

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. № 6

**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. — № 6. — 152 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.



ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2021

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ771

Тимошек Е. С., Маликова Т. Е. Оптимизация процесса обработки транспортных судов на рейде средствами линейного программирования MATLAB771

Майоров Н. Н., Фетисов В. А., Добровольская А. А. Моделирование маршрутов морских паромных перевозок на основе теории графов в контексте стратегического планирования782

Вороненко А. К. Методический подход к построению прогноза развития флота на примере Дальневосточного бассейна Российской Федерации794

Ююкин И. В. Сплайновая альтернатива множественности использования референц-эллипсоидов в судовождении804

Цуприк В. Г. Концептуальное моделирование системы обеспечения проектной надежности оснований морских ледостойких сооружений819

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ832

Шарафутдинова Т. К. Сравнительный анализ промышленных гидроакустических модемов832

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ842

Пивоварова Н. А., Байрамова Ю. Ш., Власова Г. В. Улучшение свойств судового топлива ультразвуковой обработкой842

Крюков А. А. Численное моделирование коэффициента скорости соплового аппарата малорасходной турбины849

Стрижус В. Е. Оценка усталостной долговечности и срока службы наружной композитной обшивки корпуса судна858

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА867

Богатырева Е. В. Влияние эксплуатационных параметров абсорбционной холодильной установки на зону дегазации867

Ивановская А. В., Жуков В. А., Попов В. В. Исследование динамики приводов грузоподъемных устройств рыболовского судна875

Том 13. № 6**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.

Р. Качиньски

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

А. И. ПошивайЗаместитель
Министра транспорта
Российской Федерации**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

Члены редколлегии:	ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....887
<i>О. К. Безюков, д.т.н.</i>	<i>Алмакки А. Н. Д., Мазалов А. А. Применение контроллера непрерывного</i>
<i>А. Т. Беккер, д.т.н.</i>	<i>скользящего режима второго порядка (SMC) в DFTC асинхронного</i>
<i>Н. И. Ватин, д.т.н.</i>	<i>генератора с двойным питанием (DFIG), интегрированного</i>
<i>П. А. Гарибин, д.т.н.</i>	<i>в ветротурбину: имитационные исследования.....887</i>
<i>Д. П. Голоскоков, д.т.н.</i>	<i>Бордюг А. С. Применение систем релейной защиты в судовых</i>
<i>В. А. Жуков, д.т.н.</i>	<i>электроэнергетических комплексах908</i>
<i>Ю. М. Искандеров, д.т.н.</i>	
<i>О. Г. Каратаев, д.т.н.</i>	
<i>В. В. Каретников, д.т.н.</i>	
<i>А. В. Кириченко, д.т.н.</i>	
<i>М. Н. Кирсанов, д.ф.-м.н.</i>	
<i>М. А. Колосов, д.т.н.</i>	
<i>Е. А. Королева, д.э.н.</i>	
<i>И. И. Костылев, д.т.н.</i>	
<i>А. Л. Кузнецов, д.т.н.</i>	
<i>Е. А. Лаврентьева, д.э.н.</i>	
<i>В. А. Логиновский, д.т.н.</i>	
<i>В. Е. Марлей, д.т.н.</i>	
<i>А. М. Никитин, д.т.н.</i>	
<i>Т. А. Пантина, д.э.н.</i>	
<i>Л. И. Погодаев, д.т.н.</i>	
<i>В. И. Решняк, д.т.н.</i>	
<i>В. В. Романовский, д.т.н.</i>	
<i>А. В. Саушев, д.т.н.</i>	
<i>С. В. Смоленцев, д.т.н.</i>	
<i>А. Л. Степанов, д.т.н.</i>	
<i>М. В. Сухотерин, д.т.н.</i>	
<i>Е. Г. Трунин, к.э.н.</i>	
<i>А. Л. Тезиков, д.т.н.</i>	
<i>В. Б. Чистов, д.т.н.</i>	

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 771

Timoshek E. S., Malikova T. E. Optimization of the handling process of transport vessels on the raid by means of linear programming MATLAB 771

Maivorov N. N., Fetisov V. A., Dobrovolskaia A. A. Simulation of marine ferry routes based on graph theory in the context of strategic planning..... 782

Voronenko A. K. Methodological approach to forecasting the fleet development by study of the Russian Far East 794

Yuyukin I. V. Spline alternative to the multiplicity of using reference ellipsoids in navigation 804

Tsuprik V. G. Conceptual modeling the system for ensuring design reliability of the offshore ice-resistant hydraulic structures bases 819

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 832

Sharafutdinova T. K. Comparative analysis of industrial underwater acoustic modems 832

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 842

Pivovarova N. A., Bayramova Yu. Sh., Vlasova G. V. Improving the properties of marine fuel by ultrasonic processing 842

Kryukov A. A. Numerical simulation of the velocity coefficient of the nozzle diaphragm of a low-consumption turbine 849

Strizhius V. E. Evaluation of fatigue life and service life of the boat body outer composite skin 858

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES..... 867

Bogatyreva E. V. Operating parameters of absorption refrigeration unit influence on the zone of degassing 867

Ivanovskaya A. V., Zhukov V. A., Popov V. V. Studying dynamics of hoisting apparatus drives of a fishing vessel 875

Volume 13. № 6

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.

R. Kachin'ski

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

A. I. Poshivay

Deputy
Minister of Transport
of the Russian Federation

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. Trunin,
candidate of economic Sciences
A. L. Tezikov,
doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS..... 887

Almakki A. N. J., Mazalov A. A. Application of fractional-order
second-order continuous sliding mode controller in direct flux
and torque control system of doubly-fed induction generator integrated
to wind turbine: simulation studies 887
Bordyug A. S. Application of relay protection systems in ship power
complexes 908

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-771-781

OPTIMIZATION OF THE HANDLING PROCESS OF TRANSPORT VESSELS ON THE RAID BY MEANS OF LINEAR PROGRAMMING MATLAB

E. S. Timoshek, T. E. Malikova

Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

One of the tasks of managing the work of the fleet of a small shipping company engaged in the transportation of supply cargo in the Eastern Arctic regions at the level of voyage planning, namely, the private task of arranging auxiliary watercraft for unloading transport vessels on the raid, is considered in the paper. It is noted that the production necessity for frequent adjustments to the voyage plans of small companies leads to the repeated solution of the same production planning task, but with different input parameters. It is the iterative nature of the management decision-making process that primarily justifies the relevance of solving the problem of voyage planning automation. It is shown that the main problem in automating the process of managing the work of a group of vessels is the development of mathematical models that are adequate to the real processes and economic conditions on the market, using numerical optimization methods. In the course of the scientific research, the adaptation of the classical model of production planning to the technological parameters of the task of organizing the processing of ships on the raid with the use of the port fleet for unloading is carried out. The main results of the study are the following: a model of the placement of the auxiliary fleet in conditions of its shortage, performed by linear programming methods, with its implementation in the environment of application programs of the MATLAB package, as well as a numerical experiment to substantiate the reliability of the obtained model solutions and prove the adequacy of the proposed model of the fleet placement to the real technological process. A distinctive feature of the mathematical model in the form of a software product is the flexibility of reconfiguring input parameters to changing conditions and tasks performed, due to the organization of their input in file of text formats. The practical application of the mathematical model "Placement of the auxiliary fleet" and its analogue of the subprogram within the automation of the management process of a group of vessels in small segments of the sea transportation market allows us to evaluate the efficiency of the port fleet and form optimal schemes for its placement for the nearest navigation.

Keywords: marine transport, fleet management, mathematical modeling, placement of auxiliary fleet, cargo transportation in the Arctic.

For citation:

Timoshek, Elena S., and Tatiana E. Malikova. "Optimization of the handling process of transport vessels on the raid by means of linear programming MATLAB." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.6 (2021): 771–781. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-771-781.

УДК 656.614.3:004.42

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ НА РЕЙДЕ СРЕДСТВАМИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ МАТЛАВ

Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова

Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

В статье рассмотрена одна из задач управления работой флота малой судоходной компании, осуществляющей перевозку грузов снабжения в районах Восточной Арктики, на уровне рейсового планирования, а именно частная задача расстановки вспомогательных плавсредств для разгрузки транспортных судов на рейде. Отмечается, что производственная необходимость частой корректировки рейсовых планов небольших компаний приводит в итоге к многократному решению одной и той же задачи производственного планирования, но с разными входными параметрами. Именно итерационным характером процесса

принятия управленческих решений в первую очередь обоснована актуальность решения задачи автоматизации рейсового планирования. Показано, что основной проблемой при автоматизации процесса управления работой группы судов является разработка математических моделей, адекватных реальным процессам и экономической конъюнктуре на рынке, с применением методов численной оптимизации. В ходе научного исследования выполнена адаптация классической модели производственного планирования под технологические параметры задачи организации обработки судов на рейде с использованием для разгрузки последних плавсредств портового флота. Основными результатами исследования являются модель расстановки вспомогательного флота в условиях его дефицита, выполненная методами линейного программирования, с ее реализацией в среде прикладных программ пакета MATLAB, а также численный эксперимент для обоснования достоверности полученных модельных решений и доказательства адекватности предложенной модели расстановки флота реальному технологическому процессу. Отличительной особенностью математической модели в виде программного продукта является гибкость перенастройки входных параметров к изменяющимся условиям и выполняемым задачам за счет организации их ввода в форматах текстовых файлов. Практическое применение математической модели «расстановки вспомогательного флота» и ее подпрограммного аналога в рамках автоматизации процесса управления группой судов на малых сегментах рынка морских перевозок позволяет оценивать эффективность работы портового флота и сформировать оптимальные схемы его расстановки на ближайшую навигацию.

Ключевые слова: морской транспорт, управление работой флота, математическое моделирование, расстановка вспомогательного флота, перевозка грузов в Арктике.

Для цитирования:

Тимошек Е. С. Оптимизация процесса обработки транспортных судов на рейде средствами линейного программирования MATLAB / Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 771–781. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-771-781.

Введение (Introduction)

Одной из ключевых и до конца не решенных задач в области эксплуатации морского транспорта по-прежнему остается задача автоматизации планирования работы флота. В советский период развития эксплуатационной науки были разработаны и внедрены в практическую деятельность математические методы и модели управления транспортными процессами [1]–[3] в виде четырехуровневой схемы, включающей навигационное, месячное, декадное и рейсовое планирование [4]. Однако резкий переход к рыночным отношениям привел к распаду сложившейся на тот момент системы управления. В результате приватизации парокходств и портов взаимосвязи между транспортной инфраструктурой и грузовладельцами были разрушены, и прежняя система планирования перестала существовать.

На транспортный рынок в большом количестве вышли небольшие судоходные компании, имеющие в своем активе одно-два судна и осуществляющие перевозку на небольшом сегменте транспортного рынка [5]. Для таких компаний все задачи управления флотом сосредоточены на уровне рейсового планирования, поэтому задача формирования структуры арендуемого флота [6]–[8] и задача определения зоны эффективного использования для каждого из выбранных судов [9] являются приоритетными. Структура флота малой судоходной компании является динамически изменяющимся объектом исследования, так как аренда судов по тайм-чартеру позволяет быстро менять списочный состав судов компании в зависимости от изменений объемов перевозимого груза. Постоянное изменение состава арендуемого флота вследствие увеличения или уменьшения объема грузопотока требует частой корректировки рейсовых планов. Например, в работе [4] на основании приведенных расчетов сделан вывод о том, что обновление плана работы флота необходимо выполнять с интервалом 3–4 ч.

С точки зрения математического моделирования ответ на вопрос о необходимости корректировки найденного оптимального плана решается в два этапа. Первым этапом является проверка на устойчивость оптимального плана математической модели к изменяющимся входным параметрам, вторым — нахождение нового оптимального плана, если при проверке доказано, что план неустойчив. Таким образом, частая корректировка рейсовых планов приводит к необходимости многократного решения одной и той же задачи математического моделирования, но с разными

входными параметрами. Итерационный характер процесса принятия решений в управлении флотом малой судоходной компании определяет актуальность решения задачи автоматизации планирования для подобных предприятий.

В настоящее время накоплен большой опыт методических подходов к реализации автоматизированных систем на основе моделирования динамически изменяющихся объектов в различных направлениях исследования проблем морского транспорта, начиная с главной — безопасности морской перевозки грузов [10]–[12], и заканчивая текущими: управления работой порта [13]–[15] и флота [16], [17]. Однако обзор литературных источников, выполненный в работе [18], показал, что современное развитие математических моделей управления флотом идет в направлении увеличения размерности решаемой задачи за счет внесения в модель как традиционных систем ограничений, учитывающих как эксплуатационный период и объем перевозок для каждого порта, так и дополнительные ограничения на ресурсы, такие, например, как ограничение расхода топлива на главные двигатели в расчете на круговой рейс [19]. В свою очередь, увеличение размерности задачи приводит к повышению трудоемкости вычислительного процесса и обращению исследователей к новым нетрадиционным методам поиска оптимального ответа, в частности, из других областей знаний. Например, из биологии был взят генетический алгоритм, который впоследствии был использован для решения задачи оптимизации маршрута судна [20]. При моделировании работы флота малой судоходной компании диаметрально противоположной задачей является борьба не с всевозрастающим количеством параметров управления в модели, а с малой размерностью в постановке рассматриваемой задачи [21]. Например, два судна выполняют перевозки на одном направлении (задача расстановки флота размерности 2×1).

На российском рынке морских перевозок грузов снабжения для Восточной Арктики работают в основном судоходные компании, попадающих под определение «малых». Исходя из ранее изложенного, разработанные на сегодняшний день методы и модели не в полной мере применимы в рамках задачи автоматизации планирования и управления флотом маленькой компании, требуя адаптации под данные условия моделирования. С точки зрения особенностей эксплуатации судов в Арктике в рамках автоматизации планирования работы флота необходимо рассматривать вопросы выгрузки грузов на необорудованный берег различными вспомогательными плавсредствами, в том числе самоходными баржами или амфибийными вездеходами [22]–[24]. Таким образом, при разработке методического обеспечения управления флотом малой судоходной компании была поставлена частная задача моделирования процесса расстановки вспомогательного флота в условиях его дефицита на основе применения линейного программирования с использованием инструментальных средств MATLAB [25], [26].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В ходе решения поставленной задачи был предложен один из возможных вариантов математической модели расстановки вспомогательного флота в виде задачи производственного планирования, сформулированной следующим образом: для организации обработки судов на рейде с помощью плавсредств портовый флот располагает определенным числом барж ($i = \overline{1; m}$). Известно, что по условиям эксплуатации технологические схемы расстановки барж у борта судна зависят от волнения моря и размеров самих барж. Следовательно, каждая из возможных схем обладает определенным набором барж разных типов, которые одновременно пришвартованы под разгрузку. Соответствующие каждой схеме наборы барж будем называть «буксирным возом». Существует несколько различных вариантов (схем) формирования состава буксирного воя ($j = \overline{1; n}$). Необходимо распределить имеющиеся у портового флота баржи по возможным схемам так, чтобы общая грузоподъемность воя была наибольшей.

Математическая модель задачи запишется следующим образом:

$$f = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m q_i a_{ij} x_j \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, (i = \overline{1; m}); \quad (2)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad (3)$$

где f — общая грузоподъемность буксирных возов;

q_i — грузоподъемность i -го буксира;

a_{ij} — количество буксиров i -го типа, используемых в j -й схеме;

b_i — количество барж каждого типа;

x_j — количество буксирных возов, формируемых для каждой из имеющихся схем.

В качестве «платформы» для написания модуля «оптимизации работы вспомогательных судов» для автоматизированной системы управления флотом малой судоходной компании был выбран пакет прикладных программ среды MATLAB (версия R2017b, лицензия № 970311) ввиду следующих обстоятельств: в данном программном продукте уже создан стандартный каркас решения распределительной задачи в классической постановке и, кроме того, осуществлена возможность адаптации стандартных алгоритмов под структуры моделей, выходящих за рамки классических образцов.

Ввод входных параметров математической модели осуществляется при соблюдении синтаксиса функций `linprog` из дополнения Optimization Toolbox к пакету прикладных программ среды MATLAB:

$$[x, fval] = \text{linprog}(f, A, b, Aeq, beq, lb, ub).$$

Данная функция позволяет решить задачу линейного программирования в следующей форме:

$$f^T \times X \rightarrow \inf;$$

$$A \times X \leq b;$$

$$Aeq \times X = beq;$$

$$lb \leq X \leq ub,$$

где f^T — вектор коэффициентов целевой функции;

A — матрица коэффициентов при переменных в ограничениях-неравенствах;

b — вектор свободных членов в ограничениях-неравенствах;

X — вектор значений переменных (параметров управления);

Aeq — матрица коэффициентов при переменных в ограничениях-равенствах;

beq — вектор свободных членов в ограничениях-равенствах;

lb — вектор ограничений плана X снизу;

ub — вектор ограничений плана X сверху.

Выполним адаптацию функции `linprog` применительно к условиям решаемой математической задачи (1)–(3). Во-первых, в синтаксисе функции заложено нахождение минимума целевой функции. В математической модели расстановки вспомогательного флота целевая функция — функция максимума (1) и, следовательно, коэффициенты целевой функции необходимо вводить с противоположными знаками, т. е. коэффициенты f^T умножаются на (-1) . Во-вторых, еще одной отличительной особенностью модели от канонической формы является отсутствие группы ограничений равенств (2). Внося данные изменения в каноническую форму функции, получим

$$[x, fval] = \text{linprog}(-f, A, b, [], [], lb).$$

В данной записи функция `linprog` решает задачу в следующей форме:

$$-f^T \times X \rightarrow \inf;$$

$$A \times X \leq b;$$

$$lb \leq X,$$

где f^T — вектор коэффициентов целевой функции;

A — матрица коэффициентов при переменных в ограничениях-неравенствах;

b — вектор свободных членов в ограничениях-неравенствах;

X — вектор значений переменных (параметров управления);

lb — вектор ограничений плана X снизу.

В-третьих, необходимо предварительно найти значения коэффициентов целевой функции. Экономическим смыслом каждого коэффициента является грузоподъемность буксирного воя, формируемого для соответствующей схемы, вычисляемая по формуле

$$C_j = \sum_{i=1}^m q_i \cdot a_{ij} \quad (j = \overline{1;n}).$$

Операция вычисления коэффициентов целевой функции задачи (1)–(3) должна быть записана в программе MATLAB в стандартной для нее форме записи формул:

$$C1 = q1 * D(1,1) + q2 * D(2,1) + \dots + qt * D(m,1);$$

$$C2 = q1 * D(1,2) + q2 * D(2,2) + \dots + qt * D(m,2); \quad (4)$$

...;

$$Cn = q1 * D(1,n) + q2 * D(2,n) + \dots + qt * D(m,n).$$

Из формул (4) следует, что входными переменными программы являются в данном случае: грузоподъемность каждого типа плавсредств (вектор Q), матрица D — составы буксирных воя для каждого из вариантов схем расстановки. Также необходимо организовать ввод переменных b_i — количество плавсредств каждого типа. Таким образом, пользователь в процессе работы с программой будет иметь дело с базами данных, ввод которых в среде MATLAB организован через оформление входных переменных в форматах текстов файлов.

Результаты (Results)

Проанализируем работу программы в тестовом режиме на числовом примере расстановки вспомогательного флота (размерность задачи 2×3). Входные параметры модели приведены в следующей таблице:

Принятые обозначения математической модели

Тип баржи	Грузоподъемность, т (коэффициенты вектора Q)	Состав буксирного воя для каждой схемы, шт. (коэффициенты матрицы D)			Количество барж, шт.
		1-я схема	2-я схема	3-я схема	
Малое плавсредство	14	4	0	2	$b_1 = 20$
Большое плавсредство	40	0	2	1	$b_2 = 10$

Примечание. Малое плавсредство — самоходная баржа проект «Север 02»: $Dw = 14$ т ($L \cdot B = 15,5 \cdot 3,85$). Большое плавсредство — самоходная баржа «Славянка УД»: $Dw = 40$ т, ($L \cdot B = 16 \cdot 5,2$).

Организация ввода входных параметров в формате текстовых файлов и сама программа решения числового примера приведены на рис. 1, а, результаты ее работы представлены на рис. 1, б.

а)

```

Editor - C:\Users\Максим\Documents\n23.m
n22.m x Mat22.m x n20.m x n23.m x +
1 %Введите расстановку плавсредств по схемам обработки
2 D=[4 0 2; 0 2 1]
3 %Введите дедевейт малого плавсредства
4 q1=14
5 %Введите дедевейт большого плавсредства
6 q2=40
7 %Введите количество малых плавсредств
8 n1=20
9 %Введите количество больших плавсредств
10 n2=10
11 c1=q1*D(1,1)+q2*D(2,1);
12 c2=q1*D(1,2)+q2*D(2,2);
13 c3=q1*D(1,3)+q2*D(2,3);
14 f=[-c1; -c2; -c3];
15 A=D;
16 b=[n1;n2];
17 lb=zeros(3,1);
18 [x,fval]=linprog(f,A,b,[],[],lb);
19 x
20 fval
21

```

б)

```

Command Window

Optimal solution found.

x =

     5
     5
     0

fval =

    -680

```

Рис. 1. Программа для решения задачи расстановки вспомогательного флота (а) и ее результаты (б)

В результате оптимальным решением является следующий план расстановки вспомогательного флота. Для первой схемы формируется пять буксирных взов, для второй схемы — пять буксирных взов, третью схему использовать нерентабельно. Максимальная грузоподъемность флота по найденному плану составит 680 т.

Обсуждение (Discussion)

Согласно результатам численного эксперимента, расстановка плавсредств вдоль борта судна при рейдовой разгрузки должна выполняться согласно схемам, представленным на рис. 2. Схемы размещения плавсредств (рис. 2, а, б), соответствуют первому варианту (схеме) состава буксирного взова, формируемого исключительно из барж малой грузоподъемности (баржа проект «Север 02», $D_w = 14$ т). Отличительной особенностью схемы, приведенной на рис. 2, а от схемы рис. 2, б является то, что первая применяется при наличии волнения, так как в этом случае плавсредства могут швартоваться только со стороны подветренного борта, а вторая — в штиль.

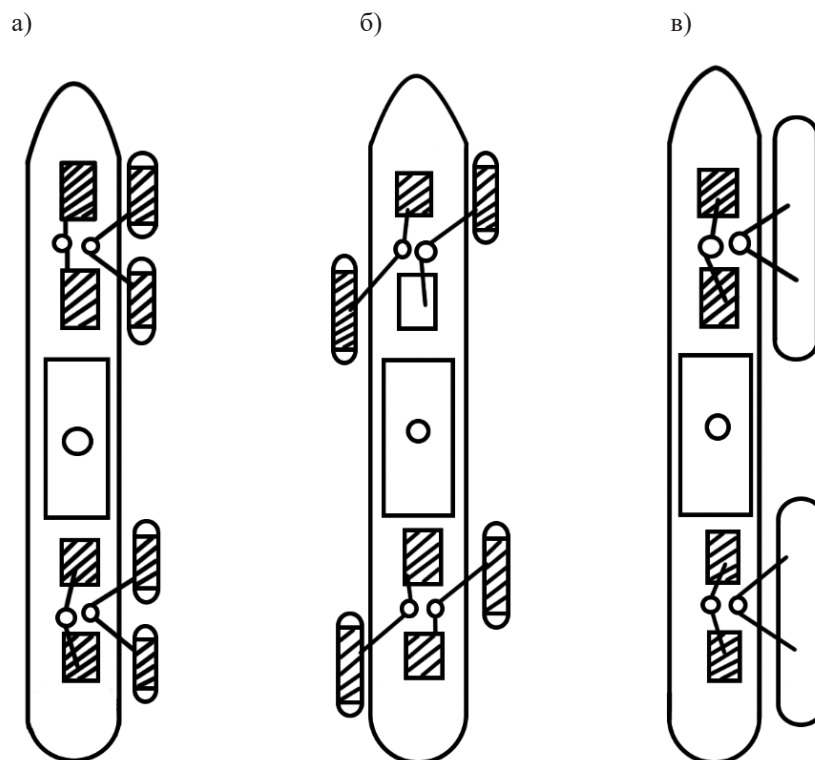


Рис. 2. Схема расположения плавсредств у судна:
а — с одного борта на каждый люк; б — с обоих бортов в шахматном порядке;
в — с одного борта на смежные люки

Схема размещения плавсредств, приведенная рис. 2, в, соответствует второму варианту (схеме) состава буксирного воя, формируемого только из барж большой грузоподъемности (баржа «Славянка УД», $Dw = 40$ т), Схема размещения в которой используется одновременно как баржи малой грузоподъемности, так и баржа большой грузоподъемности оказалась в данном случае неоптимальной.

Закключение (Conclusion)

Предложен вычислительный алгоритм и процедура оптимизации, позволяющие полностью автоматизировать процесс решения задачи расстановки вспомогательного флота на основе применения линейного программирования с использованием инструментальных средств MATLAB.

Описанный в работе алгоритм является одной из составных частей (подпрограммой) для автоматизированной системы (программы) принятия решений в управлении флотом малой судоходной компании, разрабатываемой на базе Морского государственного университета имени адмирала Г. И. Невельского. Интерфейс как подпрограммы, так и самой программы в целом за счет организации ввода переменных в форматах текстов файлов позволяет пользователю удобно и быстро изменять входные параметры моделируемых процессов, что, в конечном итоге, решает проблему трудоемкости при частой корректировке рейсовых планов малых судоходных компаний.

