Research
 Technical University
 named after A. N. Tupolev — KAI
 10 Karla Marksa Str., Kazan, 420111,
 Russian Federation
 e-mail: alinadhimj@gmail.com
Mazalov, Andrey A. —
 PhD, associate professor
 Kazan National Research
 Technical University
 named after A. N. Tupolev—KAI
 10 Karla Marksa Str., Kazan, 420111,
 Russian Federation
 Southern Federal University
 105/42 Bolshaya Sadovaya Str.,
 Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation
 e-mail: anmaz8@list.ru

Статья поступила в редакцию 18 июня 2021 г.
 Received: June 18, 2021.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 13. № 4

2021 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.08.21. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 20,25. Тираж 500 экз. Заказ № 273/21

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7