Практическое применение математической модели «расстановки вспомогательного флота» и ее подпрограммного аналога в рамках оптимального управления флотом судоходной компании в малых сегментах рынка морских перевозок обеспечивает быструю реакцию на малейшие изменения конъюнктуры последнего. Анализ получаемой в процессе моделирования информации позволяет оценить эффективность использования вспомогательного флота на конкретном участке транспортной сети и сформировать оптимальные схемы его работы на ближайшую навигацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриенко Д. В. Исследование операций — инструмент для повышения эффективности управления водным транспортом / Д. В. Дмитриенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1131–1141. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1131-1141.
2. Салько Д. Ю. Применение линейного моделирования при планировании работы флота судоходной компании / Д. Ю. Салько, К. М. Искандаров // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2012. — № 1(1). — С. 81–84.
3. Маликова Т. Е. Математические методы и модели в управлении на морском транспорте: учебное пособие / Т. Е. Маликова. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: ООО «Издательство ЮРАЙТ», 2018. — 373 с.
4. Зачесов В. П. Текущее и оперативное планирование работы флота в рыночных условиях / В. П. Зачесов, Ю. И. Платов // Транспортное дело России. — 2017. — № 1. — С. 143–144.
5. Маликова Т. Е. Формирование понятийного аппарата «малая судоходная компания» / Т. Е. Маликова, Е. С. Тимошек // Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации. Материалы IV Национальной научно-технической конференции. — Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2021. — С. 319–325.
6. Вишневский Д. О. Моделирование оптимальной структуры флота и перспективных направлений его работы / Д. О. Вишневский // Технологический аудит и резервы производства. — 2015. — Т. 1. — № 3(21). — С. 4–8. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.37095
7. Тимошек Е. С. Распределительная модель судов снабжения Арктического региона на участке транспортной сети / Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — № 60. — С. 213–222.
8. Маликова Т. Е. Результаты численной реализации задачи расстановки флота малой судоходной компании / Т. Е. Маликова, Е. С. Тимошек // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 654–665. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-654-665.
9. Тимошек Е. С. Определение зоны эффективного использования транспортного флота в арктическом регионе на примере группы судов компании ООО «Маринтэк» / Е. С. Тимошек, С. Е. Чуйкова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — № 61. — С. 184–192.
10. Маликова Т. Е. Использование теории графов при разработке математических моделей систем «смещающийся груз-спецустройство» / Т. Е. Маликова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2012. — № 2. — С. 39–42.
11. Nechaev Yu. I. Control of functioning regimes of on-board intelligence systems of safety monitoring / Yu. I. Nechaev, O. N. Petrov // Proceedings of 9th International ship stability workshop. — Hamburg, Germany, 2007. — Pp. 1–9.
12. Маликова Т. Е. Исследование системы обеспечения технологической безопасности морских судов методами теории катастроф / Т. Е. Маликова, М. А. Москаленко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2014. — № 3. — С. 94–97.
13. Кукушкин И. В. Алгоритмическое и программное обеспечение имитационного моделирования процессов переработки каботажных грузов / И. В. Кукушкин, А. П. Нырков, А. А. Нырков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 190–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-190-200.
14. Янченко А. А. Дискретно-событийная модель в задачах эксплуатации контейнерных терминалов / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 4 (85). — С. 25–31.
15. Kuznetsov A. L. Simulation Model of Container Land Terminals / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, J. J. Eglit // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2018. — Vol. 12. — № 2. — Pp. 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.
16. Румянцева А. А. Рациональная расстановка флота с использованием индексного метода / А. А. Румянцева // Экономика и предпринимательство. — 2019. — № 7(108). — С. 1073–1076.
17. Мойсеенко С. С. Методика выбора судов для освоения заданного грузопотока / С. С. Мойсеенко // IV Международной Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. — 2016. — С. 99–104.

18. 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.

19. Платов А. Ю. О современных методах бизнес-планирования работы речного флота / А. Ю. Платов, Ю. И. Платов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 54. — С. 110–115.

20. 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.

21. Тимошек Е. С. Адаптация задачи расстановки флота к условиям работы малых судоходных компаний / Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова // Логистика: современные тенденции развития. Материалы XIX Международной научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2020. — С. 97–103.

22. Азовцев А. И. Развитие судов для условий грузовых операций на необорудованных берегах Арктических и Субарктических морей / А. И. Азовцев, В. А. Кулеш, С. А. Огай, В. А. Петров // Полярная механика. — 2016. — № 3. — С. 450–460.

23. Азовцев А. И. Мореходные вездеходы на воздухоопорных гусеницах для повышения эффективности транспортной системы Арктики / А. И. Азовцев, С. А. Огай // Полярная механика. — 2016. — № 3. — С. 483–494.

24. Азовцев А. И. Прогноз преимуществ транспортных средств на воздухоопорных гусеницах для комплексного освоения замерзающего шельфа и побережья Арктики и Дальнего Востока / А. И. Азовцев, С. А. Огай, О. В. Москаленко // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады научно-практической конференции. — 2017. — № 2 (2). — С. 354–358.

25. Бородин Г. А. Использование среды MATLAB при решении задач линейного программирования / Г. А. Бородин, В. А. Титов, И. Н. Маслякова // Фундаментальные исследования. — 2016. — № 11–1. — С. 23–26.

26. Тимошек Е. С. Решение задач расстановки флота в среде MATLAB в учебном процессе морских вузов / Е. С. Тимошек // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2019. — № 4 (29). — С. 25–30.

REFERENCES

1. Dmitrienko, Dmitry V. “Operations research — a tool to improve the efficiency of management of water transport.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1131–1141. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1131-1141.

2. Salko, D.Y., and K. M. Iskandarov. “The application of linear modeling while planning the shipping company operation.” *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F. F. Ushakova* 1(1) (2012): 81–84.

3. Malikova, T. E. *Matematicheskie metody i modeli v upravlenii na morskoy transporte: uchebnoye posobie*. M. Izdatel'stvo Jurajt, 2018.

4. Zachesov, V., and Y. Platov. “Current and operational planning of the fleet in market conditions.” *Transport business of Russia* 1 (2017): 143–144.

5. Malikova, Tatiana E., and Elena S. Timoshek. “Formation of the conceptual apparatus “small shipping company”.” *Innovatsionnoye razvitiye rybnoy otrasli v kontekste obespecheniya prodovol'stvennoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii. Materialy IV Natsional'noy nauchno-tehnicheskoy konferentsii*. Vladivostok: Dal'nevostochnyi gosudarstvennyi tekhnicheskii rybnokhozyaistvennyi universitet, 2021. 319–325.

6. Vishnevsky, D. “Modeling of the optimal fleet structure and perspective directions of its work.” *Technology audit and production reserves* 3(21) (2015): 4–8. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.37095.

7. Timoshek, Elena S., and Tatyana E. Malikova. “Routing model for supply ships operating in the Arctic Region transport network.” *Bulletin of VSAWT* 60 (2019): 213–222.

8. Malikova, Tatiana E., and Elena S. Timoshek. “The results of numerical implementation of the task of arranging the fleet of a small shipping company.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 654–665. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-654-665.

9. Timoshek, Elena S., and Svetlana E. Chuikova. "Determination of the zone of effective use of transport fleet in the Arctic region on the example of the "MarinTEK" vessel group." *Bulletin of VSAWT* 61 (2019): 184–192.
10. Malikova, T. E. "Using the theory of graphs in developing mathematical models of the systems «shifting cargoes — special equipment»." *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 2 (2012): 39–42.
11. Nechaev, Yu. I., and O. N. Petrov. "Control of functioning regimes of on-board intelligence systems of safety monitoring." *Proceedings of 9th International ship stability workshop*. Hamburg, Germany, 2007. 1–9.
12. Malikova, T. E., and M. A. Moskalenko. "Catastrophe theory application to the study of the system of ensuring sea-going vessels' technological safety." *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 3 (2014): 94–97.
13. Kukushkin, I.V., A. P. Nyrkov, and A. A. Nyrkov. "Algorithms and software of simulation modeling of the coasting ships processing." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 190–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-190-200.
14. Yanchenko, A. A., and T. E. Malikova. "A discrete-event model for operations in container terminals." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (85) (2017): 25–31.
15. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and J. J. Eglit. "Simulation Model of Container Land Terminals." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.2 (2018): 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.
16. Rumiantseva, A. A. "Rational fleet allocation using the index method." *Journal of Economy and entrepreneurship* 7(108) (2019): 1073–1076.
17. Moiseenko, S.S. "Metodika vybora sudov dlya osvoeniya zadannogo gruzopotoka." *IV Mezhdunarodnoi Baltiiskii morskoi forum: materialy Mezhdunarodnogo morskogo foruma*. 2016. 99–104.
18. 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.
19. Platov, A. Y., and J. I. Platov. "The modern methods of business planning of river fleet." *Bulletin of VSAWT* 54 (2018): 110–115.
20. 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.
21. Timoshek, Elena S., and Tatiana E. Malikova. "Adaptatsiya zadachi rasstanovki flota k usloviyam raboty mal'kh sudokhodnykh kompaniy." *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya. Materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2020. 97–103.
22. Azovtsev, Anatoliy, Victor Kulesh, Aleksey Ogay, and Vladimir Petrov. "Ship's Construction Development for Cargo Operations in Condition of the Unimproved Port Facilities in Arctic and Subarctic Coast." *Polyarnaya mekhanika* 3 (2016): 450–460.
23. Azovtsev, Anatoliy, and Sergey Ogai "Seaworthy All-Terrain Vehicles on Air-Supported Tracks for Increasing Effectiveness of the Arctic Transport System." *Polyarnaya mekhanika* 3 (2016): 483–494.
24. Azovtsev, A. I., S. A. Ogai, and O. V. Moskalenko. "Prognoz preimushchestv transportnykh sredstv na vozdukhopornnykh gusenitsakh dlya kompleksnogo osvoeniya zamerzayushchego shel'fa i poberezh'ya Arktiki i Dal'nego Vostoka." *Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Doklady nauchno-prakticheskoi konferentsii* 2(2) (2017): 354–358.
25. Borodin, G. A., V. A. Titov, and I. N. Maslyakova. "Solving liner programming problems with MATLAB." *Fundamental research* 11–1 (2016): 23–26.
26. Timoshek, Elena S. "Solving the problems of fleet planning in MATLAB in the educational process of maritime universities." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F. F. Ushakova* 4(29) (2019): 25–30.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тимошек Елена Сергеевна —
старший преподаватель
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50А
e-mail: timoshek-es@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Timoshek, Elena S. —
Senior lecturer
Maritime State University named
after Admiral G. I. Nevel'skoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: timoshek-es@mail.ru

Маликова Татьяна Егоровна —
доктор технических наук, доцент
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50А
e-mail: Malikova@msun.ru

Malikova, Tatiana E. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Maritime State University named
after Admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: Malikova@msun.ru

Статья поступила в редакцию 1 октября 2021 г.

Received: October 1, 2021.

SIMULATION OF MARINE FERRY ROUTES BASED ON GRAPH THEORY IN THE CONTEXT OF STRATEGIC PLANNING

N. N. Maiorov, V. A. Fetisov, A. A. Dobrovolskaia

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

The issues of implementation of long-term goals of sustainable development of sea passenger transportation, achievement of transportation results, overcoming the negative impact of factors of unstable external environment, which are determined by the chosen course laid down in the basis of strategic management of ferry transportation and choice of route directions, are investigated in the paper. The study indicates that despite the negative impact of COVID-19 and the resulting delayed passenger demand for cruise services, the potential of the maritime ferry and cruise market is very high. It is noted that since 2021 there is a gradual process of recovery of route networks, which takes place in different regions with different dynamics. Therefore, the goals of ferry companies are to implement several strategic planning tasks, among which the task of designing the most efficient new route network is relevant, while companies can start to implement route networks and destinations based on the existing route networks (e. g. networks and destinations of the Baltic Sea) for 2019. It is emphasized that due to the new possibility to attract additional passenger traffic, detailed research and modelling of different options is needed. The Baltic Sea region is chosen as the object for the study, since the local mobility of passageways makes it possible to renew the routes in the shortest possible time. The data for different seas, characterizing the intervals of decline and justifying the necessity of innovations on the basis of new competitive routes creation, are presented in the study. The subject of the study is routes and route networks of the seas regions. The use of models in the form of graphs and algorithms, such as Dijkstra's algorithm, is proposed for modelling different variants of sea ferry routes architecture. The new ferry route network model is implemented in the J-Circos software environment for the subsequent construction of various intensity diagram options. Due to the flexibility of the interfaces and the software environment it is possible to combine the existing networks in 2019 and the proposed new routes in a single information field. In this way, a new possibility to assess the position of a ferry company on the passenger market and to evaluate the quantitative indicators in relation to the other ferry and cruise companies is considered in the paper. The proposed solutions are included in a separate decision-making flowchart for selecting a promotion strategy in the sea region ferry market. The solutions presented have versatility, the methodology and implementation can also be applied to the other sea regions. A new possibility of representing evolutionary changes in the route networks, which also provides an opportunity to further improve the quality of strategic planning and promotion decision-making, forming a separate area of analytical work of a maritime ferry company, is considered.

Keywords: ferry network, maritime ferry transportation, intensities pie charts, Baltic Sea, graphs, shortest route, port system.

For citation:

Maiorov, Nikolai N., Vladimir A. Fetisov, and Angelina A. Dobrovolskaia. "Simulation of marine ferry routes based on graph theory in the context of strategic planning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 782–793. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-782-793.

УДК 65.012.1, 656.072

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАРШРУТОВ МОРСКИХ ПАРОМНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ В КОНТЕКСТЕ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Добровольская

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе исследованы вопросы реализации долгосрочных целей устойчивого развития морских пассажирских перевозок, достижения результатов перевозок, преодоления негативного влияния факторов

нестабильной внешней среды, которые определяются выбранным курсом, положенным в основу стратегического управления паромными перевозками и выбором маршрутных направлений. В проведенном исследовании указывается, что несмотря на негативное влияние Covid-19, и наблюдающийся в связи с этим отсроченный спрос на круизные перевозки у пассажиров, потенциал рынка морских паромных и круизных перевозок очень высок. Отмечается, что начиная с 2021 г. наблюдается постепенный процесс восстановления маршрутных сетей, который происходит в различных регионах с разной динамикой. В связи с этим целями паромных компаний является реализация нескольких задач в области стратегического планирования, среди которых актуальной является задача проектирования наиболее эффективной новой маршрутной сети. При этом компании могут начать реализовывать маршрутные сети и направления на основе базы имеющихся маршрутных сетей (например, сетей и направлений Балтийского моря) на 2019 г. Подчеркивается, что ввиду новой возможности привлечения дополнительного пассажиропотока, необходимо детальное исследование и моделирование различных вариантов маршрутных сетей морских паромных перевозок. Объектом исследования выбран регион Балтийского моря, поскольку именно локальная мобильность пассажиров дает возможность возобновления маршрутов в кратчайшие сроки. В работе представлены данные по различным морям, характеризующие интервалы спада и обосновывающие необходимость введения инноваций на основе создания новых конкурентных маршрутов. Предметом исследования являются маршруты и маршрутные сети регионов морей. Для моделирования различных вариантов архитектуры морских паромных маршрутов предлагается использование моделей в форме графов и таких алгоритмов, как алгоритм Дейкстры. Новая модель паромной маршрутной сети реализована в программной среде J-Circos для последующего построения различных вариантов диаграмм интенсивностей. Ввиду гибкости интерфейсов и программной среды предоставлена возможность совмещения существующих сетей 2019 г. и предлагаемых новых маршрутов в едином информационном поле. Таким образом, в работе рассмотрена новая возможность оценки положения паромной компании на рынке пассажирских перевозок и оценки количественных показателей по отношению к другим паромным и круизным компаниям. Предложенные решения включены в отдельную блок-схему принятия решений по выбору стратегии продвижения на рынке паромных перевозок в регионе моря, они обладают универсальностью, поэтому данную методику и реализацию можно применять также для регионов других морей. Рассмотрена новая возможность представления эволюционных изменений в маршрутных сетях, что также дает возможность дополнительного повышения качества принятия решений по стратегическому планированию и продвижению, образуя отдельное направление аналитики работы морской паромной компании.

Ключевые слова: паромная сеть, морские паромные перевозки, круговые диаграммы интенсивностей, Балтийское море, графы, кратчайший маршрут, система портов.

Для цитирования:

Майоров Н. Н. Моделирование маршрутов морских паромных перевозок на основе теории графов в контексте стратегического планирования / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Добровольская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 782–793. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-782-793.

Введение (Introduction)

В период 2016–2019 гг. морские круизы являлись одним из наиболее интенсивно развивающихся туристических направлений. В данной отрасли наблюдалась значительная динамика ежегодного прироста показателей. Начиная с 1990 по 2021 гг. в связи с быстрым ростом рынка круизов широкое распространение получили круизные маршруты от Карибского и Средиземного моря, Аляски до Азии. Согласно аналитическим данным [1]–[3], во всем мире индустрия океанских и морских круизов в указанный период имеет ежегодный совокупный темп роста пассажиропотока в размере 6,63 %. Изучение аналитических отчетов: 2020 Cruise Industry 101, МНА 35th Special Magazine, позволяет сделать вывод о том, что несмотря на временную остановку в развитии, вызванную пандемией Covid-19, компании прогнозируют значительное увеличение емкости рынка (рис. 1).



Рис. 1. Тренд на увеличение спроса / емкости рынка круизных и паромных перевозок

Согласно источнику Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry 2021¹, в таблице приведены мировые данные по пассажиропотоку круизных и паромных направлений.

Перевозки пассажиров морскими круизными и паромными линиями с 2017 по 2021 гг.

Годы	Порты Северной Америки, шт.	Порты Европы, шт.	Другие регионы морей, шт.
2017	12645600	6996000	5536400
2018	12927800	7285100	6291700
2019	12929200	7564900	7014800
2020	3225500	1935300	1931800
2021	6118596	3754580	4032711

Увеличение пассажиропотока связано с возобновлением паромных маршрутов в пределах портов одной страны. Графические характеристики изменения пассажиропотоков, согласно данным [1], [2], приведены на рис. 2.

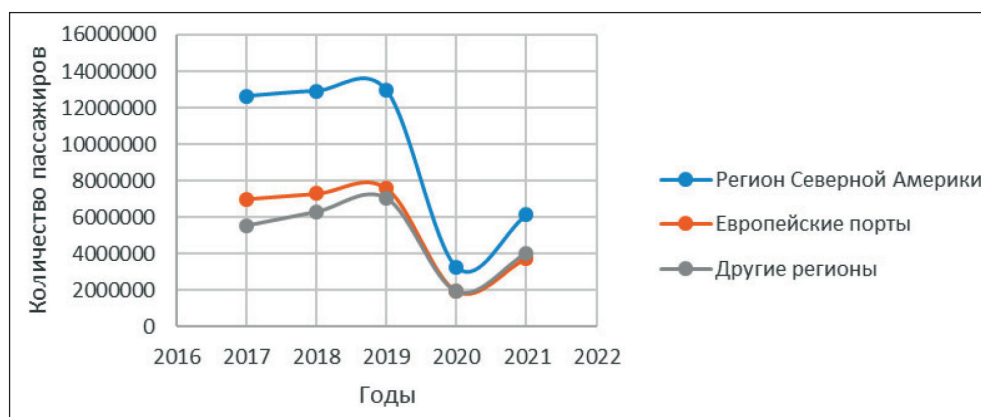


Рис. 2. Динамика пассажиропотоков

Несмотря на прогнозируемые данные и высокий потенциал рынка круизных и паромных линий морских круизных перевозок с 2017 по 2021 гг., ситуация, наблюдающаяся в настоящее время, не позволяет быстро достигнуть докризисного уровня. Из-за ограничений, вызванных эпидемией Covid-19, необходимо постепенное восстановление и возобновление работы маршрутных сетей и отдельных направлений. Например, применительно к региону Балтийского моря, если рассмотреть расписание судозаходов АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад»» (Passenger Port of Saint-Petersburg «Marine Façade»), последним круизным судном был лайнер AIDAaura, который находился в порту 21 октября 2019 г. В настоящее время расписание круизного судоходства в порту не восстановлено.

Согласно графическим характеристикам на рис. 2 и приведенным ранее табличным данным, видно, что пандемия Covid-19 приостановила индустрию пассажирских круизов в среднем на одиннадцать месяцев. С другой стороны, согласно источникам [1]–[3], данный процесс также ускорил процесс списания многочисленных круизных и паромных судов, поскольку современный флот становится более экологичным, требуя внедрения новых автоматизированных и интеллектуальных информационных решений. Известно, что реализация долгосрочных целей устойчивого развития морских пассажирских перевозок, достижение желаемых результатов и преодоление негативного влияния факторов нестабильной внешней среды определяются выбранным курсом, заложенным в основу стратегического управления.

¹ Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry. 2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cruisemarketwatch.com/growth/> (дата обращения: 05.09.2021).

Под влиянием эпидемии Covid-19 наблюдается резкое снижение глобальной мобильности круизов, в то время как локальная мобильность дает возможность ее оперативного возобновления в кратчайшие сроки. К регионам, к которым применимо понятие *локальной мобильности*, относится регион Балтийского моря. Исходя из системных позиций, круизная индустрия развивается посредством маршрутов новых направлений. Новый маршрут служит основным элементом — точкой роста и развития [4]–[7], стимулируя прогресс в смежных отраслях. Кроме того, именно он оказывает большое влияние на заполняемость круизных судов, определяя их экономическую эффективность. В данной статье объектом исследования являются маршруты и маршрутные сети, также оказывающие влияние на позицию паромной компании и морского пассажирского порта в регионе.

В настоящее время круизным компаниям необходимо вводить инновации в свои маршруты в различных районах для привлечения туристов. Разработка круизных маршрутов является вопросом, имеющим важное стратегическое и оперативное значение для круизных компаний, поскольку он является одним из главных факторов, оказывающих влияние на выбор круиза клиентами. В статье [8] исследована модель выбора морского круизного или паромного маршрута на основе логистической функции. Представленное решение позволяет спрогнозировать загруженность маршрута и может применяться как инструмент оценки эффективности существующей сети, однако оно несколько ограничено, так как применимо для конкретного маршрута и конкретного паромного судна.

В ситуации постепенного восстановления маршрутов круизных и паромных перевозок, снятия ограничений, вызванных эпидемией Covid-19, перед компаниями наиболее актуальной является задача выбора стратегии формирования маршрутной сети. С позиций системного анализа ситуация является характерной для принятия решения в случае неопределенности [9] для регионов морей в случае, когда возможны следующие варианты выбора стратегий:

1-й вариант — восстановление маршрутов только между двумя портами, переход к постепенному регулярному паромному движению;

2-й вариант — запуск новых маршрутов с целью привлечения пассажиров и ускорения достижения докризисных уровней;

3-й вариант — принятие решения по реализации маршрутных сетей 2019 г. и начала 2020 г. без изменений.

Каждый из представленных вариантов решений зависит от моделей и методов, определяющих маршрутные сети. Если третий вариант стратегии подразумевает использование применяемых маршрутов (простое восстановление существующей сети), то первые два требуют детальной разработки новых маршрутов, формирования новой сети на основе методов оптимизации, использования аппарата теории графов [10], современного информационного обеспечения проектирования маршрутов и анализа на основе диаграмм интенсивностей. Необходимы решения для системного представления всех маршрутов в некоторой единой плоскости. Новизна предлагаемого в работе исследования состоит в том, что рассматриваемое решение позволяет проектировать и исследовать маршрутные сети паромных и круизных линий с учетом влияния внешней среды и выполнять оценку изменений по отношению к другим паромным компаниям.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При выборе исходных данных системы морских пассажирских паромных линий объектом исследования выбран регион Балтийского моря и имеющиеся морские пассажирские паромные и круизные маршруты в 2019–начале 2020 гг. Морские паромные круизы и перевозки являются быстроизменяющейся системой, что позволяет достаточно гибко вносить в маршрутные сети и тем самым менять позицию и положение круизной или паромной компании в регионе. Данному положению также способствует близость стран региона Балтийского моря. Если рассматривать отдельно выбранный регион, то в Балтийском море существует не менее десяти основных паромных операторов, выполняющих пассажирские перевозки. Одним из уникальных аспектов Балтийского моря является то, что самые маленькие операторы (по критерию количества паромов

у компании и имеющейся маршрутной сети) могут конкурировать с крупнейшими на маршрутах. Основными из них являются: Eckerö Line, Eckerö Linjen, Finbo Cargo, Finnlines, St. Peter Line, Stena Line, TT-Line, Tallink Silja, Viking Line, Wasaline. В регионе Балтийского моря находится более 200 портов, 46 из которых могут осуществлять регулярные пассажирские круизные и паромные перевозки.

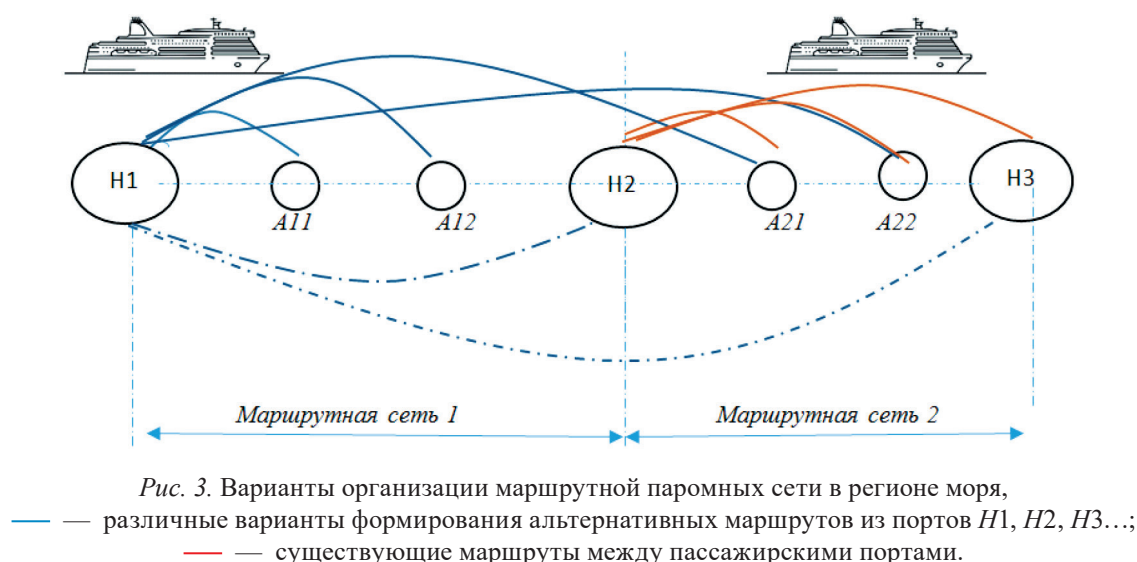
Организационная структура морского круиза представляет собой передвижение судна по некоторому заданному круговому маршруту с осуществлением радиальных поездок из портов во внутренние районы определенной страны. По длительности круизные маршруты подразделяются [11] следующим образом:

- краткосрочные (от нескольких часов до нескольких суток);
- среднесрочные (от трех до тринадцати суток);
- долгосрочные (до двух месяцев).

В соответствии с данной классификацией наблюдается пропорциональное увеличение количества портов, которые входят в состав маршрута. С позиций оперативного восстановления направлений и маршрутной сети необходимо краткосрочные и среднесрочные маршруты в первую очередь адаптировать к новым условиям восстановления. Представим маршрутную сеть на основе теории графов. Применительно к круизному маршруту принимаем, что порт начала круиза отличается от порта захода и должен обладать следующими двумя характеристиками:

- как порт отправления круизного маршрута занимается сбором круизного туристического потока;
- как порт высадки круизного маршрута занимается распределением круизного туристического потока.

На рис. 3 приведены различные варианты организации маршрутных сетей морских паромных линий с указанием $A11...A22...Anp$ — морских пассажирских портов региона моря; $H1, H2, H3, ...$ — основных морских пассажирских портов, между которыми существует некоторая маршрутная сеть.



В процессе формирования системы принятия решений по организации новых маршрутов, согласно рис. 3, модель преобразуется к набору конечного количества различных вариантов, приведенных на рис. 4.

Ввиду многообразия различных вариантов маршрутов через порты и терминалы, необходимо выполнять моделирование различных вариантов организации архитектуры сети. В данной статье не учитываются экономические условия и вопросы приграничного сотрудничества стран Балтийского региона. Для решения задачи стратегического планирования необходимо не только построение новой сети, но и использование инструментария, позволяющего отразить увеличение

или уменьшение доли присутствия компании на рынке морских паромных перевозок согласно выбранной стратегии развития.

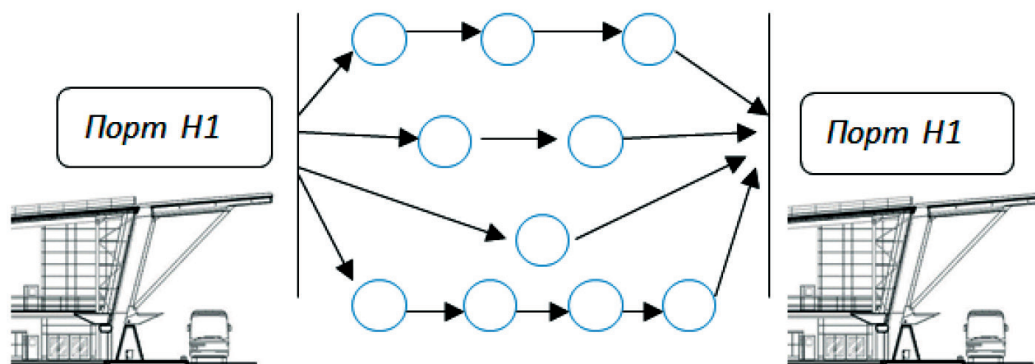


Рис. 4. Формирование различных вариантов построения маршрутов паромных линий через различную систему портов региона

Среди многообразия моделей и методов моделирования систем [12], [13] для решения задачи маршрутизации [14] предлагаются модели в форме графов (ориентированные, неориентированные и другие варианты). Использование аналитических моделей позволяет найти некоторое ограниченное количество решений, но не дает возможности представить маршрутные сети и вопросы изменения для всего региона моря. Для оценки эффективности возможных вариантов организации маршрутной сети на основе применения графов необходимо выполнить следующее:

- определить количество дополнительных портов, организуемых между рассматриваемыми портами как источниками формирования маршрута;
- определить количество новых портов, входящих в новый маршрут;
- определить возможную пропускную способность маршрута;
- определить значение длины кратчайшего пути от центрального узла графа до самого дальнего с учетом выполнения требований по ограничению суммарного потока между ними при помощи определения величины максимальной пропускной способности, входящей в этот маршрут.

Примем, что весь поток, исходящий из некоторого узла (порта) a_1 , сходится в узлах b_n , где $n \neq 1$, а весь поток, исходящий из узлов a_m , где $m \neq 1$, сходится в узле b_1 . Такое допущение возможно при условии, что количество данных, исходящих из узла a_m , конечным адресом которых является узел b_n , при $m \neq 1$ и $n \neq 1$ значительно меньше, чем между $a_1 b_n$ и $a_m b_1$. Таким образом, значение $a_m b_n = 0$ при $m \neq 1$ и $n \neq 1$. Для решения поставленных задач удобно использовать математическую модель сети, представленную в виде неориентированного графа $G(V, E)$, включающего множество вершин $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_i\}$, соответствующих узлам системы (пассажирским портам), и множество ребер $E = \{u, v | u \in V, v \in V\}$, описывающих существующие физические связи между соседними узлами (портами). Для упрощения расчетов примем, что каждое ребро между смежными ему вершинами (портами) отображает все физические связи, имеющиеся между соответствующим этим вершинам узлами (пассажирскими портами). Первому варианту будет соответствовать граф $G_i(V, E)$, заданный соответствующей матрицей смежности и матрицей весов:

$$S[i, j] = \begin{cases} 1; \\ 0; \\ \infty; \end{cases} \quad W[i, j] = \begin{cases} c_{ij}; \\ \infty; \\ \infty. \end{cases}$$

Элементы матрицы смежности $S[i, j] = 1$, если вершина v_i является смежной с вершиной v_j ; они равны нулю, если вершина v_i является несмежной с вершиной v_j и равны ∞ , если выполняется условие $i = j$. Для матрицы весов $W[i, j]$ равна c_{ij} при наличии ребра между вершинами. Остальные

значения в исследование не включаются и принимаются равными ∞ . Для практической реализации значение матрицы $W[i, j]$ задает максимальную пропускную способность маршрута связи между узлами v_i и v_j .

Используя математический аппарат теории графов, можно определить минимальное количество ребер, образующих путь между вершинами v_i и v_j . Результат представим в виде матрицы-строки:

$$D[j] = \begin{cases} d, d = \min \sum e_{uv} \mid e_{uv} \in E; \\ 0, j = 1. \end{cases}$$

Поскольку в данном случае исследуется модель в форме графов, имеет место использование алгоритма поиска кратчайших путей (алгоритм Дейкстры). В данном случае поочередно проложим кратчайший маршрут из вершины v_i до вершины v_j , для каждой из которых выполняется текущее условие $D[j] \rightarrow \min$. Далее определим все ребра (участки), входящие в каждый текущий маршрут паромной линии. По каждому из этих ребер может быть организован маршрут. Результаты практической реализации приведены на рис. 5. Для построения модели предлагается порты, входящие в выборку маршрутов, разместить по окружности.

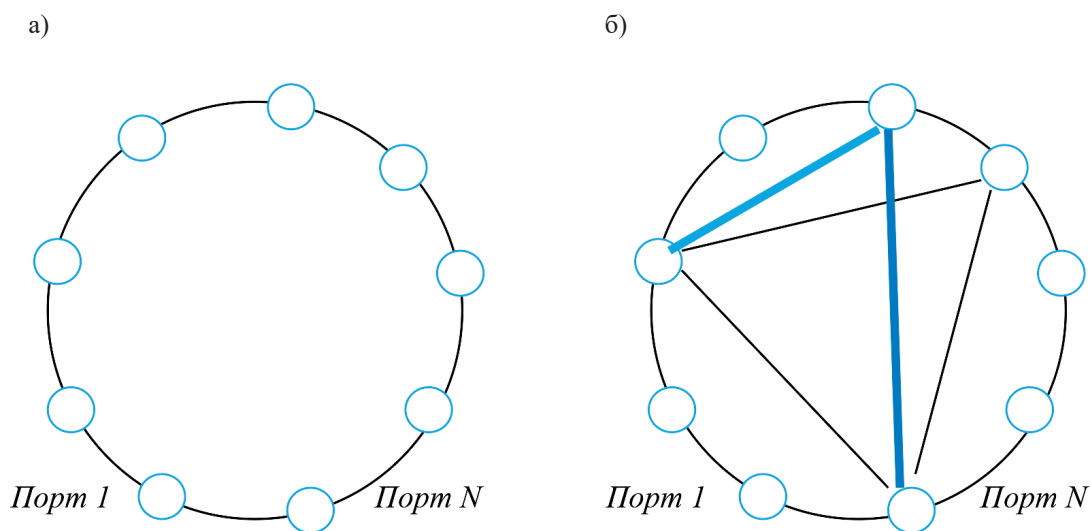


Рис. 5. Моделирование архитектуры сети для паромных и круизных линий в границах региона моря:
а — исходная модель; б — новый вариант маршрутной сети

Для практической реализации моделирование различных вариантов маршрутной сети предлагается использование круговых диаграмм интенсивностей. В качестве программного решения предлагается использование информационной среды J-Circos [15]. Данная версия программы имеет специализированный редактор, позволяющий проектировать различные варианты организации маршрутных сетей. Версии программы дают возможность сохранения в форматах, совместимых с аналитическими информационными пакетами.

Представим реализацию представленного ранее алгоритма в среде J-Circos, которая представляет собой интерактивный инструмент визуализации сложных систем с возможностью динамического изменения графических данных. Построение модели системы в J-Circos требует создания специальных файлов, описывающих характер элементов системы и связей между ними. Чтобы добавить связи и их интенсивность к исходному графику, необходимо использовать тип моста Circos plot, соответствующего дуге графа.

В файле задаются следующие поля:

1. Color — цвет соединения в формате RGB. Поскольку интенсивности невелики, разница в ширине линий связей не видна. Для каждой маршрутной сети имеется возможность выделения элементов различным цветом.

2. Chrom1 (2) — связанные элементы системы. Примем отсчет элементов с первого морского пассажирского порта или терминала, другие порты также располагаются на этой окружности по часовой стрелке.

3. Start1 — положение на участке, занимаемое исходной / конечной точкой маршрута.

4. Length1 — поток трафика из порта 1 в порт 2.

5. Length2 — поток трафика из порта 1 в порт 2 в обратном направлении.

6. Description1 — имя порта.

Практический пример реализации кода в среде J-Circos для системы портов приведен на рис. 6.

Radius 180								
Color	chrom1	start1	length1	description1	chrom2	start2	length2	description2
255,0,0	chr1	80000000	4	port1	chr19	40000000	4	port19
0,0,255	chr1	10000000	2	port1	chr20	40000000	2	port20
255,0,255	chr2	10000000	1	port2	chr16	40000000	1	port16
0,0,255	chr2	80000000	2	port2	chr17	40000000	2	port17
.....	...	...	...	...	...	...	...	...
255,0,255	chr7	80000000	1	port7	chr11	100000000	1	port11
Radius 205	Color		chrom	start	text	type		
0,0,0	chr1	120000000	Bari		circumference			
0,0,0	chr2	120000000	Cvitanova		circumference			
0,0,0	chr3	100000000	Ancona		circumference			
...	...	...	...	...	...			
0,0,0	chr20	35000000	Bar		circumference			
Radius 220	Color		chrom	start	text	type		
0,0,0	chr2	120000000	Marche		circumference			
0,0,0	chr12	70000000	Mali		circumference			

Рис. 6. Реализации программного кода маршрутной сети в среде J-Circos

Полученные данные необходимо передать в информационную систему J-Circos. Благодаря единству форматов имеется возможность согласования использования данных. Пример построения маршрутной сети для паромов «Принцесса Анастасия» (Princess Anastasia) компании St. Peter Line приведен на рис. 7.

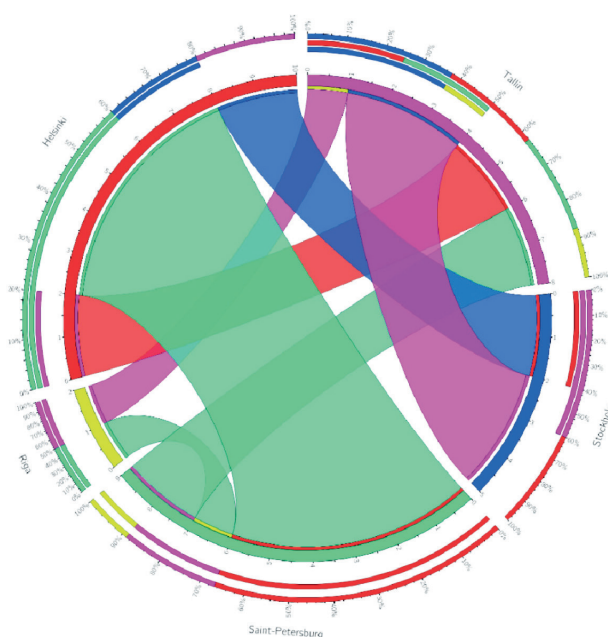


Рис. 7. Интенсивность движения паромов «Принцесса Анастасия» (Princess Anastasia) между портами и терминалами Балтийского моря

Обсуждение (Discussion)

На основе представленного подхода появляется возможность исследования различных вариантов организации сети паромных маршрутов в регионе моря с проведением качественной программной реализации в информационных средах J-Circos и CircosPlot. Ввиду наличия изменяемого интерфейса открывается возможность изменять системы портов, интенсивности работы, количественные характеристики загруженности. В отличие от моделей, представленных в работах [9], [16], [17], предлагаемое решение в форме графов и используемый инструментарий позволяют визуализировать маршрутные сети и определять взаимное влияние между паромными маршрутами различных компаний в регионе моря. В представленном решении для исследования графов был предложен алгоритм Дейкстры как наиболее эффективный для реализации процесса постепенного восстановления маршрутов. При этом в зависимости от целей исследования можно использовать другие хорошо известные алгоритмы нахождения оптимизационных путей на графах.

Предложенное решение позволяет сформировать блок-схему системы принятия решений по модернизации маршрутной сети для восстановления докризисных значений. Предлагаемая блок-схема приведена на рис. 8.

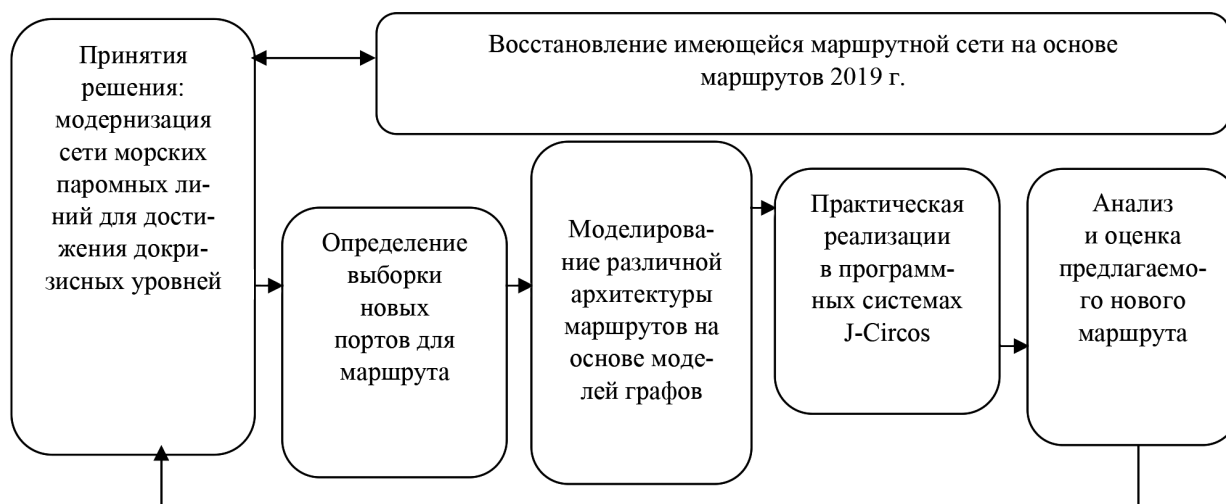


Рис. 8. Варианты принятия решений по модернизации маршрутной сети паромных линий

Поскольку между паромными компаниями существует конкуренция за пассажиропоток, в условиях восстановления им необходимо выводить на рынок новые маршруты. Это позволит дополнительно привлечь пассажиропоток и даст возможность увеличить время присутствия одних паромных компаний на рынке по отношению к другим, а также будет способствовать повышению точности принятия решения, поскольку даст возможность выработать некоторое оптимальное решение и представить положение компании и ее маршрутной сети на рынке. Кроме того, ввиду варьируемых параметров, появляется возможность выстраивать цепочки изменений в маршрутных сетях, тем самым повышая уровень принятия решений.

Результаты (Results)

Представленное решение на основе моделей в форме графов и практическая реализация в среде J-Circos позволяют системно на единой круговой диаграмме выполнить моделирование различных вариантов маршрутных паромных и круизных сетей. Совместно с предложенными алгоритмами на графах сформированы критерии создания новых маршрутов, которые в аспекте стратегического планирования позволяют оперативно достигнуть докризисного уровня по объемам перевозок. Представленное исследование выполнено на основе данных маршрутных пассажирских паромных сетей, полученных в 2019 г. от десяти паромных компаний Балтийского моря. Пример

выполненной реализации представлен на рис. 7. Приведенное решение обладает универсальностью и может быть применено для регионов других морей. Для решения задачи формирования новых маршрутов предлагается теоретическая модель принятия решений, основанная на точном позиционировании компании и маршрутной сети в регионе моря. Представленное решение позволяет производить оценку положения паромной компании относительно других компаний.

Заключение (Conclusion)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполнена аналитическая оценка ситуации спада в сфере круизных и паромных перевозок и обоснована необходимость изменений маршрутных сетей паромных и круизных линий для восстановления системы до докризисного уровня и изменения позиционирования паромной компании в регионе.
2. Выполнен анализ имеющейся маршрутной сети на основе диаграмм Circos, представлена реализация программного кода в среде J-Circos.
3. На основе анализа имеющихся маршрутных сетей Балтийского моря представлены модели и подходы для формирования новой маршрутной сети, которые в дальнейшем можно использовать для исследования на основе моделей и методов теории графов и матричных преобразований.
4. Представленные решения, реализованные в среде J-Circos, на основе региона Балтийского моря можно применять для регионов других морей.
5. Возможна реализация различных моделей на основе теории графов, описывающих каждый из вариантов маршрутной сети, содержащих конкретное количество новых портов и узлов.
6. При помощи моделирования различных вариантов можно рассчитать кратчайшие маршруты между узлами системы (пассажирскими морскими портами). Предложена блок-схема для оценки эффективности того или иного варианта модернизации морской паромной сети с учетом конкретных условий функционирования региональной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry. 2021 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cruisemarketwatch.com/growth/> (дата обращения: 05.09.2021).
2. Brida J. G. Cruise Passengers in a Homeport: A Market Analysis / J. G. Brida, M. Pulina, E. Riaño, S. Z. Aguirre // *Tourism Geographies*. — 2013. — Vol. 15. — Is. 1. — Pp. 68–87. DOI: 10.1080/14616688.2012.675510.
3. Ćorluka G. Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective / G. Ćorluka, I. Peronja, D. Tubić // *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo*. — 2020. — Vol. 67. — Is. 3. — Pp. 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.
4. Castillo-Manzano J. I. What does cruise passengers' satisfaction depend on? Does size really matter? / J. I. Castillo-Manzano, L. López-Valpuesta // *International Journal of Hospitality Management*. — 2018. — Vol. 75. — Pp. 116–118. DOI: 10.1016/j.ijhm.2018.03.013.
5. Chen M. J. Itinerary planning: Modeling cruise lines' length of stay in ports / M. J. Chen, P. Nijkamp // *International Journal of Hospitality Management*. — 2018. — Vol. 73. — Pp. 55–63. DOI: 10.1016/j.ijhm.2018.02.005.
6. Gabe T. M. Likelihood of cruise ship passenger return to a visited port: The case of Bar Harbor, Maine / T. M. Gabe, C. P. Lynch, J. C. McConnon Jr // *Journal of Travel Research*. — 2006. — Vol. 44. — Is. 3. — Pp. 281–287. DOI: 10.1177/0047287505279107.
7. Yan S. Optimal scheduling models for ferry companies under alliances / S. Yan, C. H. Chen, H. Y. Chen, T. C. Lou // *Journal of Marine Science and Technology*. — 2007. — Vol. 15. — Is. 1. — Pp. 53–66. DOI: 10.51400/2709-6998.2033.
8. Майоров Н. Н. Применение логистической функции для оценки воздействия внешней среды на морские паромные, круизные линии и морские пассажирские терминалы / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 627–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-627-639.
9. Бродецкий Г. Л. Системный анализ в логистике. Выбор в условиях неопределенности / Г. Л. Бродецкий. — М.: Academia, 2010. — 336 с.

10. Прокушев Л. А. Дискретная математика. Основы теории графов и алгоритмизации задач / Л. А. Прокушев. — СПб.: ГУАП, 2000. — 81 с.
11. Шпилько С. П. Морские круизы: теория и практика / С. П. Шпилько, Н. В. Андропова, Р. В. Чударев. — М.: Советский спорт, 2012. — 147 с.
12. Jugović A. Organization of Maritime Passenger Ports / A. Jugović, V. Mezak, S. Lončar // Pomorski zbornik. — 2006. — Vol. 44. — Is. 1. — Pp. 93–104.
13. Maiorov N. Forecasting of the route network of ferry and cruise lines based on simulation and intelligent transport systems/ N. Maiorov, V. Fetisov, S. Krile, D. Miskovic // Transport Problems. — 2019. — Vol. 14. — Is. 2. — Pp. 111–121. DOI: 10.20858/tp.2019.14.2.10.
14. Patric S. Alternative solutions for terminal traffic / S. Patric, N. Marcus. — Göteborg, Sweden, 2006. — 83 p.
15. J-Circos [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://sourceforge.net/projects/jcircos/> (дата обращения: 05.09.2021).
16. Pallis A. A. Cruises and Cruise Ports: Structures and Strategies / A. A. Pallis, J. P. Rodrigue, T. E. Notteboom // Research in Transportation Business & Management. — 2014. — Vol. 13. — Pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.12.002.
17. Chládek P. On some aspects of graph theory for optimal transport among marine ports / P. Chládek, D. Smetanová, S. Krile // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. — 2018. — Vol. 101. — Pp. 37–45. DOI: 10.20858/sjsutst.2018.101.4.

REFERENCES

1. Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry. 2021. Web. 5 Sept. 2021 <<https://cruise-marketwatch.com/growth/>>.
2. Brida, Juan Gabriel, Manuela Pulina, Eugenia Riaño, and Sandra Zapata Aguirre. “Cruise passengers in a homeport: A market analysis.” *Tourism Geographies* 15.1 (2013): 68–87. DOI: 10.1080/14616688.2012.675510.
3. Čorluka, Goran, Ivan Peronja, and Dejan Tubić. “Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective.” *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo* 67.3 (2020): 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.
4. Castillo-Manzano, José I., and Lourdes López-Valpuesta. “What does cruise passengers’ satisfaction depend on? Does size really matter?” *International Journal of Hospitality Management* 75 (2018): 116–118. DOI: 10.1016/j.ijhm.2018.03.013.
5. Chen, Jamie M., and Peter Nijkamp. “Itinerary planning: Modelling cruise lines’ lengths of stay in ports.” *International Journal of Hospitality Management* 73 (2018): 55–63. DOI: 10.1016/j.ijhm.2018.02.005.
6. Gabe, Todd M., Colleen P. Lynch, and James C. McConnon Jr. “Likelihood of cruise ship passenger return to a visited port: The case of Bar Harbor, Maine.” *Journal of Travel Research* 44.3 (2006): 281–287. DOI: 10.1177/0047287505279107.
7. Yan, Shangyao, Chia-Hung Chen, Hsin-Yen Chen, and Tze-Chiang Lou. “Optimal scheduling models for ferry companies under alliances.” *Journal of Marine Science and Technology* 15.1 (2007): 53–66. DOI: 10.51400/2709-6998.2033.
8. Majorov, Nikolaj N., and Vladimir A. Fetisov. “Application of the logistic function to assess the impact of the environment on sea ferry, cruise lines and marine passenger terminals.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 627–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-627-639.
9. Brodetskii, G. L. *Sistemnyi analiz v logistike. Vybór v usloviyakh neopredelennosti*. M.: Academia, 2010.
10. Prokushev, L. A. *Diskretnaya matematika. Osnovy teorii grafov i algoritimizatsii zadach*. SPb.: GUAP, 2000.
11. Shpil’ko, S. P., N. V. Andronova, and R. V. Chudarev. *Morskie kruizy: teoriya i praktika*. M.: Sovetskii sport, 2012.
12. Jugović, Alen, Vlado Mezak, and Slavko Lončar. “Organization of maritime passenger ports.” *Pomorski zbornik* 44.1 (2006): 93–104.
13. Maiorov, Nikolai, Vladimir Fetisov, Srećko Krile, and Darijo Miskovic. “Forecasting of the route network of ferry and cruise lines based on simulation and intelligent transport systems.” *Transport Problems* 14.2 (2019): 111–121. DOI: 10.20858/tp.2019.14.2.10.
14. Patric, S., and N. Marcus. *Alternative solutions for terminal traffic*. Göteborg, Sweden, 2006.
15. J-Circos. Web. 5 Sept. 2021 <<https://sourceforge.net/projects/jcircos/>>.

16. Pallis, Athanasios A., Jean-Paul Rodrigue, and Theo E. Notteboom. "Cruises and cruise ports: Structures and strategies." *Research in transportation business & management* 13 (2014): 1–5. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.12.002.

17. Chládek, Petr, Dana Smetanová, and Srećko Krile. "On some aspects of graph theory for optimal transport among marine ports." *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport* 101 (2018): 37–45. DOI: 10.20858/sjsutst.2018.101.4.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Майоров Николай Николаевич —

доктор технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: nmsoft@yandex.ru

Фетисов Владимир Андреевич —

доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: Fetl@aanet.ru

Добровольская Ангелина Александровна —
ассистент

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: angd999@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maierov, Nikolai N. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: nmsoft@yandex.ru

Fetisov, Vladimir A. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
email: Fetl@aanet.ru

Dobrovolskaia, Angelina A. —
assistant

Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: angd999@gmail.com

Статья поступила в редакцию 7 октября 2021 г.

Received: October 7, 2021.

METHODOLOGICAL APPROACH TO FORECASTING THE FLEET DEVELOPMENT BY STUDY OF THE RUSSIAN FAR EAST

A. K. Voronenko

Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

The growth of trade and sea freight flows in the Asia-Pacific region determines the possibilities for Russia to effectively enter the new Asian markets of trade, sea transportation, shipping services, etc. These and other factors create the opportunities and needs in the development of shipping and shipbuilding in the Far East associated with maritime activities in general and related services. The retrospective forecasting methods of fleet development are analyzed in the paper. A methodological approach to forecasting the demand in fleet assets to carry the common types of cargo in present-day conditions is proposed. The estimation is based on forecasting the cargo base, segmentation of the shipping market, analysis of the state of the existing fleet with prospects for ship decommissioning, assessment of the state-owned fleet demand, service, auxiliary and other fleet assets. Special attention should be paid to the regional shipping specifics and the formation of demand for cargo tonnage. This approach can be used in the formation of strategies of different levels in the field of shipping, shipbuilding and transport development, as well as for planning process by shipping companies. To demonstrate the application of proposed methodology, the calculation of the need in fleet assets to transport crude oil to the countries of East Asia was made for the Far Eastern Basin, based on the forecast of the cargo base in the segment of crude oil transportation. The calculated data is preliminary; it requires further clarification of possible parameters deviation in accordance with the expectations for the development of cargo flows, the needs for the development of maritime activities in the basin, the possibilities of optimizing the types of vessels and their modes of operation.

Keywords: outlook, fleet development, forecast, sea fleet, fleet demand, fleet management, planning, transport infrastructure, shipping.

For citation:

Voronenko, Anna K. "Methodological approach to forecasting the fleet development by study of the Russian Far East." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 794–803. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-794-803.

УДК 656.073; 656.6

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ПРОГНОЗА РАЗВИТИЯ ФЛОТА НА ПРИМЕРЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО БАССЕЙНА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А. К. Вороненко

Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

В статье рассмотрен вопрос развития торговли и морских грузопотоков в Азиатско-Тихоокеанском регионе, определяющих возможности эффективного освоения Россией новых для нее азиатских рынков торговли, морской перевозки, обслуживания судоходства, формирующие на Дальнем Востоке вполне определенные перспективы развития судоходства и судостроения, связанные с морской деятельностью в целом и ее обслуживанием. Выполнен анализ ретроспективы методов прогнозирования потребностей во флоте. Предлагается методологический подход к формированию прогноза развития флота в современных условиях для перевозки наиболее массовых видов грузов. В основе расчета предлагается использование прогноза грузовой базы, сегментации рынка судоходства, анализа состояния существующего флота и прогноза его списания, оценки потребности флота для государственных

нужд, технического, вспомогательного и других типов судов. Особое внимание предлагается уделить региональным особенностям эксплуатации флота. Данный подход может быть использован при формировании стратегий разного уровня в области судоходства, судостроения и развития транспорта, а также при выполнении расчетов в процессе планирования деятельности судоходных компаний. На базе предлагаемой методики в качестве примера выполнен расчет потребности во флоте Дальневосточного бассейна для перевозки сырой нефти в страны Восточной Азии на базе прогноза грузовой базы в сегменте перевозок сырой нефти. Приведены предварительные расчетные данные, требующие уточнения возможных параметров в соответствии с прогнозируемыми ожиданиями развития грузопотоков, потребностями в развитии морской деятельности Дальневосточного бассейна, возможностями оптимизации типов судов и их эксплуатации.

Ключевые слова: прогноз, прогноз развития флота, морской флот, спрос на флот, управление флотом, планирование, транспортная инфраструктура, судоходство.

Для цитирования:

Вороненко А. К. Методический подход к построению прогноза развития флота на примере Дальневосточного бассейна Российской Федерации / А. К. Вороненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 794–803. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-794-803.

Введение(Introduction)

Научные труды в области управления флотом в постсоветский период представлены различными работами, которые можно структурировать по следующей тематике:

- управление судном, совершенствование и внедрение техники и технологий в этой области, включая вопросы безопасности и цифровизации;
- вопросы управления судоходной компанией;
- юридические аспекты фрахтования судов;
- экономика фрахтования;
- исследования фрахтового рынка;
- вопросы сегментирования судоходного рынка;
- вопросы прогнозирования грузовой базы морского транспорта;
- вопросы рыночных ниш судостроения.

Чаще всего вопросы, связанные с тематикой прогноза развития флота и факторами, оказывающими на него влияние, в том числе вопросы, касающиеся проводимой государственной политики, рассмотрены в исследованиях в области рынка судостроения и судоходства. Вопросы управления судоходной компанией, стратегирования процессов повышения эффективности использования флота, в том числе на примере управления флотом Дальневосточного бассейна, рассмотрены в работах [1]–[4]. Работы [5], [6] посвящены обоснованию принятия решений в области судостроения, где рассматриваются факторы формирования спроса на продукцию данной отрасли отдельных сегментов. В исследованиях, посвященных вопросам разработки алгоритма принятия оперативных решений судоходными компаниями, для оценки спроса и предложения использован трендовый подход [7]. Вопросы долгосрочного прогнозирования развития флота при этом не рассматриваются. Обзор мировых тенденций развития транспортного флота и судостроения выполнен в работах [8], [9], однако эти обзоры не содержат в полном объеме всесторонних исследований вопросов потребности в тоннаже. Региональные аспекты развития морского флота Дальневосточного бассейна и возможности развития коммерческого судостроения в регионе рассмотрены в публикациях [10], [11].

Для российских судоходных и судостроительных предприятий и государства в целом в современных постоянно меняющихся экономических условиях и достаточно острой конкурентной борьбе критически важно обеспечить устойчивое функционирование и развитие. Одним из способов решения этой задачи может быть минимизация рисков инвестиционных проектов за счет грамотного планирования функциональной деятельности компаний, что невозможно без долгосрочных прогнозов развития флота. Важность долгосрочного планирования отмечается в государственных

стратегических документах, ориентированных на поддержку развития судостроения и судоходства. Таким образом, существует потребность в совершенствовании способов и методов долгосрочного прогнозирования в сфере транспорта, включая прогнозирование спроса на флот.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Используемые подходы к определению потребности во флоте. В период планового ведения хозяйственной деятельности предприятия и организации страны, имеющие отношение к работе флота, занимались планированием его пополнения. В качестве примера рассмотрен подход к оценке потребности во флоте (автор В. И. Холоша), который был использован в ряде аналитических работ и материалов (рис. 1).

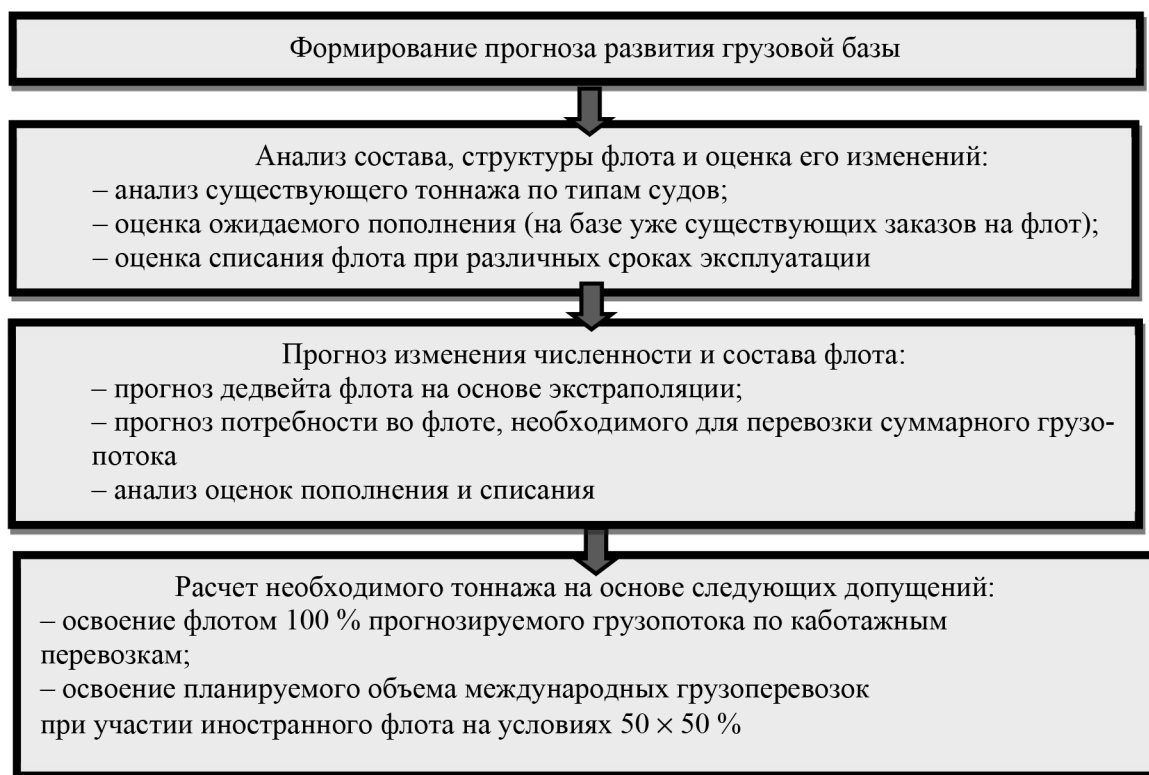


Рис. 1. Схема оценки потребности во флоте при подходе, используемом в 1970–1990 гг.

Представленный подход заключался в следующем: на базе прогноза грузовых перевозок торговым флотом с разбивкой по номенклатурным позициям и прогноза списания тоннажа в разных вариантах производится оценка пополнения тоннажа с детализацией по типу флота в зависимости от перевозимого груза. При расчетах в данном случае учитывался в основном флот пароконств, осуществляющих грузовые и грузопассажирские перевозки в Дальневосточном бассейне как основных участников транспортного процесса. Прочий флот оценивался экспертным путем. Пример прогноза пополнения флота Дальневосточного бассейна для перевозки навалочных грузов, включая зерно, приведен на рис. 2 с учетом имеющихся данных о перевозках между иностранными портами.

Данный подход использовался в условиях плановой экономики, когда можно было зафиксировать объем перевозок, направление и четко структурировать флот, выполняющий этот объем перевозок. С переходом к рыночной экономике условия эксплуатации флота изменились значительным образом, и применение такого подхода является целесообразным только при прогнозировании отдельных сегментов (например, в случае государственного заказа на перевозки). Кроме того, в некоторых сегментах судоходства и судостроения невозможно сделать прогноз с использованием трендовых подходов, таких, например, как флот для выполнения исследований и работ по обустройству шельфа или рыболовный флот.

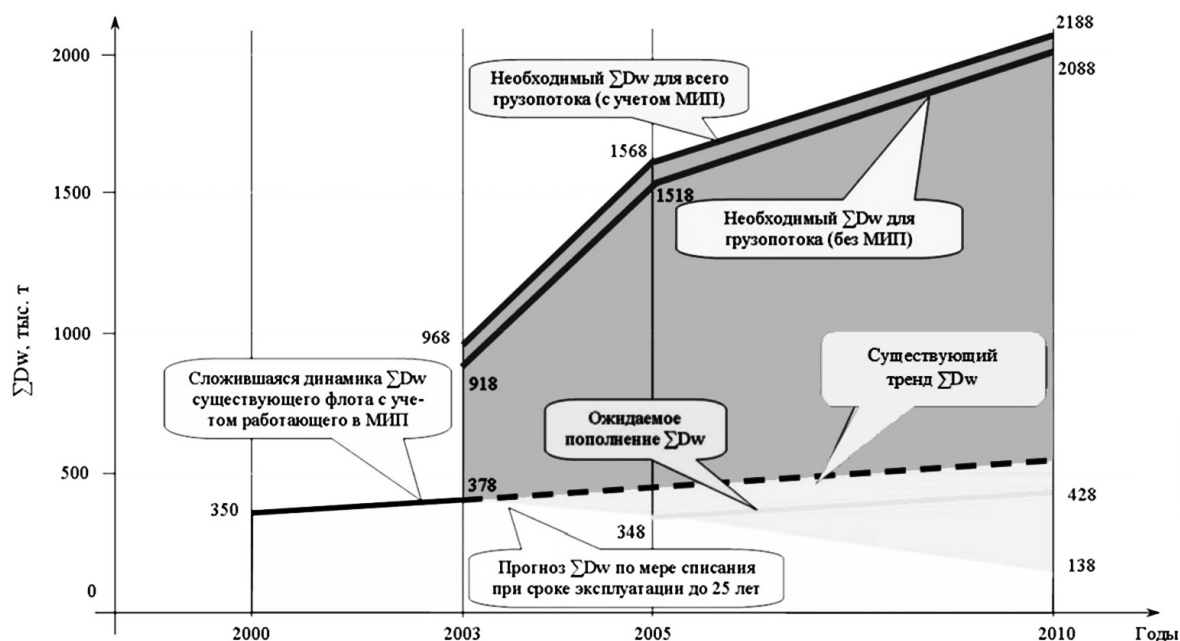


Рис. 2. Прогноз соотношения необходимого и существующего тоннажа (ΣDw) навалочного флота Дальневосточного бассейна на 2010 г.

Предлагаемые подходы к определению потребности во флоте. Современное состояние рынка формирует новые требования к прогнозированию грузоперевозок и потребности во флоте, при этом необходимость планирования изменения потребностей в тоннаже возникает у всех участников процесса. При формировании прогноза развития флота необходимо учитывать следующие факторы:

- текущее состояние мирового судоходства и судостроения;
- экономические, политические и социальные интересы России в регионе;
- прогнозы развития российской экономики;
- прогнозы развития мировой экономики и судоходства;
- конкуренцию в мировом судостроении и судоходстве и т. д.

В зависимости от целей и задач прогнозирования может быть выделен целевой сегмент или выполнен прогноз по региону в целом. Для решения стратегических задач целесообразно использовать несколько подходов с учетом различий тенденций в каждом отдельном секторе (сегменте) судоходства и судостроения.

Основу методологического подхода по определению потребностей в транспортном флоте составляют:

- прогноз грузовой базы российских портов, в том числе отгрузки непосредственно с российского шельфа, включая грузообороты портов, укрупненную номенклатуру грузов, направления перевозок, партионность и т. п.;
- прогноз пассажирских перевозок в данном бассейне, в том числе местные, межрегиональные и международные, включая туристические;
- анализ состояния существующего российского флота на Дальнем Востоке и прогноз его списания;
- оценка потребности флота для государственных нужд, технического, вспомогательного и других видов флота.

Основные виды подходов, предлагаемых для использования при формировании долгосрочного прогноза развития флота:

- *трендовый подход* — предполагает исследование ретроспективы показателей, характеризующих судостроение, и экстраполяцию их в будущее;

— *подход на основе баланса спроса и предложения* — основан на сравнении объема заключенных в течение года контрактов с объемом фактического прироста флота, который, в свою очередь, определяется как разность двух величин: объема сдачи новых судов и объема списания старых судов в течение того же периода времени;

— *подход к определению потребности флота на основе прогноза грузовой базы* — основан на оценке емкости рынка морских перевозок.

Для расчета в сегменте судов технического, вспомогательного и рыболовного флота, а также потребности в судах для работы на шельфе предлагается использовать существующие подходы и методики. Например, для оценки потребности во вспомогательном и техническом флоте предлагается использовать подход, основанный на зависимости между тоннажом данных сегментов флота и тоннажом транспортного флота, который, в свою очередь, определяется объемом грузовой базы. Укрупненно схема методики определения потребности во флоте приведена на рис. 3.

Исследуем вопрос определения потребности флота на основе прогноза грузовой базы по другим сегментам с применением иных методологических подходов. Для определения потребности в составе (количестве и тоннаже) транспортного флота предлагается методика, основанная на оценке емкости рынка морских перевозок. Алгоритм действий в рамках данной методики заключается в следующем.

1. Выполняется прогноз грузовой базы, целью которого является определение основных маршрутов грузоперевозок и оценка объемов грузопотоков на этих маршрутах по установленной номенклатуре грузов.

2. Для каждого груза и маршрута определяется объем транспортной работы A , тонно-мили:

$$A = QL, \quad (1)$$

где Q — годовой объем грузопотока на данном направлении, т;

L — расстояние перевозки (длина линии), морские мили.

В случае, если маршрутов перевозки достаточно много, то для каждого груза их группируют по наиболее типичным маршрутам, при этом для каждой группы (каждого типичного маршрута) определяют суммарное значение объемов грузоперевозки $Q_{гр}$ и средневзвешенную длину линии $L_{ср}$:

$$Q_{гр} = \sum_{i=1}^n Q_i; \quad (2)$$

$$L_{ср} = \sum_{i=1}^n (L_i \frac{Q_i}{Q_{гр}}), \quad (3)$$

где Q_i — годовой объем грузопотока на i -м маршруте внутри группы;

L_i — расстояние перевозки i -го маршрута внутри группы;

n — количество маршрутов в группе.

При этом объем транспортной работы для каждой группы определяется следующим образом:

$$A = Q_{гр} L_{ср}. \quad (4)$$

3. Допускается определение величины $L_{ср}$ на основе накопленного опыта работы судоходной компании для перевозки данного груза на данном маршруте (группы маршрутов), в том числе исходя из существующей практики перевозок, возможностей и перспектив портов по обслуживанию судов и т. д.

4. Определяется теоретический транспортный потенциал F_T выбранного судна:

$$F_T = PV \cdot 24 \cdot 365 \text{ тонно-мили}, \quad (5)$$

где P — грузоподъемность выбранного судна, т;

V — скорость выбранного судна, уз или морские мили/ч;

$24 \cdot 365$ — продолжительность года, ч.

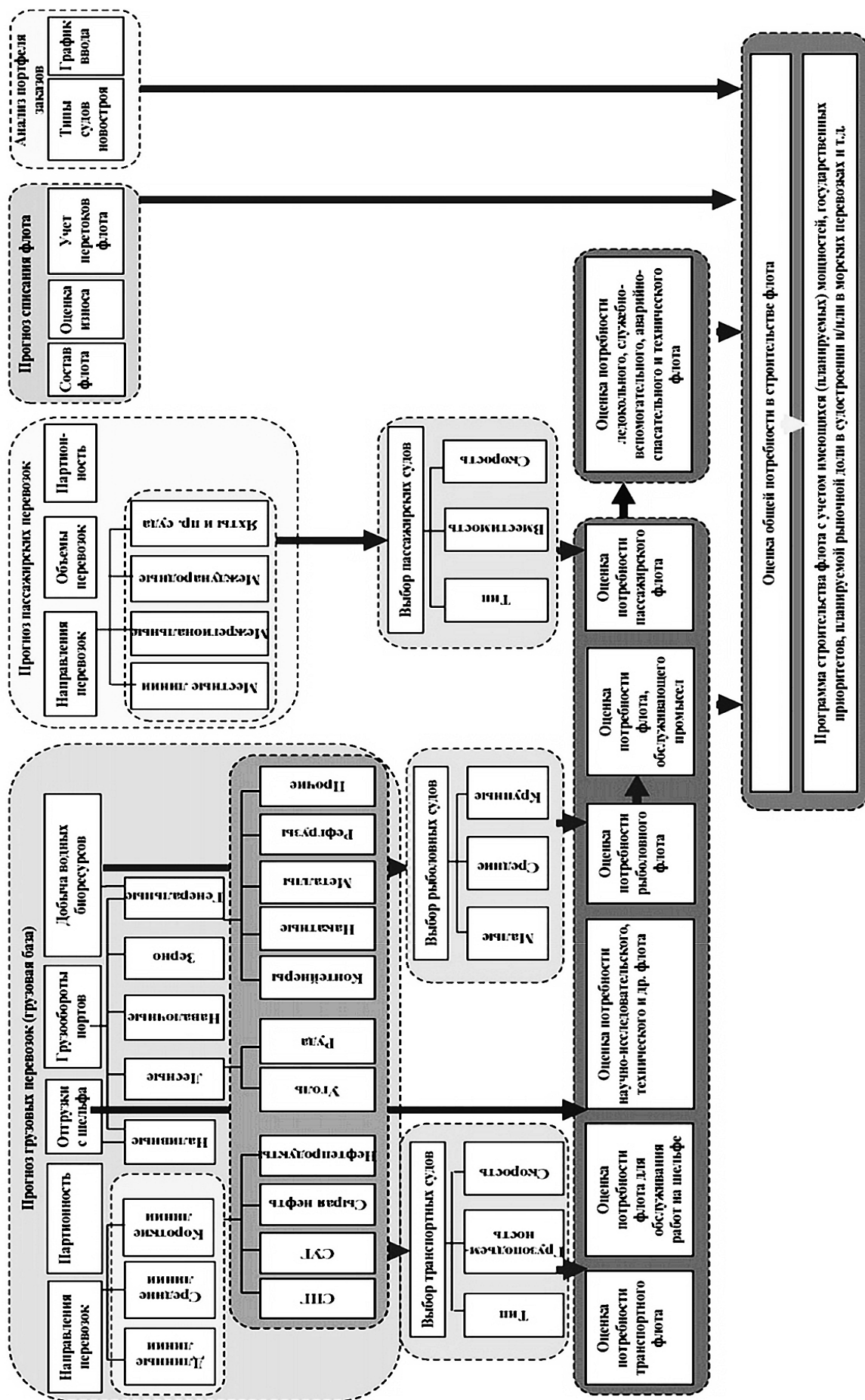


Рис. 3. Укрупненная схема методики определения потребности флота в различных сегментах

Фактический транспортный потенциал рассматриваемого судна F_ϕ определяется в виде

$$F_\phi = \eta_{\text{ПС}} F_T, \quad (6)$$

где $\eta_{\text{ПС}}$ — безразмерный коэффициент использования провозной способности судна, зависящий от потери рабочего времени, реализации скорости судна, реализации грузовместимости и т. д. (принимает значения в интервале от нуля до единицы).

Примечание. Данный коэффициент для каждого типа судов назначается эмпирически, при этом принимается во внимание статистика эксплуатационных показателей работы флота судоходных компаний Дальневосточного бассейна на различных линиях, возможность загрузки судна и т. д.

Необходимое количество судов m для обеспечения прогнозируемого объема перевозок для каждого груза на маршруте (группы маршрутов) определяется в следующем виде:

$$m = \frac{A}{F_\phi}, \quad (7)$$

с округлением до целого в большую сторону.

Результаты (Results)

В качестве примера использования описанной ранее методики приведен пример формирования прогноза потребности в транспортном флоте для перевозки сырой нефти на Дальнем Востоке, включая добытую на шельфе нефти. В качестве исходных данных были использованы следующие прогнозные данные по российскому Дальнему Востоку: перевозки нефти к 2035 г. составят около ~86 млн т в год (прирост к 2020 г. плюс 32 млн т в год). Данный прогноз основан на следующих перспективных тенденциях, оценках и допущениях:

1. Крупные нефтегазовые месторождения Сибири и Дальнего Востока России географически расположены значительно ближе к основным дальневосточным центрам потребления, чем у наших ближневосточных конкурентов. Ресурсная база Японии, Южной Кореи и Сингапура по основным энергоносителям почти полностью отсутствует, Китая и Вьетнама достаточно ограничена, несмотря на большие потребности этих стран. До 1/3 прироста мирового спроса на нефть приходится на Китай. Быстро увеличивается спрос на нефть в Индии и динамично развивающихся странах Юго-Восточной Азии. Дальнейший рост зависимости от импорта энергоносителей стран АТР требует диверсификации поставщиков, при этом основной расчет сделан на Россию. Отсюда расширение масштабов энергетического диалога России со странами АТР. Поэтапная реализация всех проектов развития нефтедобычи и инфраструктуры транспорта в России позволит обеспечить стабильный рост поставок нефти на мировой рынок. При этом экспорт сырой нефти в страны АТР по всем маршрутам может быть доведен к 2030 г. до 130 млн т (потенциальная грузовая база).

2. Через порты Дальнего Востока величина грузопотока экспортных нефтеналивных грузов прогнозируется к 2035 г. на уровне 86 млн т, в том числе сырая нефть из районов Западной и Восточной Сибири в общем объеме 50 млн т (ВСТО-2, отгрузка в Приморском крае), с шельфа Сахалина — 28–30 млн т.

3. Ожидается, что освоение новых месторождений в краткосрочной перспективе позволит стабилизировать добычу и экспорт нефти по проекту «Сахалин-1», снижающуюся в последние годы. В долгосрочной перспективе, вследствие разработки месторождений проекта «Сахалин-3» и других проектов, на рынке ожидается появление новых объемов сырой нефти и газового конденсата до 10 млн т в год к имеющимся. В долгосрочной перспективе возможен как рост, так и сохранение текущих объемов в зависимости от дальнейшей разработки дальневосточных шельфовых проектов.

4. В настоящее время нефть, добытая по проекту «Сахалин-1», транспортируется по собственной трубопроводной системе в порт Де-Кастри, где отгружается на экспорт. Предполагается сохранение ее текущих объемов добычи. По проекту «Сахалин-2» перевалка через порт Пригородное сохранится в прежнем объеме. Дополнительные объемы нефти и газового конденсата могут

быть отгружены через новый портовый комплекс (например, в Поронайском районе или в районе пос. Ильинский), поскольку текущие мощности в портах Пригородное и Де-Кастри относятся к проектам «Сахалин-1» и «Сахалин-2». Перевалка грузов других собственников может вызвать конфликт интересов.

5. По Примагаданскому шельфу и Камчатке в настоящее время нет достаточной определенности в решении вопроса о том, каким образом предполагается использовать прогнозируемые к добыче нефть и газ, сейчас там ведутся геологоразведочные работы. Прогнозируемая добыча составляет около 2 млн т нефти, что может обеспечить экспорт в перспективе до 2035 г. при условии доразведки существующих проектов.

В ходе исследования грузовой базы массовых грузов, включая изучение действующих и строящихся портовых мощностей, были выделены основные направления и маршруты внешнеторговых перевозок и экспертно подобраны подходящие для этого суда. Результаты сведены табл. 1.

Таблица 1

**Основные направления внешнеторговых перевозок грузов через российские порты
Дальнего Востока, длины линий и расчетные характеристики выбранных судов**

Номенклатура	Направления (точки начала и окончания морской перевозки)	Длина линии, морские мили	Тип судна	Скорость, уз	Коэффициент использования провозной способности судна
Нефть	Приморье		Танкер для перевозки нефти Suezmax дедвейтом 162 тыс. т	14,6	0,38
	КНР	~1300			
	Р. Корея	~700			
	Япония	~850			
	Тайвань	~1400			
	Тайланд	~3000			
	США	~4800			
	Приамурье		Танкер для перевозки нефти Suezmax дедвейтом 162 тыс. т	14,6	0,38
	КНР	~2000			
	Р. Корея	~1200			
	Япония	~1000			
	Тайвань	~1950			
	Тайланд	~3050			
	Сахалин		Танкер для перевозки нефти Suezmax дедвейтом 162 тыс. т	14,6	0,38
	КНР	~2000			
	Р. Корея	~1200			
	Япония	~1000			
	Тайвань	~1950			
	Шельф Охотского моря		Танкер для перевозки нефти Aframax дедвейтом 105 тыс. т, возможно с ледовым усилением в зависимости от схемы перевозки	15,5	0,23
	КНР	~3500			
	Япония	~1850			
	Р. Корея	~1800			

Результаты оценки потребностей в морском флоте Дальневосточного бассейна РФ для обеспечения 100 % прогнозных объемов внешнеторговых перевозок сырой нефти в соответствии с предложенной методикой приведены в табл. 2.

Таблица 2

Суммарная оценка потребности России в транспортном флоте Дальневосточного бассейна для обеспечения морских перевозок российской нефти в страны Восточной Азии

Направление, тип судна	Количество судов, 2035 г., ед.	Дедвейт суммарный, 2035 г., млн т
Танкеры, <i>всего</i>	19	2,88
Танкер для перевозки нефти Suezmax дедвейтом 162 тыс. т	17	2,67
Танкер для перевозки нефти Aframax дедвейтом 105 тыс. т	2	0,21

Заключение (Conclusion)

Предложен подход к определению потребности в судах различных типов и назначений, включающий следующую методологию определения потребности флота на основе прогноза грузовой базы. Для оценки и расчета использованы следующие методы:

- метод, основанный на сопоставлении прогнозных объемов транспортной работы с транспортным потенциалом судов;
- метод зависимостей;
- метод экспертных оценок;
- комбинации ранее указанных методов.

В результате была выполнена оценка потребности в транспортных судах для перевозки сырой нефти (танкерах) для российского Дальневосточного бассейна.

Благодарности (Acknowledgements)

Автор выражает благодарность АО «ДНИИМФ», лично В. И. Холоше и М. В. Холоше за предоставленные архивные документы и сведения по статистике и прогнозированию флота Дальневосточного бассейна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луговец А. А. Организационно-управленческие аспекты механизма реализации выбранной стратегии судоходной компании / А. А. Луговец // Транспортное дело России. — 2004. — № 5. — С. 3–4.
2. Луговец А. А. Повышение эффективности использования отечественного морского транспортного флота / А. А. Луговец // Транспортное дело России. — 2006. — № 57. — С. 10–14.
3. Луговец А. А. Основные принципы формирования тарифов на морские линейные перевозки контейнеров / А. А. Луговец, В. Е. Степанец, С. В. Пестерев // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2016. — № 6. — С. 10–16.
4. Исаев А. А. Обеспечение конкурентоспособности морских перевозок: теоретический и методологический аспекты / А. А. Исаев, Л. А. Исаева, А. А. Луговец // Морские интеллектуальные технологии. — 2017. — № 4–3 (38). — С. 139–143.
5. Мичурина О. Ю. Формирование спроса на продукцию интегрированных структур в судостроении / О. Ю. Мичурина // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. — 2016. — № 4. — С. 34–45.
6. Мичурина О. Ю. Методы экономического обоснования управленческих решений по формированию промышленных сетей в судостроении / О. Ю. Мичурина. — М.: ИНФРА-М, 2011. — 155 с.

7. Тимченко Т. Н. Методические основы принятия оперативных решений судоходными компаниями морской корпорации по управлению работой флота / Т. Н. Тимченко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С 181–186.

8. Пересыпкин В. И. Состояние и перспективы развития транспортного флота России/ В. И. Пересыпкин, С. И. Буянов // Транспорт Российской Федерации. — 2005. — № 1 (1). — С. 18–21.

9. Пересыпкин В. И. Состояние и перспективы развития транспортного флота России на фоне мирового судостроения / В. И. Пересыпкин, С. И. Буянов, А. А. Романенко // Судостроение. — 2011. — № 2 (795). — С. 9–15.

10. Новосельцев Е. М. Региональные аспекты развития морского флота на Дальневосточном бассейне / Е. М. Новосельцев, М. В. Холоша // Вестник транспорта. — 2011. — № 10. — С. 11–15.

11. Новосельцев Е. М. О перспективах коммерческого судостроения на Дальнем Востоке России / Е. М. Новосельцев, М. В. Холоша // Судостроение. — 2009. — № 5 (786). — С. 44–47.

REFERENCES

1. Lugovets, A. A. “Organizatsionno-upravlencheskie aspekty mekhanizma realizatsii vybrannoi strategii sudokhodnoi kompanii.” *Transport business of Russia* 5 (2004): 3–4.

2. Lugovets, A. A. “Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya otechestvennogo morskogo transportnogo flota.” *Transport business of Russia* 7 (2006): 10–14.

3. Lugovets, A. A., V. E. Stepanets, S. V. Pesterev. “Basic principles of tariff formation for sea linear transportation of containers.” *Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection)* 6 (2016): 10–16.

4. Isaev, Alexander A., Lyudmila A. Isaeva, and Alexander A. Lugovets. “Ensuring the competitiveness of sea shipping: theoretical and methodological aspects.” *Marine Intellectual Technologies* 4–3(38) (2017): 139–143.

5. Michurina, Olga Yurievna. “Formation of demand for the products of integrated structures in shipbuilding.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics* 4(2016): 34–45.

6. Michurina, O. Yu. *Metody ekonomicheskogo obosnovaniya upravlencheskikh reshenii po formirovaniyu promyshlennykh setei v sudostroenii*. M.: INFRA-M, 2011.

7. Timchenko, T. N. “Methodological basis of operating solutions of shipping companies of marine corporation for fleet control.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 181–186.

8. Peresyypkin, V. I., and S. I. Buyanov. “Sostoyanie i perspektivy razvitiya transportnogo flota Rossii.” *Transport of Russian Federation* 1(1) (2005): 18–21.

9. Peresyypkin, V. I., S. I. Buyanov, and A. A. Romanenko. “The state and outlooks for development of Russian cargo fleet against the world’s shipbuilding background.” *Shipbuilding* 2 (795) (2011): 9–15.

10. Novosel'tsev, E. M., and M. V. Kholosha. “Regional'nye aspekty razvitiya morskogo flota na Dal'nevostochnom basseine.” *Vestnik transporta* 10 (2011): 11–15.

11. Novoseltsev, E. M., and M. V. Kholosha. “The prospects of collaboration in commercial shipbuilding in the Far East region of Russia.” *Shipbuilding* 5(786) (2009): 44–47.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Вороненко Анна Константиновна — аналитик
Морской государственной университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50А
e-mail: Voronenko@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Voronenko, Anna K. — Analyst
Maritime State University named
after Admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: Voronenko@msun.ru

Статья поступила в редакцию 22 октября 2021 г.

Received: October 22, 2021.

SPLINE ALTERNATIVE TO THE MULTIPLICITY OF USING REFERENCE ELLIPSOIDS IN NAVIGATION

I. V. Yuyukin

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

The reality of the navigator's daily work with typographically published nautical charts focused on numerous reference ellipsoids is taken into account in the paper. The obligatory condition for the transformation of coordinates obtained using the data of the global satellite navigation system based on the Earth-wide coordinate system into the coordinates of the reference ellipsoid of the marine navigation chart is accentuated. Attention is drawn to the probability of a precedent of making a calculation error by a navigator with a standard recalculation of coordinates. Specific examples of discrepancies in the geographical coordinates of the same point on the Earth's surface attributed to different geodetic systems are given. The facts of the multiplicity of reference ellipsoids reserved in the memory of electronic devices for satellite positioning of the vessel are emphasized. The review of the coherence problems of geodetic coordinate systems for the correction of fixing position is carried out. The hypothesis of a cardinal solution to the problem of positioning a vessel on an electronic or paper chart when reorienting navigation to a spline geoid model with the condition of repurposing cartography on a new mathematical basis is put forward. The assumption about the real possibility of freeing the watch officer from the routine procedures of mathematical transformation of coordinates for various geodetic systems when using the spline model of the geoid as a single cartographic basis is made. As a proof of the efficiency of the proposed approach, a spline synthesis of a fragment of a three-dimensional perspective of the geoid isosurface of the Indian Ocean with local identification of the phenomenon of anomalous gravity loss is implemented. In parallel, the computing service of the Helmholtz Potsdam Research Center for Global Earth Models was used to chart the gravitational anomaly of the Indian Ocean and computer reconstruction of the pear-shaped geoid in 3D format. A comparative analysis is performed and the disadvantages of the traditional algorithm for approximating an equipotential surface based on the spherical harmonics method are revealed. It is argued for the multiple use of the developed approach in the long term when approximating a planetary equipotential shape with pulsating dynamics. A prediction for the principal possibility of achieving absolute navigation accuracy in the case of using a single spline geoid model in modern navigation is given.

Keywords: reference ellipsoids, spherical harmonics, coordinates transforming, earth — wide coordinate system, spline model of a geoid.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Spline alternative to the multiplicity of using reference ellipsoids in navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 804–818. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-804-818.

УДК 656.61.052 656

СПЛАЙНОВАЯ АЛЬТЕРНАТИВА МНОЖЕСТВЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕФЕРЕНЦ-ЭЛЛИПСОИДОВ В СУДОВОЖДЕНИИ

И. В. Ююкин

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

В работе учитывается реальность повседневной работы штурмана с изданными типографским способом морскими картами, ориентированными на многочисленные референц-эллипсоиды. Акцентируется обязательное условие преобразования координат, полученных при использовании данных глобальной спутниковой навигационной системы на основе общеземной системы координат, в координаты референц-эллипсоида морской навигационной карты. Обращается внимание на вероятность прецедента совершения расчетной ошибки судоводителем при стандартном пересчете координат. Приводятся конкретные примеры несовпадений в географических координатах одной и той же точки на земной поверхности, отнесенной

к различным геодезическим системам. Подчеркиваются факты множественности референц-эллипсоидов, зарезервированных в памяти электронных устройств спутникового позиционирования судна. Выполнен обзор проблематики согласования систем геодезических координат для коррекции обсервации. Выдвинута гипотеза кардинального решения проблемы позиционирования судна на электронной или бумажной карте при переориентировании навигации на сплайновую модель геоида с условием перепрофилирования картографии на новую математическую основу. Сделано предположение о реальной возможности освобождения вахтенного помощника от рутинных процедур математической трансформации координат для различных геодезических систем при использовании сплайновой модели геоида как единой картографической основы. В качестве доказательства работоспособности предлагаемого подхода реализуется сплайновое синтезирование фрагмента трехмерной перспективы геоидной изоповерхности Индийского океана с локальной идентификацией феномена аномальной потери гравитации. Параллельно использован сервис вычислений сайта Потсдамского научно-исследовательского центра глобальных моделей Земли имени Гельмгольца для картографирования гравитационной аномалии Индийского океана и компьютерной реконструкции грушевидной формы геоида в 3D-формате. Выполнен сравнительный анализ и выявлены недостатки традиционного алгоритма аппроксимации эквипотенциальной поверхности на базе метода сферических гармоник. Аргументируется многократное использование разработанного подхода в долгосрочной перспективе при аппроксимации планетарной эквипотенциальной формы с пульсирующей динамикой. Дан прогноз принципиальной возможности достижения абсолютной точности навигации в случае применения в современном судовождении единственной сплайновой модели геоида.

Ключевые слова: референц-эллипсоиды, сферические гармоники, преобразование координат, обще-земная система координат, сплайновая модель геоида.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Сплайновая альтернатива множественности использования референц-эллипсоидов в судовождении / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 804–818. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-804-818.

Введение (Introduction)

Для рядового морского потребителя представляют интерес не технические точностные характеристики спутниковой системы, а реальная геометрия взаимного расположения обсервации и навигационных опасностей по маршруту следования судна для гарантированной безопасности прохождения препятствий в соответствии с концепцией *хорошей морской практики*. Существуют закономерные причины, по которым место судна, отображаемое на электронной карте или обозначенное на традиционной карте обсервация, не соответствует фактическому местоположению. Наиболее вероятной причиной несовпадения позиции условного точечного обозначения судна на дисплее электронно-картографической навигационно-информационной системы (ЭКНИС) с фактическими координатами местоположения является расхождение геодезической основы электронной карты и глобальной спутниковой навигационной системы. Указанная проблема, как правило, сравнительно просто устраняется приведением ЭКНИС и глобальной спутниковой навигационной системы к одной общеземной системе координат WGS-84. Ввиду того, что электронная карта отображается в системе WGS-84, а бумажная карта может быть изготовлена в другой геодезической системе различных вариантов исполнения широта и долгота одной и той же точки на бумажной и электронной картах могут существенно отличаться.

ЭКНИС функционирует при использовании в качестве Всемирной геодезической референцной системы WGS-84. Изданные типографским способом карты, ориентированные на различные референц-эллипсоиды, используются до сих пор в случае невыполнения любого из обязательных условий концепции «безбумажной навигации». Вследствие этого вахтенный помощник обязан при нанесении спутниковой обсервации на традиционную морскую карту выполнять преобразования координат за счет учета поправок к географической широте и долготы для перехода от системы WGS-84 к системе координат бумажной карты. Преобразование координат, полученных при использовании данных спутниковой системы на основе общеземной системы координат, в координаты референц-эллипсоида морской навигационной карты является обязательным условием обеспечения практической высокоточной навигации.

В современной практике судовождения остается актуальной задача преобразования координат из одной геодезической системы в другую, поскольку сохраняется множественность применяемых референц-эллипсоидов. С математической точки зрения данная задача является трансформированием одной пространственной системы координат в другую, при котором положение произвольной точки референцной поверхности может быть выражено как в геодезических, так и в связанных с ними известными соотношениями прямоугольных пространственных координатах [1], [2]. При несении вахты судоводитель должен постоянно акцентировать внимание на вводе поправок в географические координаты. Как правило, в предупреждении под заголовком карты указываются поправки для перехода от системы координат WGS-84 к системе координат бумажной карты, что позволяет обозначить точную спутниковую обсервацию традиционным способом. При этом вахтенный помощник обязан удостовериться в использовании эллипсоида WGS-84 в опциях настройки приемника GPS. При спутниковом определении места судна мореплавателю следует вводить поправки в координаты на основе информации легенды бумажной карты в случае выявленного несовпадения геодезических систем. Множественность систем координат определяется разными параметрами и ориентировкой различных эллипсоидов бумажных карт. Шаблонный пересчет координат создает вероятность прецедента расчетной ошибки. При ручной корректуре электронных карт по извещениям мореплавателей переход от эллипсоида бумажной карты к мировому эллипсоиду системы WGS-84 реализуется вводом поправок с обратным знаком к географической широте и долготе в соответствии с информацией легенды бумажной карты [3]. Неправильный учет поправок может спровоцировать ошибку судоводителя с возможными серьезными последствиями.

Эффект искусственной потери точности в судовых условиях нивелируется, если изменить настройку приемника спутниковой системы на указанный в легенде карты эллипсоид или внимательно вводить поправки на основе данных легенды бумажной карты. Переход к геодезической системе карты путем активации необходимого референц-эллипсоида в судовом приемнике является максимально логичным с точки зрения технологии ведения навигационной прокладки на бумажной карте. В указанном случае на дисплее приемника будут отображаться обсервованные координаты судна в геодезической системе, параметры которой вручную активированы самим судоводителем.

В ситуации невозможности программирования судоводителем бортового приемника спутниковых сигналов на определенную геодезическую систему существует режим исправления координат на основе постоянного ввода поправок из легенды карты как сдвига координат (offset) к системе WGS-84. При этом, фактически, реализуется автоматический переход к референц-эллипсоиду карты, так как на дисплее спутникового приемника отображается индикация географических координат, которые вахтенный помощник может непосредственно наносить на типографскую карту без каких-либо математических трансформаций. Во время работы в режиме исправления координат судоводителю необходимо рекомендовать каждый раз при переходе с карты на карту, в зависимости от масштаба карт и их геодезических систем, своевременно вводить новые поправки. Кроме того, судоводитель должен постоянно иметь в виду, что введенные поправки могут обнуляться при случайном отключении прибора или неосторожной активации опции очистки памяти приемника. В любом случае штурману необходимо соблюдать особую пунктуальность в момент преобразования координат при плавании в архипелажных водах и подходе к отдельным удаленным от материков островам во избежание навигационной аварии по причине остаточной неопределенности в координатах навигационных ориентиров из-за высокого уровня систематических и случайных ошибок координат удаленных геодезических пунктов.

В качестве доказательства понимания серьезности проблемы согласования координат Международной гидрографической организацией в 1983 г. было принято решение, в соответствии с которым при работе с картами масштаба крупнее 1:500000 морские издательские ведомства обязаны идентифицировать название системы координат бумажной карты, а судоводитель должен учитывать поправки, указанные под заголовком карты, для перехода от системы WGS-84 к геодезической основе данной карты [4]. При игнорировании подзаголовочной информации карты данные поправки могут

быть вычислены по упрощенным формулам акад. М. С. Молоденского. В табл. 2.24 Мореходных таблиц (МТ-2000) приведены расчеты параметров для перехода от системы WGS-84 в систему координат карты для восьмидесяти семи различных эллипсоидов [4].

Вычисление поправок и сравнение их с напечатанными на морской навигационной карте служит гарантированным способом исключения ошибок. Положительно себя зарекомендовал конвертер координат интернет-ресурсов Международной ассоциации геодезии. Для получения преобразованных координат в любой геодезической системе достаточно посетить специальный официальный сайт, выбрать необходимую опцию, задать координаты в исходной геодезической системе и идентифицировать геодезическую систему искомым координат.

Согласно рекомендациям по организации штурманской службы, расхождение координат, из-за использования различных эллипсоидов в различных географических районах Мирового океана, составляет диапазон 0,1–0,4 морские мили [5]. Различия в географических координатах одной и той же точки на земной поверхности, отнесенных к различным геодезическим системам, по мнению проф., лауреата Гос. премии СССР А. В. Каврайского, могут достигать до 700 м [6], что гарантированно превышает среднестатистическую ширину типичного фарватера, а, следовательно, учет этого обстоятельства, безусловно, является важным при плавании судна в стесненных навигационных условиях. Возможное расхождение по координатам в 700 м имеет серьезное практическое значение при плавании в узкостях. Существует другое мнение, согласно которому в результате различий систем координат электронной и бумажной карты ошибка, из-за пренебрежения ввода поправок, может составить на местности 350–400 м и более [3]. В любом случае показатель несоответствия в метрической системе фактического обсервованного места судна с координатами, нанесенными на бумажную карту, существенно занижает перспективу технических характеристик высокой точности стандартного спутникового определения координат до 10 м. Дифференциальный метод электронного местоопределения морских транспортных средств, обеспечивающий точность до 3–10 м [7], также не спасает ситуацию от потери действительной точности судовождения. Для того чтобы полностью исключить феномен несоответствия геодезических основ, судоводителю необходимо каждый раз согласовывать систему координат бумажной и электронной карты с системой координат радиотехнического средства определения места судна.

В утилите Datum Transformation системы ECDIS Navi-Sailor 4000 сконцентрировано 183 различных варианта геодезических систем с возможностью выбора судоводителем любого из зарезервированных эллипсоидов для расчета поправок перехода к системе WGS-84. Множественность существующих картографических основ препятствует правильности выбора вахтенного помощника из 183 различных вариантов геодезических систем, усложняя в то же время его обязанность проверки идентичности активированного в спутниковом приемоиндикаторе эллипсоида с геодезической основой бумажной карты. В памяти приемоиндикатора модели GP-37/GP-32 фирмы Furuno содержатся параметры 173 различных картографических систем [8]. В спутниковом приемоиндикаторе модели GP-500 фирмы Furuno многообразие эллипсоидов из 170 вариантов зарезервировано в оперативной памяти устройства [5]. В указанных ранее японских приемоиндикаторах существует возможность выбора судоводителем любой геодезической основы элементарным вводом трехзначного кода, соответствующего номеру определенного референц-эллипсоида из предлагаемого в меню общего списка различных геодезических систем. В табл. 2.23 МТ-2000 приведены параметры двадцати одного референц-эллипсоида, наиболее часто применяемых для построения морских карт [4].

Для обеспечения практических арифметических расчетов преобразования систем координат в судовых условиях и понимания важности проблемы Департаментом морского транспорта РФ в 1993 г. было издано «Информационное письмо Главморинспекции» № ГМИ- 01/14–211 с последующей его всеерной рассылкой по всем пароходствам, частным судоходным компаниям, зарегистрированным под российским флагом, и морским учебным заведениям. Данное письмо было разослано на все суда Министерства транспорта РФ и входило в перечень обязательных штурманских документов. В этом документе перечислены наиболее используемые модели

эллипсоидов, приведены поправки и коэффициенты для согласования географических координат, а также обращается внимание на важность учета поправок преобразования координат, так как в ситуации игнорирования поправок фактическое место судна не будет соответствовать координатам морской карты [9]. Принятие к сведению в штурманской службе «Информационного письма Главморинспекции» свидетельствует об обеспокоенности морской администрации Российской Федерации правильным пониманием проблемы преобразования различных систем координат практикующими судоводителями. Предложенный способ пересчета координат базировался на сокращенном варианте формул акад. М. С. Молоденского. Указанные в письме рекомендации необходимо расценивать как попытку унифицированного решения вопроса согласования различных геодезических систем при фактическом создании так называемого *штурманского способа пересчета координат*.

Принципиальное решение проблемы коррекции местоположения судна на электронной или бумажной карте кардинальным образом становится возможным при переориентировании навигации на сплайновую модель геоида с условием перепрофилирования картографии на новую математическую основу. При использовании сплайновой модели геоида как единой согласованной системы координат навигации появляется реальная возможность освободить вахтенного помощника от рутинных процедур трансформации координат для различных геодезических систем, что автоматически повышает стандарты безопасности современного судовождения, поскольку судоводитель получает дополнительное время для выполнения анализа навигационных ситуаций и принятия заблаговременного обоснованного решения по управлению судном.

Перспективность применения на современном водном транспорте сплайнового геоида в парадигме абсолютной точности навигации представляет самостоятельный практический интерес, автоматически задающий инновационный стимул перспективного повышения точности судовождения. Для практической реализации решения проблемы согласования геодезических систем координат на основе использования методов сплайн-функций сформулированы следующие задачи:

1. Обзор проблематики согласования систем геодезических координат для точного позиционирования судна.
2. Разработка сплайнового алгоритма аппроксимации геоида как альтернатива многообразию существующих референц-систем.
3. Компьютерное синтезирование фрагмента эквипотенциальной поверхности планеты как геометрическая интерпретация математического алгоритма.
4. Разработка прикладной паскаль-программы применительно к задаче компьютерной визуализации геоидной изоповерхности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для традиционного вычисления модели геоида используются спутниковые гравиметрические измерения в узлах картографической сетки с заданным шагом и последующей математической обработкой на основе применения конечного ряда различных вариантов гармоник [10]. Сравнительный анализ различных полученных геоидных моделей на основе гармоник позволяет предположить наличие погрешности при подборе коэффициентов, а в случае применения сферических гармоник обнаруживается зональная некондиционность подобранных параметров [11]–[13]. Геопотенциальные коэффициенты при формировании геоида подбираются таким образом, чтобы геодезическая основа отвечала точным данным на национальной территории страны производителя с игнорированием точности применяемых параметров в других географических регионах [11], [13].

В связи с отмеченным ранее фактом некорректности стандартных математических атрибутов представляется целесообразным математическое синтезирование геоидной изоповерхности на основе апробированной гибридной сплайновой модели при использовании данных спутниковой альтиметрии в формировании матрицы правой части первого уравнения представленной алгебраической системы [14]:

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

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 искоемых 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.

Каждый частный случай использования сплайн-функций порождает многократность различных конкретных прикладных применений в процессе решения разноплановых навигационных задач. Как следует из анализа натурных испытаний маневренности судна, в практических экспериментах во многих случаях оказывается исключительно полезным применение B -сплайнов [15]. С математической точки зрения B -сплайн является реальной альтернативой многим аппроксимационным методам в вопросе точности синтезирования изогеометрических объектов [16]. В ситуации необходимости так называемого *суррогатного моделирования* сложных динамически флуктуирующих поверхностей в условиях неопределенности формирования трехмерного профиля изогеометрии оптимальную мотивацию эффективности аппроксимации организуют кубические B -сплайны ($k=3, m=3$) при использовании свойств финитных функций обеспечения точности дифференцируемости и интегрируемости функциональных зависимостей с быстродействием вычислительных реализаций [17], [18].

Вследствие выявленных преимуществ базисных функций представляется целесообразным в аспекте обработки навигационной информации отдать предпочтение перспективному сплайновому алгоритму с апробированным быстродействием и высокой точностью вычислений в отличие от классических методов. Поиск решения системы уравнений (1) может быть эффективно реализован на основе модернизированного *метода наименьших квадратов* [19]. Дополнительно необходимо учитывать тот факт, что вычислительная устойчивость расчетных процедур на основе сплайнов может быть дополнительно искусственно улучшена при условии применения оптимизационных схем организации узлов аппроксимации [20], [21] или введения дополнительных узлов одновременно слева и справа на сеточных отрезках для обеспечения лучших условий сплайнового приближения [22].

Теоретически геоид можно сформировать в виде конечного набора изолиний, каждая точка которых отвечает условию постоянства геоидальной высоты. При этом появляется возможность для синтезирования фигуры геоида на основе алгоритма *сплайн-интерполяции навигационных изолиний* [23]. При этом процедуру восстановления контура исследуемой гравитационной поверхности можно абстрактно представить как результат траекторного движения фиксированной интерполированной изолинии параллельно самой себе в трехмерном пространстве [24].

С практической точки зрения одномерный алгоритм проигрывает двумерной сплайн-аппроксимации по быстродействию, поскольку неизбежными являются дополнительные временные затраты на поиск конкретной изолинии при необходимости расчета в любой произвольной точке изоповерхности. В математическом смысле такой геоид может быть определен как некая имитационная трехмерная конфигурация, которая отстоит по сплайновым изолиниям на определенное количество метров выше или ниже референц-эллипсоида. Данная статичная модель становится абсолютно неадаптивной к восстановлению динамических пульсаций геоида при непрерывных физических флуктуациях гравитационной поверхности Земли. Представляется целесообразным признать двумерный алгоритм *B*-сплайновой аппроксимации единственной реальной альтернативой использованию множественности референц-эллипсоидов в современном судовождении.

Результаты (Results)

Сервис вычислений на сайте International Centre for Global Earth Models — ICGEM (Международного центра глобальных моделей Земли) Потсдамского научно-исследовательского отделения имени Гельмгольца (GFZ-Potsdam) позволяет выполнять расчеты гравитационных аномалий с заданной детальностью для любого района земного шара в нескольких вариантах различных моделей геоида по выбору пользователя. Под гравитационной аномалией понимается величина разности между гравитационным полем, аналитически продолженным из точки измерения вниз на высоту геоида, и нормальным полем на эллипсоиде в точке с соответствующими эллиптическими координатами. Для распространенной модели геоида EGM2008 такой расчет был выполнен для района Индийского океана ввиду его уникальной особенности локального обнаружения потери гравитационной массы [25].

На рис. 1 приведена репродуцированная с сайта <http://icgem.gfz-potsdam.de> карта гравитационной аномалии Индийского океана, ограниченная по широте 30° N – 28° S и долготе 60° E – 95° E в последовательности локальных квадратов с разрешением $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

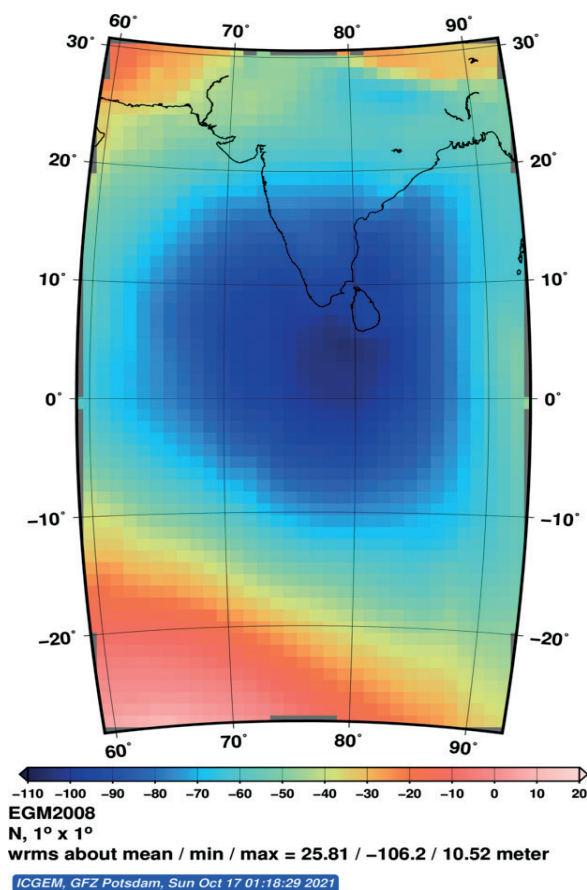


Рис. 1. Карта гравитационной аномалии Индийского океана

Мористее острова Шри-Ланка, идентифицируемого на рис. 1 по южной части узнаваемого контура п-ва Индостан, обозначено синее пятно феномена понижения геоида с минимумом в 106 м [5]. Внизу карты располагается шкала градуировки геоидной аномалии в метрической системе, выполненная в цветовой гамме, соответствующей содержанию фона карты по палитре яркостной раскраски.

На рис. 2 дана в аналогичных пределах картографирования по широте $30^{\circ}\text{N} - 28^{\circ}\text{S}$ и долготы $60^{\circ}\text{E} - 95^{\circ}\text{E}$ геометрическая интерпретация трехмерной визуализации геоидной изоповерхности Индийского океана, реализованная на основе метода двумерной *B*-сплайновой аппроксимации при использовании двенадцати сеточных точек по широте и восьми точек по долготы. Синхронно организуется матричный массив измерительных данных размерностью 8×12 при общем числе задействованных 96 точечных данных гравитационной аномалии по аналогии с математическим синтезированием батиметрического профильного рельефа подводной топографии Аляски [26].

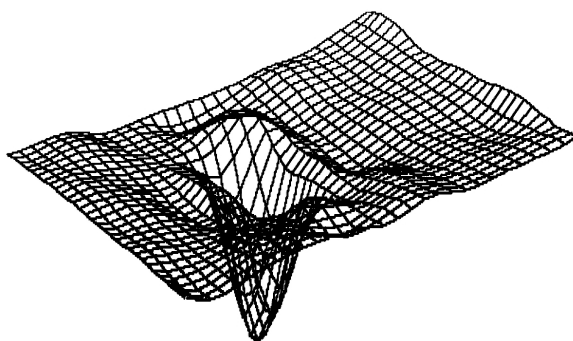


Рис. 2. Скриншот электронной перспективы геоидной изоповерхности Индийского океана

Для доказательства работоспособности предлагаемого подхода реализовано синтезирование фрагмента аномального поля гравитации Земли на основе перевода цветовой шкалы в цифровые значения в метрической системе по рис. 1 для создания перспективы геоидной изоповерхности Индийского океана, представленного на рис. 2 в трехмерном изображении. Анализ рис. 2 однозначно геометрически идентифицирует отрицательный вейвлетный всплеск в средней части скриншота как феномен потери гравитационной массы, обозначенный на рис. 1 концентрической областью синего цвета. При использовании вычислительных средств сайта ICGEM выполнена компьютерная визуализация в 3D-формате формы геоида EIGEN-6C4, представленной на рис. 3.

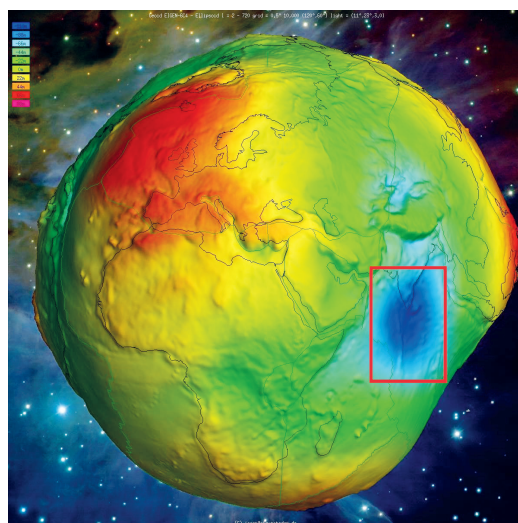


Рис. 3. Трехмерная визуализация современной модели геоида EIGEN-6C4

Область потери гравитационной массы в Индийском океане отмечена на рис. 3 красным прямоугольником с целью его однозначной идентификации для сравнительного анализа рис. 1 и 2. Как следует из рис. 2, максимальные отклонения эквипотенциальной поверхности характеризуются цифрой в пределах 100 м выше и ниже уровня WGS84, известные в научных публикациях как ундуляции геоида. Другой аномалией, обозначенной на рис. 2 красным цветом, является повышение геоида на 85 м в районе Исландии. Таким образом, диапазон максимальных ундуляций геоида составляет изученный интервал от -106 м до $+85$ м, равный по абсолютной величине 191 м [5].

Для сравнительной оценки классической формы геоида (см. рис. 3) и фигуры трехмерного изображения гравитационного поля Земли на основе подбора сферических коэффициентов реализована компьютерная визуализация традиционного алгоритма гармоник на базе вычислительных ресурсов сайта ICGEM. Как следует из детального рассмотрения представленной на рис. 4 модели геоида, сформированного на основе стандартного подхода, сферические гармоники только условно описывают форму эквипотенциальной поверхности при явной обнаруженной несхожести с известной грушевидной формой геоида (см. рис. 3), выполненной на основе системы точечных масс при помощи подробных спутниковых гравиметрических измерений по специальным программам GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) и GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) [5].

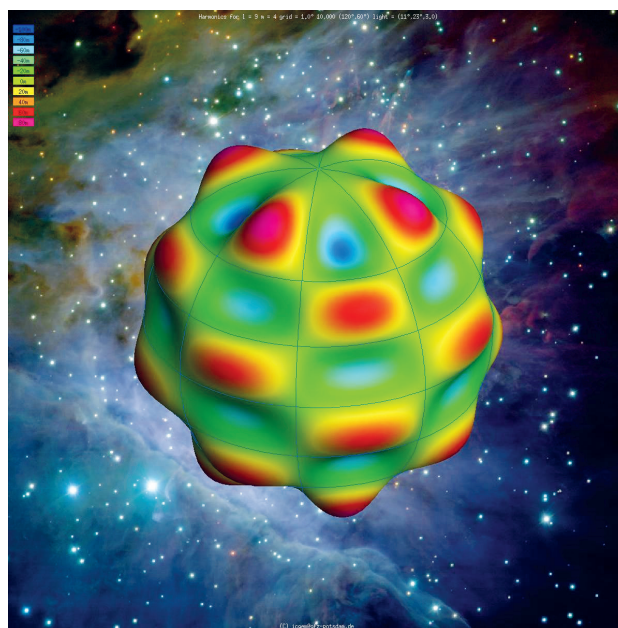


Рис. 4. Трехмерная визуализация сформированной на сферических гармониках модели геоида

В качестве дополнительного существенного недостатка методики комплексного определения характеристик гравитационного поля Земли по набору гармонических коэффициентов глобальных моделей геопотенциала необходимо отметить медленную внутреннюю сходимость традиционных вычислительных алгоритмов [27]. Проблематика математического восстановления формы геоида приобретает особую важность из-за необходимости синтеза пульсирующей формы уровенной поверхности Земли за счет физического явления непрерывных гравитационных флуктуаций. Различные причины перераспределения массы Земли вызывают постоянное изменение планетарного гравитационного поля [28]. В процессе постоянного уточнения формы геоида в орбиты навигационных спутников вводятся коррективы с целью повышения точности определения местоположения наземных потребителей.

В случае применения сплайновой аппроксимации нет необходимости полностью переформатировать гибридный алгоритм в случае обнаруженных изменений формы геоида. Обновляется

только матрица, сформированная в правой части первого уравнения системы (1), и на основе прежних формул *B*-сплайнов в комбинации со сплайнами лагранжева типа [29] может быть эффективно синтезирован новый геометрический облик гравитационной модели Земли. Эмпирически пересчетная трансформация реализуется за счет моментального перехода от сплайнового многообразия к физическому пространству, ориентированному на информацию реперных измерительных фиксаций [30].

Таким образом, разработанный подход является методом многоразового использования с долгосрочной перспективой применения при аппроксимации грушевидной планетарной формы с пульсирующей динамикой. В случае реализации варианта хранения программных сплайновых модулей в памяти бортовых вычислительных средств обеспечивается преимущество в оперативной возможности корректировки массива данных спутниковых гравиметрических измерений по мере обновления информации. При этом достигается высокая точность пульсирующих вычислений аномалий геоида вследствие возможности использования уточненных измерений контрольных станций спутникового слежения. В случае обнаружения расхождений измерительных данных с общепринятой моделью автоматически неизбежно возникает необходимость реконструкции геоида [31]. Эффекты аномальных гравитационных пульсаций геоида оптимальным математическим образом могут учитываться при использовании унифицированного гибридного сплайнового алгоритма в виде конгломерата системы уравнений (1) без какого-либо алгоритмического переформатирования при использовании файла модификации гравиметрических данных. На основе новой информации измерений уточненная форма геоида будет пересчитана тем же высокоскоростным методом *B*-сплайновой аппроксимации без каких-либо конструктивных сложностей. В режиме реального времени появляется возможность использования в практических приложениях уточненной синтезированной изогеометрии геоида при постоянном обновлении спутниковой альтиметрической информации.

Обсуждение (Discussion)

Сложная структура гравитационного поля Земли, организуемая неправильностью формы планеты и неравномерным распределением масс в недрах, обуславливает трудности математической формализации формы геоида. Вследствие этого в практических приложениях фигура геоида заменяется эллипсоидом вращения с целью упрощения оперирования геодезическими координатами. Поверхность имитирующей форму Земли эллипсоида образует последовательность вращений эллипса определенного размера вокруг его малой оси при условии оптимизации угловой ориентации главных осей. Данная неравноценная геометрическая замена при работе штурмана со спутниковым приемоиндикатором автоматически порождает вторичную проблему как правильный учет высоты геоида над эллипсоидом для точного позиционирования на морской акватории подвижного объекта, поскольку для фиксации точки в евклидовом пространстве необходимо определить три координаты. Эллипсоид обеспечивает цели навигации в идеализированном варианте по причине того, что форма его поверхности близка к фигуре Земли и математический аппарат формализованных зависимостей для решения задачи вычисления координат точки на эллиптической поверхности является достаточно простым с возможностью использования данных в табулированном виде.

В различных государствах мира применяется несколько десятков различных геодезических систем [32]. Практически у каждой страны, интегрированной в логику международного судоходства, присутствует национальный атрибут в виде референц-эллипсоида как упрощенной государственной модели геоида с целью репродуцирования морских карт с минимальными искажениями на национальных территориях с учетом специфики географических особенностей. Ведущая морская держава для точного издания карт своей территории выбирает эллипсоид таких размеров и такой формы, чтобы он как можно ближе подходил к поверхности геоида в пределах государственной зоны влияния. При этом в других регионах земного шара расхождение эллипсоида и геоида по высоте может быть значительным и достигать десятки метров. Из практически обоснованного стремления к максимальной точности позиционирования подвижных объектов

в национальном регионе и возникает проблема множественности различных референц-эллипсоидов. Этимология термина «референц» объясняется тем, что все точки на реальной земной поверхности коррелятивно переносят на поверхность выбранного эллипсоида, используя заданную на нем систему геодезических координат в национальных интересах. Обычно референц-эллипсоиду присваивают название, состоящее из фамилии предложившего его ученого и года, когда он был введен. Центр референц-эллипсоида, как правило, не совпадает с центром масс Земли. Только один эллипсоид системы WGS-84 подобран не для отдельной страны, а для планеты в целом по критерию наименьшего расхождения с формой геоида. Центр масс общеземного эллипсоида совпадает с центром масс Земли. Таким образом, геоидную форму Земли неоправданно заменяют оптимально подобранной по размерам и ориентировке правильной фигурой с известной математической формализацией — эллипсоидом вращения.

Для практической применимости в судовождении точно описываемого формулами математического атрибута в виде эллипсоида используют определенные геодезические условия: объем условной фигуры Земли предполагается примерно равным объему геоида, большая полуось находится в плоскости экватора геоида, малая полуось совпадает по направлению с осью вращения Земли.

Использование удобной геодезической модели автоматически консервирует латентным образом методическую погрешность, нивелирующую технические успехи систем спутниковой навигации. Пренебрежение отклонением эллипсоида от геоида может привести к значительным, согласно современным стандартам безопасности судовождения, расхождениям координат. При определении местоположения судна спутниковая обсервация получится ориентированной на иллюзорную изоповерхность, поскольку морской подвижный объект всегда движется по водной акватории, являющейся фрагментом реальной геоидной поверхности нашей планеты. В случае применения в современном судовождении единственной сплайновой модели геоида, в принципе, нивелируется различие систем координат, определяемое разными параметрами эллипсоидов, взятых за математическую основу при производстве бумажной или электронной карты.

При программной реализации в бортовом компьютере алгоритмов на основе прогрессивной технологии теории приближения функций становится возможным оперировать данными почти с абсолютной точностью в практической навигации, отказавшись от традиционных математических стилизаций. При этом необходимо учитывать, что предлагаемый метод обработки навигационной информации на основе сплайн-функций не гарантирует надежность спутниковых обсерваций в условиях преднамеренных помех, спуфинг-атак и локальной недоступности сигналов ГНСС. Техническое решение указанной проблемы возможно за счет комплексирования спутниковой навигационной аппаратуры со средствами навигации, основанными на иных принципах работы [33]. Представляется целесообразным для эффективного решения этой задачи использовать возможности автономной помехозащищенной корреляционно-экстремальной навигации с целью обеспечения максимальной точности определения местоположения морского подвижного объекта при любых обстоятельствах следования по маршруту [34]–[36].

Выводы (Summary)

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Представленный обзор проблематики согласования систем геодезических координат подтверждает актуальность выполненного научного исследования по перспективному ориентированию на единственную сплайновую геоидную модель.
2. Геометрически доказана работоспособность сплайнового алгоритма аппроксимации геоида как альтернативы множественности существующих референц-систем.
3. Разработанный сплайновый подход является методом многоразового использования с долгосрочной перспективой применения аппроксимации грушевидной планетарной формы Земли с пульсирующей динамикой.
4. Создана объективная причина практической возможности достижения абсолютной точности судовождения при устранении проблемы пересчета координат в различные геодезические системы.

5. Разработаны прикладные программы, объединенные пользовательским интерфейсом в турбо-паскалевской компьютерной «оболочке» применительно к задаче синтезирования и визуализации геоидной изоповерхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юнес Ж. А. Особенности преобразования координат из геоцентрической системы WGS-84 на проекцию Меркатора для условий низких широт / Ж. А. Юнес, М. Г. Мустафин // Геодезия и картография. — 2018. — Т. 79. — № 10. — С. 2–6. DOI: 10.22389/0016-7126-2018-940-10-2-6.
2. Чан Т. Ш. Алгоритм преобразования координат из геоцентрической системы в топоцентрическую и его применение при строительстве во Вьетнаме / Т. Ш. Чан, А. А. Кузин // Вестник СГУГиТ (Сибирского гос. ун-та геосистем и технологий). — 2019. — Т. 24. — № 1. — С. 59–71. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-1-59-71.
3. Гагарский Д. А. Электронные картографические системы / Д. А. Гагарский. — СПб.: Морсар, 2017. — 224 с.
4. Мореходные таблицы (МТ-2000). — СПб.: ГУНИО МО, 2002. — 575 с.
5. 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.
6. Каврайский А. В. О связи систем координат, используемых в морской картографии и навигации / А. В. Каврайский // Навигация и гидрография. — 1995. — № 1. — С. 21–25.
7. 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.
8. Operator's manual DGPS NAVIGATOR GPS NAVIGATOR model GP-37/GP-32. — Nishinomiya: Furuno Electric Co., Ltd., 2014. — 89 p.
9. Информационное письмо Главморинспекции Департамента морского транспорта РФ № ГМИ-01/14–211, 1993.
10. Milyukov V. K. Relativistic Reduction in High-Precision Measurements of the Earth's Global Gravity Field Using a Multipair Constellation / V. K. Milyukov, I. Yu. Vlasov, M. V. Sazhin, O. S. Sazhina, V. N. Sementsov // Astronomy reports. — 2020. — Vol. 64. — No. 5. — Pp. 447–457. DOI: 10.1134/S1063772920060049.
11. Муравьев Л. А. Общеземные базы данных гравитационного поля Земли на территорию приарктической части Уральского региона / Л. А. Муравьев // Уральский геофизический вестник. — 2019. — № 2 (36). — С. 46–53. DOI: 10.25698/UGV.2019.2.5.46.
12. Hasanov I. M. Comparison of the new gravity field model XGM2019e with other modern global models of the gravitational field for the Magadan region / I. M. Hasanov, L. A. Myravyev // Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. — Vol. 2020. — Is. 1. — Pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2020geo112.
13. Хасанов И. М. Сравнение глобальных моделей гравитационного поля на территории Магаданской области / И. М. Хасанов, Л. А. Муравьев // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. — 2021. — № 3. — С. 82–89. DOI: 10.34078/1814-0998-2021-3-82-89.
14. 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.
15. Nomura S. Applications of B-spline Approximation to the Analysis of Ship Manoeuvrability / S. Nomura // The Journal of Japan Institute of Navigation. — 1996. — Vol. 95. — Pp. 233–240. DOI: 10.9749/jin.95.233.
16. de Koster P. Extension of B-spline Material Point Method for unstructured triangular grids using Powell-Sabin splines / P. de Koster, R. Tielen, E. Wobbes, M. Moller // Computational Particle Mechanics. — 2021. — Vol. 8. — Is. 2. — Pp. 273–288. DOI: 10.1007/s40571-020-00328-3.
17. Rehme M. Uncertainty quantification for the Hokkaido Nansei-Oki tsunami using B-splines on adaptive sparse grids / M. Rehme, S. Roberts, D. Pfluger // ANZIAM Journal. — 2020. — Vol. 62. — Pp. C30–C44. DOI: 10.21914/anziamj.v62.16121.

18. *Rehme F. M.* B-splines on sparse grids for surrogates in uncertainty / F. M. Rehme, S. Roberts, D. Pflüger // Reliability Engineering & System Safety. — 2021. — Vol. 209. — Pp. 107430. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107430.
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. *Yeh R.* Fast Automatic Knot Placement Method for Accurate B-spline Curve Fitting / R. Yeh, Y. Nashed, T. Peterka, X. Tricoche // Computer-Aided Design. — 2020. — Vol. 128. — Pp. 102905. DOI: 10.1016/j.cad.2020.102905.
21. *Chen P.* Explicit Gaussian Quadrature Rules for C^1 Cubic Splines with Non-Uniform Knot Sequence / P. Chen, X. Li // Communications in Mathematics and Statistics. — 2021. — Vol. 9. — Is. 3. — Pp. 331–345. DOI: 10.1007/s40304-020-00220-9.
22. *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.
23. *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.
24. *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.
25. *Ningthoujam L. S.* Seismologists Search for the Indian Ocean's "Missing Mass" / L. S. Ningthoujam, S. S. Negi, D. K. Pandey // Earth & Space Science News. — 2019. — Vol. 100. DOI: 10.1029/2019EO120243.
26. *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.
27. *Голдобин Д. Н.* Разработка методики комплексного определения характеристик гравитационного поля по данным глобальных моделей геопотенциала: дис. ... канд. техн. наук / Д. Н. Голдобин. — Новосибирск, 2019. — 201 с.
28. *Ince E. S.* ICGEM — 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans / E. S. Ince, F. Barthelmes, S. Reibland, K. Elder, C. Foerste, F. Flechtner, H. Schuh // Earth System Science Data. — 2019. — Vol. 11. — Is. 2. — Pp. 647–674. DOI: 10.5194/essd-11-647-2019.
29. *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.
30. *Стародумов И. О.* Математическое моделирование структурно-фазовых превращений модифицированным методом кристаллического фазового поля: дис. ... канд. физ.-мат. наук / И. О. Стародумов. — Екатеринбург, 2019. — 106 с.
31. *Kopeikin S.* Normal gravity field in relativistic geodesy / S. Kopeikin, I. Vlasov, W. B. Han // Physical Review D. — 2018. — Vol. 97. — Is. 4 — Pp. 045020. DOI: 10.1103/PhysRevD.97.045020.
32. *Каврайский А. В.* К вопросу преобразования навигационных морских карт из системы координат СК-42 в ПЗ-90.11 / А. В. Каврайский, А. М. Шарков // Навигация и гидрография. — 2019. — № 58. — С. 62–70.
33. *Ююкин И. В.* Навигационное использование e-Logan 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.
34. *Рыбаков Е. А.* Комплексирование аппаратуры потребителя глобальных навигационных спутниковых систем с аппаратурой корреляционно-экстремальной навигации по гравитационному полю Земли: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. А. Рыбаков. — М., 2021. — 16 с.
35. *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.
36. *Бобров Д. С.* Разработка методов и средств создания навигационных гравитационных карт: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. С. Бобров. — Менделеево, 2020. — 23 с.

REFERENCES

1. Younes, Jade A., and Murat G. Mustafin. "The characteristics of transforming coordinates from the geocentric system WGS-84 for the Mercator projection under low latitudes conditions." *Geodezia i Kartografiya* 79.10 (2018): 2–6. DOI: 10.22389/0016-7126-2018-940-10-2-6.
2. Tran, Thanh Son, and Anton A. Kuzin. "Algorithm of transforming coordinates from a geocentric system to a topocentric system and its application in construction in Vietnam." *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)* 24.1 (2019): 59–71. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-1-59-71.
3. Gagarinskiy, Dmitriy A. *Elektronnyye kartograficheskie sistemy*. SPb.: Morsar, 2017.
4. *Morehodnye tablitsy* (MT-2000). SPb.: GUNIO MO, 2002.
5. Yuyukin, Igor V. "Geoid approximation by methods of spline functions." *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.
6. Kavraiskii, A. V. "O svyazi sistem koordinat, ispol'zuemykh v morskoi kartografii i navigatsii." *Navigatsiya i gidrografiya* 1 (1995): 21–25.
7. Yuyukin, Igor V. "Cubic spline 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.
8. *Operator's manual DGPS NAVIGATOR GPS NAVIGATOR model GP-37/GP-32*. Nishinomiya: Furuno Electric Co., Ltd., 2014.
9. Informatsionnoe pis'mo Glavmorinspektcii Departamenta morskogo transporta RF № ГМИ-01/14–211, 1993.
10. Milyukov, Vadim K., Igor Yu. Vlasov, Mikhail V. Sazhin, Olga S. Sazhina, and Valerian N. Sementsov. "Relativistic Reduction in High-Precision Measurements of the Earth's Global Gravity Field Using a Multipair Constellation." *Astronomy reports* 64.5 (2020): 447–457. DOI: 10.1134/S1063772920060049.
11. Muravyev, Lev A. "Global databases of the Earth's gravitational field for the arctic part of the Urals." *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik* 2(36) (2019): 46–53. DOI: 10.25698/UGV.2019.2.5.46.
12. Hasanov, Ibragim M., and Lev A. Muravyev. "Comparison of the new gravity field model XGM2019e with other modern global models of the gravitational field for the Magadan region." *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020. Vol. 2020. No. 1. European Association of Geoscientists & Engineers, 2020*. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2020geo112.
13. Khasanov, Ibragim M., and Lev A. Muravyev. "Comparison of global models of the gravitational field in the territory of Magadan oblast." *Bulletin of the North-East Science Centre* 3 (2021): 82–89. DOI: 10.34078/1814-0998-2021-3-82-89.
14. 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.
15. Nomura, Shihei. "Applications of B-spline Approximation to the Analysis of Ship Manoeuvrability." *The Journal of Japan Institute of Navigation* 95 (1996): 233–240. DOI: 10.9749/jin.95.233.
16. de Koster, Pascal, Roel Tielen, Elizaveta Wobbes, and Matthias Moller. "Extension of B-spline Material Point Method for unstructured triangular grids using Powell-Sabin splines." *Computational Particle Mechanics* 8.2 (2021): 273–288. DOI: 10.1007/s40571-020-00328-3.
17. Rehme, Michael, Stephen Roberts, and Dirk Pflüger. "Uncertainty quantification for the Hokkaido Nansei-Oki tsunami using B-splines on adaptive sparse grids." *ANZIAM Journal* 62 (2020): C30–C44. DOI: 10.21914/anziamj.v62.16121.
18. Rehme, Michael F., Fabian Franzelin, and Dirk Pflüger. "B-splines on sparse grids for surrogates in uncertainty quantification." *Reliability Engineering & System Safety* 209 (2021): 107430. DOI: 10.1016/j.res.2021.107430.
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. Yeh, Raine, Youssef S. G. Nashed, Tom Peterka, and Xavier Tricoche. "Fast Automatic Knot Placement Method for Accurate B-spline Curve Fitting." *Computer-Aided Design* 128 (2020): 102905. DOI: 10.1016/j.cad.2020.102905.

21. Chen, Peng, and Xin Li. "Explicit Gaussian Quadrature Rules for C^1 Cubic Splines with Non-Uniform Knot Sequence." *Communications in Mathematics and Statistics* 9.3 (2021): 331–345. DOI: 10.1007/s40304-020-00220-9.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Ningthoujam, Lachit S., Sanjay S. Negi, and Dhananjai K. Pandey. "Seismologists Search for the Indian Ocean's "Missing Mass"." *Earth & Space Science News* 100 (2019). DOI: 10.1029/2019EO120243.
26. 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.
27. Goldobin, Denis N. *Razrabotka metodiki kompleksnogo opredeleniya kharakteristik gravitatsionnogo polya po dannym global'nyh modeley geopotentsiala*. PhD Diss. Novosibirsk, 2019.
28. Ince, Elmas Sinem, Franz Barthelmes, Sven Reibland, Kirsten Elger, Christoph Foerste, Frank Flechtner, and Harald Schuh. "ICGEM — 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans." *Earth System Science Data* 11.2 (2019): 647–674. DOI: 10.5194/essd-11-647-2019.
29. 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.
30. Starodumov, Ilya O. *Matematicheskoe modelirovanie strukturno-fazovykh prevrasheniye modifitsirovannym metodom kristallizatsionnogo fazovogo polya*. PhD Diss. Yekaterinburg, 2019.
31. Kopeikin, Sergei, Igor Vlasov, and Wen-Biao Han. "Normal gravity field in relativistic geodesy." *Physical Review D* 97.4 (2018): 045020. DOI: 10.1103/PhysRevD.97.045020.
32. Kavraysky, Alexander V., and Andrey M. Sharkov "To the question of converting navigational charts from the coordinate system SK-42 to PZ-90.11." *Navigatsiya i gidrografiya* 58 (2019): 62–70.
33. 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.
34. Rybakov, Evgeniy A. *Kompleksirovanie apparatury global'nykh navigatsionnykh sputnikovyykh sistem s apparatury korrelyatsionno-ekstremal'noy navigatsii po gravitatsionnomu polu Zemli*. Abstract of PhD Diss. M., 2021.
35. 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.
36. Bobrov, Dmitriy S. *Razrabotka metodov i sredstv sozdaniya navigatsionnykh gravitatsionnykh kart*. Abstract of PhD Diss. Mendeleevo, 2021.

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 8 ноября 2021 г.
 Received: November 8, 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-819-831

CONCEPTUAL MODELING THE SYSTEM FOR ENSURING DESIGN RELIABILITY OF THE OFFSHORE ICE-RESISTANT HYDRAULIC STRUCTURES BASES

V. G. Tsuprik

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

The phenomenon of vibration is considered in the paper. A serious threat to the safety of stationary marine structures operating in conditions of ice fields drift, is the vibration that occurs during cutting of the ice cover by the supports of structures. The process of interaction, as an object of research, is described by the force of resistance to a change in equilibrium in the formed natural-man-made “ice field — structure” system, simultaneously affecting both the edge of the ice field and the base of the structure, and growing to a certain maximum, then “dumped” to a certain minimum. The moment of the beginning of ice destruction is due to the achievement of the critical density of elastic energy accumulated in the compressed local volume of ice in the contact zone, which is the trigger of ice load phenomenon release on the structure and the beginning of its return to the equilibrium state, i. e. is the source of its oscillations. Such cyclic destruction of ice, as the main subprocess in the complex process of interaction between the ice field and the structure, must be viewed as a subject of research, since this phenomenon reflects the real mechanism of transforming the kinetic energy of the ice field movement into the potential specific energy of the newly formed surfaces of the destroyed fragments of ice. As a methodological basis and a tool of scientific research, the system analysis is used in the work as a method of setting and solving the problem through the decomposition of the process under study, analysis of its constituent phenomena and synthesis of an adequate model of cyclic ice destruction to study unsolved problems in calculating the loads of ice fields on offshore free-standing structures. The characteristics of the cyclic process of ice destruction, both the values of ice load peaks and their frequency are the initial parameters when performing a dynamic calculation of the structure to determine its reliability level. Obtaining these characteristics is possible only when using the energy criterion of ice destruction, the type and location in the design system of which are defined in the work.

Keywords: marine hydraulic structures, vibration, sea ice, ice destruction, cyclic load, system approach, specific energy of destruction.

For citation:

Tsuprik, Vladimir G. “Conceptual modeling the system for ensuring design reliability of the offshore ice-resistant hydraulic structures bases.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 819–831. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-819-831.

УДК 627.01; 627.034; 001.89

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЕКТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВАНИЙ МОРСКИХ ЛЕДОСТОЙКИХ СООРУЖЕНИЙ

В. Г. Цуприк

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»

В статье выполнен анализ причин вибрации, возникающей в процессе прорезания ледового покрова опорами сооружений, которая представляет серьезную угрозу для безопасности стационарных морских объектов, работающих в условиях дрейфа льдов. Процесс взаимодействия как объект исследования описывается силой сопротивления изменению равновесия в сформировавшейся природно-техногенной системе «ледовое поле — сооружение», одновременно контактно воздействующей и на кромку ледового поля, и на основание сооружения и нарастающей до определенного максимума, затем «сбрасываемой» до некоторого минимума. В результате декомпозиции системы и ее структурно-функционального анализа в работе показано, что момент начала разрушения льда обусловлен достижением критической плотности упругой энергии, накопленной в сжатом локальном объеме льда в зоне контакта, что является триггером

явления сброса ледовой нагрузки на сооружение и началом его движения к точке равновесия, т. е. источником его колебаний. Такое циклическое разрушение льда, как основной субпроцесс в сложном процессе взаимодействия ледового поля и сооружения, является предметом исследования, поскольку именно это явление отражает реальный механизм превращения кинетической энергии движения ледового поля в потенциальную удельную энергию вновь образуемых поверхностей разрушенных фрагментов льда. В качестве методологической основы и инструмента научного исследования в работе использован системный анализ как метод постановки и решения проблемы через декомпозицию исследуемого процесса, анализ составляющих его явлений и синтез адекватной модели циклического разрушения льда для изучения нерешенных проблем в расчетах нагрузок ледовых полей на морские отдельно стоящие сооружения. Характеристики циклического процесса разрушения льда, такие как значения пиков ледовой нагрузки и их частота, являются исходными параметрами при выполнении динамического расчета сооружения для определения уровня его надежности. Получение этих характеристик возможно только при использовании энергетического критерия разрушения льда, тип и место в системе проектирования которого определены в работе.

Ключевые слова: морские гидротехнические сооружения, вибрация, морской лед, разрушение льда, циклическая нагрузка, системный подход, энергия разрушения.

Для цитирования:

Цуприк В. Г. Концептуальное моделирование системы обеспечения проектной надежности оснований морских ледостойких сооружений / В. Г. Цуприк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 819–831. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-819-831.

Введение (Introduction)

К морским гидротехническим сооружениям, возводимым на замерзающих акваториях и воспринимающим нагрузки от дрейфующих ледовых образований, относятся основания маяков, навигационных знаков, швартовых и отгрузочных палов, буровых платформ и др. Исходя из потребности возведения искусственного сооружения на морском шельфе в высоких широтах, главным проектным свойством такого сооружения является его ледостойкость. Такие сооружения, как морские ледостойкие основания (МЛО) буровых платформ, например, служат уникальными инженерными объектами, характерными особенностями которых являются уникально высокие стоимость, материалоемкость и трудоемкость их возведения. С учетом мирового опыта проектирования и возведения сооружений такого класса очевидно, что МЛО должны надежно функционировать в тяжелых условиях эксплуатации, разрушая ледовое поле (ЛП), дрейфующее под действием течений и ветра и обладающее огромной кинетической энергией, без нарушения его локальной прочности и общей устойчивости. «Ледостойкость» таких сооружений может быть достигнута созданием уникальных стационарных конструкций, обладающих достаточной жесткостью и устойчивостью для обеспечения явления «прорезания» ЛП в месте контакта его кромки с поверхностями опорных элементов конструкции.

Практика эксплуатации стационарных морских объектов, работающих в условиях дрейфа льдов, показала существенную угрозу их безопасности, которую представляет возникновение вибрации, возбуждаемой в процессе взаимодействия ледового покрова с сооружением ввиду *циклического разрушения льда на опорах сооружений*. Факты разрушений в течение 1961–1987 гг. пяти установленных в море маяков в виде стационарных сооружений на Балтике подверглись тщательному исследованию, результаты которого были опубликованы и обсуждались в сообществе специалистов по механике льда (краткий обзор работ приведен в работе [1]). В Бохайском заливе Желтого моря две платформы были разрушены от вибрации [2], [3], вызванной перепадами сил при разрушении льда на опорах этих решетчатых конструкций. В 1978 г. на шельфе Азовского моря от натиска льда строящееся железобетонное основание буровой платформы в виде многогранника диаметром 8 м получило недопустимый крен из-за перераспределения нагрузки по грунту [4]. В море Бофорта зимой 1985–1986 гг. возникла реальная угроза потери устойчивости мощного гравитационного основания платформы «Моликпак» массой 54 тыс. т при сечении кессона $111 \times 111 \text{ м}^2$ [5], [6]. Во всех случаях было установлено, что причиной возникновения значительных и опасных для со-

оружий, персонала и промыслового оборудования амплитуд колебаний, обусловивших опасное состояние эксплуатируемых платформ, является вибрация конструкций сооружений, вызванная относительно длительным циклическим разрушением льда на поверхности их оснований, что не было учтено в проектах этих и всех других отдельно стоящих морских сооружений, возведенных вплоть до начала XXI в. Данная проблема может быть решена после разработки и учета в нормативной методологии расчетов надежности МЛО параметров цикличности контактного разрушения льда.

Впервые рассмотрение совокупности «ледовое поле — сооружение» как единой «системы», в которой возникают колебания, генерируемые процессом разрушения льда, было предложено в 1970 г. К. А. Blenkarn. В дальнейшем эту идею поддержали другие исследователи, попытавшиеся обосновать возможность возникновения автоколебаний и резонанса в данной системе со ссылками на теорию колебаний. Для изучения процесса разрушения льда и связанного с ним возникновения вибрации сооружений были проведены многочисленные исследования с моделями в ледовых бассейнах [7]–[10]. Результаты этих исследований показали, что в диапазоне скоростей ЛП до некоторой предельной скорости ледовые нагрузки в системе «ЛП – МЛО» имеют *пилообразный характер* с частотой разрушения, пропорциональной скорости ЛП. Как только скорость ЛП превышает этот нижний предел, частота индуцированной разрушением льда вибрации модели сооружения (*IIV–Ice Induce Vibration*) имеет тенденцию фиксироваться на частоте, близкой к собственной частоте модели, что в реальном исполнении в природе может привести к выходу сооружения из строя, экологическим проблемам и даже к человеческим жертвам.

Наличие циклически изменяющейся ледовой нагрузки, в соответствии с действующим российским стандартом¹, требует выполнения динамических расчетов МЛО. В качестве исходных данных для таких расчетов необходимо использовать два основных параметра цикличности горизонтальной нагрузки на сооружение от льда: пиковое значение контактной силы и частоту (период) появления пиков. В настоящее время методики определения этих параметров не существует, поскольку отсутствует инструментальная запись процесса воздействия глобальной силы давления льда на реальное сооружение. Однако имеются записи — цифровые ряды изменения локальных контактных давлений льда на отдельные участки поверхностей опорных конструкций реальных сооружений, что позволяет определить частоту разрушения льда [5], [6], [11], [12], однако такие единичные и уникальные измерения не всегда возможно распространить на другие объекты, проектируемые для иных условий.

Несмотря на значительный прогресс в механике льда и физическом и численном моделировании динамического взаимодействия ледового поля с сооружением существующие значительные неопределенности в математическом описании данного явления не получили адекватного разрешения [1]. Это подтверждается действующими российскими и международными нормами^{2, 3}, в которых *метод определения предела прочности льда* существует как самостоятельная процедура, а результаты испытаний образцов «вставляются» в достаточного абстрактные формулы — модели определения ледовой нагрузки, не являющиеся корректным описанием процесса взаимодействия ЛП и МЛО. В проектной практике сегодня не допускается создание «надежного» объекта без заложенных в его проект решений, обеспечивающих безопасность его функционирования в течение всего проектного периода эксплуатации. Очевидно, что как к проектированию, так и к строительству таких уникальных гидротехнических сооружений должны предъявляться самые жесткие требования относительно их надежности. Однако до настоящего времени нет нормативного метода, регламентирующего выполнение необходимых расчетов для гарантирования проектной надежности таких сооружений. Поэтому весьма актуальным является совершенствование расчетов надежности

¹ ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.

² СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Стандартинформ, 2019. 102 с.

³ ISO/FDIS 19906. Petroleum and natural gas industries: Arctic offshore structures: ISO 19906: 2019. International Organization for Standardization (Draft), 2019. 546 p.

в методологии их проектирования путем разработки новых или дополнения соответствующих нормативных документов [13].

Конечной практической целью, для достижения которой выполняется данная работа, является *надежный расчетный метод определения прочности и устойчивости МЛО*. Для этого необходимо разработать концептуальную модель функционирования системы «ЛП – МЛО», которая должна служить базой для разработки метода, обеспечивающего расчет параметров стабильного состояния системы «ЛП – МЛО», работающей в сложной совокупности многих природных систем [14], [15]. Методологическими задачами для достижения данной цели получения нормативного метода определения ледовой нагрузки на такое сооружение служат задачи, являющиеся неотъемлемыми элементами системы его проектирования [13], которая должна адекватно сочетать *метод расчета*, описывающий *механизм разрушения льда* ЛП с МЛО с соответствующим ему *критерием разрушения*, равно как и с *методом определения* этого критерия как физической величины. Поэтому механизм разрушения льда здесь является *объектом исследования*, а критерий разрушения льда — *предметом исследования*.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Системный подход к исследованию процесса взаимодействия ЛП с МЛО. Во всех методиках расчетов ледовой нагрузки на МЛО, рассматриваемых в рамках исследуемой проблемы, проектировщики МЛО всегда исходят из того, что надежность таких сооружений может быть достигнута созданием стационарных уникальных конструкций, обладающих высокими жесткостью, устойчивостью и обеспечивающих за счет этого «прорезание» льда в месте контакта кромки ЛП с опорными элементами МЛО. Эта позиция базируется на опыте проектирования уже возведенных и относительно стабильно функционирующих сооружений на шельфах ледовитых морей, которые были спроектированы с применением существующей *концепции непрерывного разрушения льда*, постулирующей *постоянство расчетного значения* контактной силы принятого для кинетических и кинематических параметров «расчетного ЛП». Однако для описания явления *циклического разрушения льда*, т. е. «пилообразного» характера ледовой нагрузки при прорезании опорами сооружений ледовых полей как *механического процесса*, необходимо вводить параметр «время» как естественную шкалу регистрации последовательности наступления описываемых элементов процесса, таких как фазы роста и сброса контактных сил, нарастание контактных давлений, моменты начала образования трещин или начала обратного движения опоры и др. Необходимость описания процесса механического разрушения льда во времени с учетом работы сил контактного давления, упруго деформирующих локальный объем массива льда в торцевой грани ледового поля предполагает использование *энергетической концепции* разрушения льда [16].

Характерным является то, что до настоящего времени не существует расчетной нормативной модели процесса *формирования ледовой нагрузки во времени*, адекватно учитывающей все аспекты процесса взаимодействия сооружения с кромкой ледового поля, поскольку этот процесс системно не анализировался. Не рассматривались и не описывались элементы системы, ее цель и системообразующая функция, баланс энергии ледового поля и сооружения в процессе их взаимодействия, работа контактного разрушения льда, отклонения сооружения и др. И, как отмечалось ранее, в методе определения предела прочности льда испытаниями малых образцов не регламентировано математическое описание процесса его разрушения, а лишь фиксируется значение предела его временной прочности.

Необходимость исследования динамического процесса взаимодействия ЛП с МЛО для разработки концептуальной модели обеспечения проектной надежности МЛО обуславливает применение системного подхода как *методологии проектирования*. Для анализа существующей методики расчета ледовой нагрузки на сооружения и разработки новой использован *системный анализ* [17] в качестве *методологической основы и инструмента* феноменологического, конструктивного и функционального анализа взаимодействия совокупности объектов «Ледовое поле» и «Морское ледостойкое основание», поскольку ранее было определено, что данная совокупность является *системой*.

Результаты применения системного анализа позволят установить взаимосвязи и взаимное соответствие всех моделей, методов и расчетных величин как *параметров выхода* системы «ЛП – МЛО». Основой для синтеза — построения новой методологии расчета ледовой нагрузки — должны послужить результаты решения трех основных задач при исследовании рассматриваемой системы «ЛП – МЛО»:

- декомпозиции системы (цели, структура, функции, факторы и неопределенности);
- структурного, функционального и конструктивного анализа системы;
- структурного и параметрического синтеза новой модели системы.

Дескриптивное определение совокупности объектов «ЛП – МЛО» как системы. Рассмотрим реально существующую совокупность объектов «ЛП – МЛО» на предмет ее соответствия всем определениям системы (рис. 1). Это необходимо для удостоверения правомерности ее исследования в качестве системы методами системного анализа с целью решения рассматриваемой проблемы расчетов параметров цикличности ледовых нагрузок на морские отдельно стоящие сооружения путем синтеза адекватной модели циклического разрушения льда.

В настоящее время реально существуют и эксплуатируются ледостойкие основания маяков на Балтике, платформ ферменного типа в Бохайском заливе, несколько морских ледостойких оснований, работающих в тяжелых ледовых условиях на шельфах РФ (платформы Приразломная, Беркут, Орлан и др.). На основании данных многочисленных исследований [2], [3], [5]–[8] установлено, что рассматриваемое здесь явление взаимодействия совокупности элементов ЛП и МЛО (см. рис. 1) образует единое целое, элементы которого связаны двояко-едиными физико-механическими процессами *циклического разрушения льда* (объект — ЛП), формирующими процесс *колебаний ледостойкого сооружения* (объект МЛО), являющихся эмерджентными (интегративными) свойствами этой совокупности, не присущими составляющим ее объектам. Следовательно, совокупность ЛП с МЛО является *системой*. Покажем это декомпозицией ее структуры, функций и комплексным анализом ее целей и свойств.



Рис. 1. Представление совокупности объектов «ЛП – МЛО» как системы во внешней среде

Как и всякая другая разрабатываемая для решения обозначенной проблемы система, «ЛП – МЛО» должна иметь конкретную цель. В данном случае цель системы не может быть «внутренней», обеспечивающей ее самофункционирование, она задается, например, разработчиком проекта морского ледостойкого основания буровой платформы. Проектировщика интересует решение вопросов по обеспечению стабильного проектного состояния системы «ЛП – МЛО», которая должна надежно и бесперебойно работать в ледовых условиях. Поэтому *цель рассматриваемой системы* как желаемое проектное ее состояние, задается целью проекта: придать сооружению *свойство ледостойкости*. Важно, что непротиворечивость целей основных элементов системы «ЛП – МЛО» подтверждает, что их совокупность действительно можно считать системой: цель ЛП — движение; цель МЛО — устойчивое положение на грунте под действием гравитации. Главное условие достижения системой ее цели — она должна находиться в «*области достижимости*», т. е. проектная жесткость сооружения всегда должна превышать жесткость ледового поля (льда): условно $R_{\max} > P_{\max}$.

Феноменологически цель системы «ЛП – МЛО» описывается следующим образом: *обеспечить непрерывное разрушение льда в течение всего времени воздействия дрейфующих ледовых полей на опоры основания сооружения*. Значит, рассматриваемая упорядоченная совокупность элементов «ЛП – МЛО», обладающая свойством ледостойкости МЛО с учетом принципа интегративности [14], [15], может и должна рассматриваться как система, характеризующаяся не только направленным, но и полезным эффектом, а именно удовлетворением исходной потребности устойчивого состояния МЛО — прорезанием дрейфующих ледовых полей.

Результаты исследований (Research Result)

Структурно-функциональный анализ системы «ЛП – МЛО». Структурный анализ рассматриваемой совокупности элементов, выполненный согласно основным положениям системного подхода [14], [15], показывает, что она состоит из нескольких элементов (*подсистем*), взаимодействующих между собой (см. рис. 1). Одним из таких элементов является ЛП, имеющее плавучесть и перемещающееся в горизонтальном направлении под действием другого элемента — *внешней среды* (таких ее составляющих, как ветер и течение). Другими элементами являются: рассматриваемое сооружение (МЛО), *водная среда*, в которой сооружение расположено, и *грунтовое основание* (G), составляющее базу для установки сооружения на дно.

Функционирование рассматриваемой сложной совокупности элементов обеспечивается реализацией связей между ними: между ледяным полем и опорами сооружения, между опорами сооружения или его опорной плитой и грунтом основания, между сооружением и водной средой. При этом каждый из элементов в рассматриваемой совокупности обладает присущими только ему и только в определенный конкретный отрезок времени феноменологическими свойствами, обус-

ливающими уникальность протекающих в них процессов в период их взаимодействия.

Функциональная модель принципа действия основных элементов системы «ЛП – МЛО» приведена на рис. 2. Функционирование системы происходит в виде работы процессора (PR) в качестве преобразователя кинетической энергии движущегося ЛП в другие виды энергии: поверхностную энергию блоков, обломков, крошки разрушенного льда в массиве ледового покрова в объеме образующейся прорези ледового поля, а также в упругую энергию отклонения МЛО.

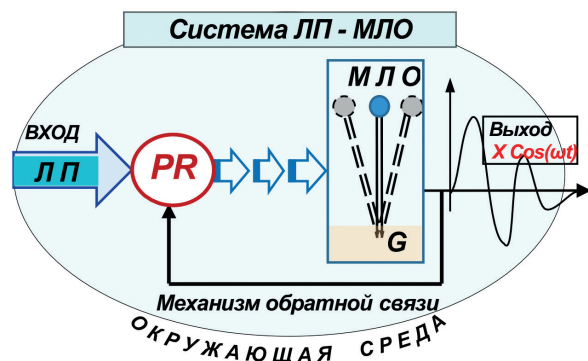


Рис. 2. Схематическое изображение системы «ЛП – МЛО»

В зависимости от ряда кинематических, кинетических, геометрических, физико-механических параметров ледового поля и льда, а также геометрических размеров сооружения и его жесткости, регулирующих характер процесса взаимо-

действия, вид выходного сигнала, а именно: среднее значение контактной силы, амплитуды ее пиков и их частота будут различными — от сравнительно постоянных значений без заметных колебаний, до пилообразной кривой с одинаковыми или изменяющимися амплитудами и частотами.

Функционирование единого процесса взаимодействия ЛП с МЛО состоит в одновременном развитии двух ее основных эмерджентных свойств — субпроцессов первого уровня: деформирования локального объема льда в торцевой грани ледового поля и упругого отклонения сооружения от положения равновесия. Между началом процесса взаимодействия ледового поля с сооружением и его окончанием в рассматриваемой природно-техногенной системе эти два свойства проявляются в виде циклически повторяющихся субпроцессов второго уровня. Первым из них является субпроцесс разрушения льда, вторым — субпроцесс вынужденных колебаний сооружения, частота которых регулируется частотой разрушения льда.

Феноменологической особенностью процесса воздействия льда на поверхность опоры сооружения является совершение работы по сжатию локального объема льда контактной силой одновременно с равной ей работой упругого отклонения сооружения от положения равновесия. При этом контактная сила нарастает до определенного максимума, затем «сбрасывается» до некоторого минимума в момент начала разрушения льда. Процесс механического разрушения льда рассматривается здесь в качестве *объекта исследования*. Циклическое разрушение льда как основной субпроцесс в процессе взаимодействия ледового поля и сооружения отражает реальный механизм превращения кинетической энергии движения ледового поля в потенциальную удельную энергию вновь образуемых поверхностей разрушенных фрагментов льда.

Работе контактной силы по сжатию локального объема льда противодействует жесткость структуры льда (рис. 3). В каждую единицу времени в сжимаемом массиве льда растет плотность упругой энергии и при достижении ее критического значения в сжатом локальном объеме льда в зоне контакта произойдет его разрушение, что вызовет сброс ледовой нагрузки на сооружение и начнется его движение обратно к точке равновесия. Поскольку движение ЛП продолжается, процесс взаимодействия ЛП с МЛО в виде циклов «нагрузка – сброс» (отклонение МЛО — возврат) повторяется до прорезания сооружением всего ледового поля. Таким образом, циклы нарастания – сброса нагрузки являются источником колебаний сооружения. Частота субпроцесса вынужденных колебаний сооружения, таким образом, регулируется частотой разрушения льда. Триггером начала разрушения льда в каждом цикле является критерий разрушения льда, который служит *предметом данного исследования*.

Результаты функционального анализа системного взаимодействия ЛП с МЛО показывают, что разрушение льда происходит *послойно* на определенную глубину L_{cr} в каждом цикле его нагружения (рис. 3), прерываемого разрушением слоя при достижении в нем критического напряженно-деформированного состояния.

Конструктивное определение системы «ЛП – МЛО». Учитывая полученный вывод о том, что совокупность «ЛП – МЛО» в целях анализа ее совместного функционирования может исследоваться как система. Понятие «надежность проекта МЛО» должно быть рассмотрено с учетом не только *феноменологических* (назначение, цель существования, целевая функция), но и *конструктивных* особенностей (строение, состав, устройство) системы «ЛП – МЛО». Как всякая техническая система [15], [17], система «ЛП – МЛО» может быть конструктивно определена как единство входа, выхода и процессора (PR) — см. рис. 2, предназначенных для упорядоченной реализации определенной функции по достижению *цели системы* — сохранению или изменению ее основного

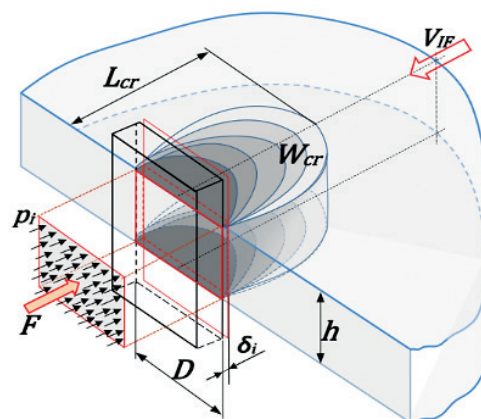


Рис. 3. Основные параметры взаимодействия ЛП с МЛО

свойства. Ранее было показано, что основными интегративными свойствами системы является *разрушение льда* на контакте кромки ледового поля с поверхностью с одной из опор МЛО и *колебания сооружения* (упругие знакопеременное деформирование его конструкции) при передаче ей части энергии движущегося ледового поля в виде периодически повторяющихся пиков ледовой нагрузки в промежутках времени между моментами разрушения льда.

Входом системы является ее элемент ЛП, функцией которого служит восприятие воздействия внешней среды. К конструктивным особенностям ледяного поля следует отнести его плоскую форму, скорость V , размеры в плане Ω , толщину h и прочность льда ξ_0 (см. рис. 1). Под входным воздействием среды в данном случае приняты следующие вещественные компоненты: скорость ветра V_v и течения V_t , сообщающие движение ледяному полю со скоростью V ; воздействие воды, обеспечивающей плавучесть и выполняющей гашение скорости ледяного поля; температура воздуха T , °С, под воздействием которой охлаждается вода и образуется ледяной покров той или иной толщины и набирает определенную прочность лед.

Выходом системы являются те элементы морского ледостойкого основания или их части, которые передают ее выходные воздействия в окружающую среду. Выходными воздействиями системы на среду в рассматриваемом случае являются обломки ледяных полей на поверхности моря, колебания всей конструкции МЛО, упругие волны, возникающие в воздушной и водной среде при колебаниях МЛО, изменения в распределении давления опорной плиты МЛО на грунтовое основание дна, шум, создаваемый разрушающимся льдом (см. рис. 1).

Основными выходными параметрами процесса преобразования энергии здесь являются значение *пикового контактного усилия* на поверхности опоры МЛО — P_k и *период цикла разрушения льда* (период колебания МЛО) — $T_{\text{ц}}$.

В процессе функционирования системы входные воздействия преобразуются в выходные посредством *процессора* — средства, обеспечивающего такое преобразование [15]. В общем случае процессор представляется как единство трех составляющих: *оснащения, упорядоченности и катализатора*. Ответом на вопрос о месте расположения процессора является результат феноменологического анализа процесса преобразования энергии одного из элементов системы — движущегося ЛП, в энергию разрушения льда с помощью другого элемента системы — МЛО. Процессор должен и пространственно, и функционально находиться между ними (см. рис. 1 и 2).

Конструкция МЛО, его неизменные параметры, такие как высота опор, их форма, размеры и материал, из которого они изготовлены, масса сооружения, жесткость каркаса сооружения и ряд других параметров определяют характер (тип) разрушения льда. Эти параметры следует рассматривать в качестве элементов оснащения процессора, они для конкретного сооружения остаются постоянными в течение всего периода его службы. Таким образом, оснащение процессора обеспечивает функционирование данной системы: преобразование входных воздействий в выходные, т. е. разрушение льда. По определению, порядок разрушения льда по одному из видов (типов) разрушения — это механизм разрушения льда [7], [8], поскольку он зависит от параметров ЛП (его толщины и скорости, физико-механических свойств льда и распределения их по толщине и площади). Эти параметры также удовлетворяют определению оснащения процессора системы «ЛП – МЛО». Следовательно, процессором в системе «ЛП – МЛО» служит механизм разрушения льда, главной функцией которого является *реализация целевого свойства* системы разрушать структуру льда в строго определенном порядке в результате разрыва ее внутренних связей под действием напряжений, создаваемых в них внешним силовым воздействием. Данное свойство системы имеет место при воздействии ледовых полей на сооружения как с податливыми опорами, так и с широкими неподвижными сооружениями-стенками. При этом необходимо отметить, что для изменения скорости, интенсивности и качества преобразований энергии движущегося ледового поля в энергию разрушения льда отдельные параметры элементов оснащения процессора — его *катализаторы* — могут изменяться (при вариантном проектировании) или задаваться конкретно.

В качестве одного из катализаторов можно рассматривать форму опоры, в качестве других — количество опор и размер каждой из них. Например, разрушение льда у опоры конического типа будет происходить при достижении предельной стрелки прогиба ледового поля, наползающего на поверхность опоры. При опорах с острой режущей гранью возможно раскалывание льдины. Ледовое поле из тонкого льда, движущееся под напором ветрового потока, может потерять устойчивость при изгибе, «упершись» в широкую опору сооружения. Разрушение ледового поля также может происходить в виде разрушений местного характера («смятие» или скалывание верхней и нижней поверхности ледовой плиты) при контакте его кромки с опорной конструкцией сооружения.

Выполненные этапы системного анализа функционирования совокупности объектов «ЛП – МЛО» как сложной природно-технической системы позволяют сформулировать в качестве результатов ряд положений рассматриваемой проблемы.

1. Дрейфующее ЛП может обладать колоссальной кинетической энергией $U_{ЛП}$, воспринимая своими нижней и верхней поверхностями воздействие сил морских течений, приливов–отливов и ветра. Функциональная модель принципа действия системы «ЛП – МЛО» представленная на рис. 2, демонстрирует процесс преобразования массива льда (ЛП как материальной основы системы) в его обломки и колебания МЛО «через механизм разрушения льда» (PR) посредством затрат кинетической энергии ЛП для достижения цели системы — ее устойчивого состояния (ледостойкости). Естественно, что движение и взаимодействие всех элементов, составляющих явление разрушения льда, должно описываться законами механики, прежде всего законом сохранения энергии. В то же время феномен периодического высвобождения энергии упругих напряжений в массиве льда, накапливаемой им поочередно в локальных объемах — слоях в зоне контакта — не является материальной субстанцией. Это значит, что механизм разрушения льда не является элементом системы, это ее *главная функция*, не являющаяся функцией ни одного из ее элементов и отражающая основное предназначение системы: преобразование кинетической энергии ЛП в потенциальную энергию поверхностей обломков разрушенного льда.

2. Очевидно, что при неизменных параметрах некоторого конкретного процесса взаимодействия ЛП с МЛО непосредственно на процесс разрушения льда должна затрачиваться некоторая относительно постоянная часть кинетической энергии ЛП и он является процессом периодического преобразования части энергии движущегося ЛП в энергию периодического разрушения льда и энергию вынужденного периодического упругого отклонения сооружения, что обусловлено движением ледового поля и циклическим разрушением льда на контакте кромки ЛП с поверхностью МЛО. Следовательно, в законе функционирования процесса механического разрушения льда основным его элементом, контролирующим дозирование диссипации энергии в течение каждого цикла колебания МЛО в системе «ЛП – МЛО», является предельное значение *критерия разрушения льда*. Исследования именно этой физической величины дают возможность *экспериментального определения расчетных пиковых значений* контактной силы и *частоты* появления таких пиков — исходных параметров для динамического расчета сооружения.

3. В каждом конкретном случае взаимодействия ЛП и МЛО эта энергия преобразуется в поверхностную энергию материальных элементов (осколки и блоки, крошка смятого льда, трещины различной природы и т. д.), и затрачивается на работу в процессах появления, развития, перемещения и удаления из зоны контакта этих физических тел во времени. Учитывая это, можно констатировать, что результат расчета срока службы ледостойкого сооружения с определенной вероятностью обеспечения его надежности будет обусловлен в основном адекватностью математического описания процесса разрушения льда при его контакте с поверхностью опоры сооружения, как и его *соответствием выбранной гипотезе механики разрушения льда*, а также надежностью физического определения расчетного параметра прочности льда, т. е. *адекватностью применяемых средств и методов определения критерия прочности льда*. Место «процессора» — механизма разрушения льда с критерием разрушения в системе проектирования МЛО и его роль в определении ледовой нагрузки на МЛО показаны на рис. 4.



Рис. 4. Схема элементов методологии обеспечения надежности и долговечности проектируемого морского ледостойкого основания

Обсуждение результатов (Discussion of Results)

Выполненный анализ дает возможность проведения дальнейших исследований по созданию новой методологии ледовой нагрузки на шельфовые сооружения, которые должны быть направлены на разработку новой модели, адекватно описывающей *работу силы, совершающей разрушение льда* на контакте ЛП с МЛО эквивалентными этой работе затратами энергии. Внешними материализованными проявлениями механизма разрушения льда являются трещины нормального отрыва или сдвига, которые зарождаются и развиваются, поглощая упругую энергию сжатого массива льда, превращающую его в массу мелкодисперсных обломков льда, образовавшихся в результате «смятия» относительно крупных блоков и обломков. Поэтому процессор системы «ЛП – МЛО» — механизм хрупкого разрушения льда в массиве — играет определяющую роль в процессе расчета ледовой нагрузки на МЛО. При проектировании сооружения важно рассмотреть все возможные модели взаимодействия и, следовательно, *критерии разрушения льда*, выбрав ту модель механизма разрушения и критерий разрушения льда, которые соответствуют именно этой модели, адекватно отображают процесс разрушения льда и дадут наибольшее значение ледовой нагрузки, которую следует принять за расчетную, но при этом данное значение будет включать нормированные показатели надежности принятого решения (см. рис. 4).

В результате проведения натурных и лабораторных исследований процессов разрушения льда на контакте с опорой сооружения [5]–[10], [11], [12] и в ходе теоретических изысканий достоверно установлено, что рассмотренные феноменологические особенности поведения ЛП и льда, из которого оно состоит, а также поведения конструкции МЛО показывают, что в природе преобразования энергии ЛП в энергию разрушенной массы (объема) массива льда проявляются в виде различных природно-техногенных алгоритмов (типов или моделей). Эти алгоритмы (далее — модели), описывают процесс прорезания ЛП опорами МЛО как через *механизмы непрерывного разрушения* и выдавливания разрушенной массы льда из зоны перед поверхностью опоры, так и через *механизмы «циклического разрушения»* льда, происходящего в результате разгрузки накопленной в контактной зоне льда потенциальной упругой энергии его деформирования. При этом во всех таких моделях преобразования энергии всегда существует механизм «сбрасывания» накопленной до критического значения упругой энергии U_{cr}^* для конкретного деформируемого объема льда в результате преобразования части энергии ледового поля $U_{лп}$ через механизм одновременного нагружения контактной силой F , льда и МЛО для его отклонения от положения равновесия на некоторую величину.

Таким образом, существует реальная необходимость разработки использования новой в данной области *энергетической концепции определения неизвестных расчетных параметров* циклического разрушения льда в процессе взаимодействия ЛПП с МЛЮ для их применения в процессе динамических расчетов ледовой нагрузки на сооружение. К ним относятся такие характеристики циклического процесса разрушения льда, как значения пиков ледовой нагрузки и их частота. Получение этих характеристик возможно только при использовании энергетического критерия разрушения льда, вид и место которого необходимо определить в отдельном исследовании.

Заключение (Conclusion)

Глобальный процесс воздействия льда на сооружение может быть описан законом сохранения энергии, который постулирует равенство объема энергии воздействия ЛПП на МЛЮ в каждую единицу времени контакта и объема диссипации этой энергии в системе «ЛПП – МЛЮ», т. е. количественные параметры процесса силового взаимодействия ЛПП и МЛЮ в реальном времени, можно получить только при решении *уравнения энергетического баланса*. Для составления такого уравнения следует рассмотреть совместную работу ледового поля, обладающего запасом кинетической энергии и стационарного либо упруго-податливого сооружения. Это можно считать основным выводом из феноменологического конструктивного и функционального анализа проблемы расчета ледовой нагрузки для определения надежности морских ледостойких оснований, который учитывает особенности строения и физико-механических свойств льда, характер разрушения ледовых полей и массива льда при контакте с поверхностью опоры сооружения.

Исходя из требования обеспечения надежности проекта МЛЮ, та его часть, в которой выполняется строительное проектирование сооружения, должна быть обеспечена надежным методом расчета ледовой нагрузки, а следовательно, надежным методом определения критерия разрушения льда и полного соответствия основных физико-механических аспектов разрушения льда, используемых в расчетной модели, тем параметрам, которые определяют аналогию таких аспектов в методе определения критериальных значений прочностной характеристики льда. Поэтому основным расчетным параметром при определении ледовой нагрузки на МЛЮ является *критерий разрушения льда ϵ_0* . Поскольку метод расчета ледовой нагрузки на МЛЮ является частью методологии его проектирования, он должен гармонично сочетаться с методом подготовки исходных данных, соответствующих этим расчетам и, в первую очередь, с *критерием разрушения льда*. Очевидно, что от полноты соответствия метода разрушения льда при его испытаниях на прочность (метода определения критерия), т. е. от адекватности его природе разрушения массива льда в торцевой грани ЛПП, зависит *уровень достоверности любой методологии проектирования МЛЮ*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hossain R.* An assessment of sensitivity of the self-excited modelling approach for simulating dynamic ice-structure interactions to changes in temperature and scale effects / R. Hossain, R. Taylor, L. Moro // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 165. — Pp. 410–425. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.029.
2. *Hou J.* Structural Design for the Ice-Resistant Platform / J. Hou, W. Shao // The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference. — OnePetro, 2014. — Pp. 1118–1124.
3. *Zhang D.* Risk analysis of jacket platforms under ice induced vibrations / D. Zhang, Q. Yue, B. Tong // 19th IAHR International Symposium on Ice Vancouver, British Columbia, Canada. — 2008. — Pp. 1277–1286.
4. *Ажермачев Г. А.* О воздействии льда на опоры морских платформ при его подвижке / Г. А. Ажермачев // Строительство и техногенная безопасность. — 2005. — № 12. — С. 6–9.
5. *Jordaan I.* Re-evaluation of ice loads and pressures measured in 1986 on the Molikpaq structure / I. Jordaan, J. Bruce, K. Hewitt, R. Frederking // POAC '11: Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. — Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2011. — № POAC11–130.

6. *Jordaan I.* Re-evaluation of ice loads on the Molikpaq structure measured during the 1985–86 season / I. Jordaan, K. Hewitt, R. Frederking // *Canadian Journal of Civil Engineering*. — 2018. — Vol. 45. — Is. 3. — Pp. 153–166. DOI: 10.1139/cjce-2016–0444.
7. *O'Rourke B. J.* Experimental Investigation of Oscillation of Loads in Ice High-Pressure Zones, Part 1: Single Indentor System / B. J. O'Rourke, I. J. Jordaan, R. S. Taylor, A. Gürtner // *Cold Regions Science and Technology*. — 2016. — Vol. 124. — Pp. 25–39. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.12.005.
8. *Abramian A. K.* On a simple oscillator problem describing ice-induced vibrations of an offshore structure / A. K. Abramian, S. A. Vakulenko, W. T. van Horssen // *Nonlinear Dynamics*. — 2019. — Vol. 98. — Is. 1. — Pp. 151–166. DOI: 10.1007/s11071-019-05179-z.
9. *Taylor R.* Fracture and damage during dynamic interactions between ice and compliant structures at laboratory scale / R. Taylor, T. Browne, I. Jordaan, A. Gürtner // *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. — American Society of Mechanical Engineers, 2013. — Vol. 6. — Paper No: OMAE2013–11070, V006T07A024. DOI: 10.1115/OMAEE2013–11070.
10. *Hossain R. B.* Characterization of high pressure zone (hpz) failure and linkages with structural response during medium-scale indentation tests / R. B. Hossain, R. S. Taylor // *Proceedings of the 25 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. — POAC, 2019.
11. *Nord T. S.* Ice force identification on the Nordströms-grund lighthouse / T. S. Nord, O. Øiseth, E. M. Lourens // *Computers & Structures*. — 2016. — Vol. 169. — Pp. 24–39. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.02.016.
12. *Zhang D.* Evaluation of ice-induced fatigue life for a vertical offshore structure in the Bohai Sea / D. Zhang, G. Wang, Q. Yue // *Cold Regions Science and Technology*. — 2018. — Vol. 154. — Pp. 103–110. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.05.012.
13. *Цуприк В. Г.* Методологический подход к анализу содержания проблемы определения надежности морских ледостойких оснований / В. Г. Цуприк // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. — 2014. — № S4–9. — С. 168–180.
14. *Анисимов О. С.* Методология: функция, сущность, становление (динамика и связь времен) / О. С. Анисимов. — М.: ЛМА, 1996. — 380 с.
15. *Карташев В. А.* Система ситем. Очерки общей теории и методологии / В. А. Карташев. — М.: «Прогресс-Академия», 1995. — 325 с.
16. *Цуприк В. Г.* Энергетическая концепция нормирования прочности льда для расчета ледовой нагрузки на вертикальные структуры / В. Г. Цуприк // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. — 2016. — Т. 279. — С. 85–105.
17. *Перегудов Ф. И.* Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. — М.: Высш. шк., 1989. — 320 с.

REFERENCES

1. Hossain, R., R. Taylor, and L. Moro. “An assessment of sensitivity of the self-excited modelling approach for simulating dynamic ice-structure interactions to changes in temperature and scale effects.” *Ocean Engineering* 165 (2018): 410–425. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.029.
2. Hou, Jinlin, and Weidong Shao. “Structural design for the ice-resistant platform.” *The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference*. OnePetro, 2014. 1118–1124.
3. Zhang, D., Q. Yue, and B. Tong. “Risk analysis of jacket platforms under ice induced vibrations”. *19th IAHR International Symposium on Ice Vancouver, British Columbia, Canada*. 2008. 1277–1286.
4. Azhermachev, G. A. “O vozdeistvii l'da na opory morskikh platform pri ego podvizhke.” *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'* 12 (2005): 6–9.
5. Jordaan Ian, Jonathon Bruce, Kevin Hewitt, and Robert Frederking. “Re-evaluation of ice loads and pressures measured in 1986 on the Molikpaq structure.” *POAC '11: Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2011. № POAC11–130.
6. Jordaan, Ian, Kevin Hewitt, and Robert Frederking. “Re-evaluation of ice loads on the Molikpaq structure measured during the 1985–86 season.” *Canadian Journal of Civil Engineering* 45.3 (2018): 153–166. DOI: 10.1139/cjce-2016–0444.

7. O'Rourke, Brian J., Ian J. Jordaan, Rocky S. Taylor, and Arne Gürtner. "Experimental Investigation of Oscillation of Loads in Ice High-Pressure Zones, Part 1: Single Indentor System." *Cold Regions Science and Technology* 124 (2016): 25–39. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.12.005.
8. Abramian, Andrei K., Sergei A. Vakulenko, and Wim T. van Horssen. "On a simple oscillator problem describing ice-induced vibrations of an offshore structure." *Nonlinear Dynamics* 98.1 (2019): 151–166. DOI: 10.1007/s11071-019-05179-z.
9. Taylor, Rocky, Tom Browne, Ian Jordaan, and Arne Gürtner. "Fracture and damage during dynamic interactions between ice and compliant structures at laboratory scale." *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Vol. 6. American Society of Mechanical Engineers, 2013. DOI: 10.1115/OMAE2013-11070.
10. Hossain, Ridwan B., and Rocky S. Taylor. "Characterization of high pressure zone (hpz) failure and linkages with structural response during medium-scale indentation tests." *Proceedings of the 25 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. 2019.
11. Nord, Torodd S., Ole Øiseth, and Eliz-Mari Lourens. "Ice force identification on the Norströmsgrund lighthouse." *Computers & Structures* 169 (2016): 24–39. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.02.016.
12. Zhang, Dayong, Guojun Wang, and Qianjin Yue. "Evaluation of ice-induced fatigue life for a vertical offshore structure in the Bohai Sea." *Cold Regions Science and Technology* 154 (2018): 103–110. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.05.012.
13. Tsupryk, V.G. "The methodological approach to the analysis of the problem of determining the reliability of marine iceresistant platforms." *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)* S4–9 (2014): 168–180.
14. Anisimov, O. S. *Metodologiya: funktsiya, sushchnost', stanovlenie (dinamika i svyaz' vremen)*. M.: «LMA», 1996.
15. Kartashev, V. A. *Sistema sitem. Ocherki obshchei teorii i metodologii*. M.: «Progress-Akaemiya», 1995.
16. Tsuprik, V. G. "Energy concept of ice strength normalization for calculation of ice load on vertical structures." *Izvestiya Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* 279 (2016): 85–105.
17. Peregudov, F. I., and F. P. Tarasenko. *Vvedenie v sistemnyi analiz*. M.: Vysshaya shkola, 1989.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Цуприк Владимир Григорьевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Дальневосточный
федеральный университет»
690091, Российская Федерация,
г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: vg_tsuprik@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tsuprik, Vladimir G. —
PhD, associate professor
Far Eastern Federal
University
8 Sukhanova Str., Vladivostok,
690091, Russian Federation
e-mail: vg_tsuprik@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2021 г.
Received: November 29, 2021.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-832-841

COMPARATIVE ANALYSIS OF INDUSTRIAL UNDERWATER ACOUSTIC MODEMS

T. K. Sharafutdinova

Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, Peterhof, Russian Federation

The results of the current level of development of data transmission technology using underwater acoustic modems are presented in the paper. Underwater acoustic modems are widely used in the communication networks of underwater robotic vehicles. Such systems are designed to solve various problems in the study and monitoring of sea areas. The specificity of data transmission in an underwater acoustic channel is considered. The effects arising from the low speed of sound propagation in the underwater environment are described. Possibility of distortion due to multipath propagation and the Doppler Effect is indicated. An overview of existing underwater acoustic modems is presented. The main characteristics of underwater acoustic modems, such as bandwidth, range, data rate, modulation type, etc., are highlighted. The most important parameters that determine the tactical and technical characteristics of the modems are range and data rate. The empirical dependence of the data rate on the distance is revealed. The current maximum data rate in the underwater acoustic channel is given. The data given by the modem manufacturers correspond to the case of an ideal channel. The best manufacturers of the underwater acoustic modems are indicated. The features of the most common types of modulation are considered. Modulation using Sweep Spread Carrier technology is described in detail. This modulation allows you to compensate for the effect of multipath propagation and take into account the Doppler shift due to the motion subscribers of the underwater acoustic network. Spectrum spreading technology is considered. The applying of modulation using spread-spectrum technology improves the noise immunity of underwater acoustic modems. The need to formalize the calculation of the signal-to-noise ratio for the hydro acoustic data transmission channel is emphasized. The prospects for the development of data transmission technology using underwater acoustic modems are determined.

Keywords: underwater acoustic modem, underwater robotic vehicle, data rate, range, spread-spectrum technology.

For citation:

Sharafutdinova, Taisiia K. "Comparative analysis of industrial underwater acoustic modems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 832–841. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-832-841.

УДК 681.883

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МОДЕМОВ

Т. К. Шарафутдинова

ВМПИ ВУНЦ ВМФ ВМА им. Н. Г. Кузнецова,
Санкт-Петербург, Петергоф, Российская Федерация

В статье изложены результаты анализа современного уровня развития технологии передачи данных с использованием гидроакустических модемов, которые получили широкое распространение в подсистеме связи подводных робототехнических комплексов, предназначенных для решения различных задач по исследованию и мониторингу морских акваторий. Рассмотрена специфика передачи данных в подводном акустическом канале. Описаны эффекты, возникающие вследствие низкой скорости распространения звука в подводной среде. Указана возможность искажений вследствие многолучевого распространения

и доплеровского эффекта. Представлен обзор существующих подводных акустических модемов, в котором выделены их основные характеристики, такие как частотный диапазон, дальность действия, скорость передачи данных, тип модуляции и др. Показано, что одними из наиболее важных параметров, определяющих тактико-технические характеристики модемов, являются дальность действия и скорость передачи данных. Выявлена эмпирическая зависимость скорости передачи данных от дистанции. Приводится максимальная на сегодняшний день скорость передачи данных в подводном акустическом канале. Подчеркивается, что приведенные производителями данные соответствуют случаю идеального канала. Отмечены лучшие по приведенным характеристикам производители. Рассмотрены особенности наиболее распространенных типов модуляции. Подробно описана модуляция по технологии Sweep Spread Carrier, позволяющая бороться с эффектом многолучевого распространения и учитывать доплеровское смещение при движении абонентов гидроакустической сети. Рассмотрена технология расширения спектра. Показано, что применение модуляции по технологии расширения спектра позволяет повысить помехоустойчивость гидроакустических модемов. Подчеркивается необходимость формализации расчета соотношения сигнал – шум для гидроакустического канала передачи данных. Определены перспективы развития технологии передачи данных с использованием гидроакустических модемов.

Ключевые слова: гидроакустический модем, подводный робототехнический комплекс, скорость передачи данных, дальность действия.

Для цитирования:

Шарафутдинова Т. К. Сравнительный анализ промышленных гидроакустических модемов / Т. К. Шарафутдинова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 832–841. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-832-841.

Введение (Introduction)

В настоящее время подводная робототехника является быстро развивающейся областью прикладной науки и техники. Подводные робототехнические комплексы, предназначенные для решения различных задач по исследованию и мониторингу морских акваторий, могут быть использованы для обследования подводных объектов и локальных районов дна, батиметрической съемки, океанографических исследований и геологической разведки морского дна, поиска затонувших объектов, экологического мониторинга и других работ [1]–[3]. В подобного рода комплексах для передачи данных применяют гидроакустические модемы.

Разработка архитектуры и протоколов обмена в системах, использующих гидроакустический канал связи, является актуальной прикладной задачей. Ключевыми параметрами, которые в значительной мере определяют тактико-технические характеристики подводных робототехнических комплексов, являются дальность действия и скорость передачи данных используемого каналобразующего оборудования.

Целью работы является сравнительный анализ промышленных гидроакустических модемов и выявление эмпирических зависимостей скорости передачи данных от дальности действия для наиболее распространенных типов модуляции. Гидроакустические модемы условно можно разделить на две категории в зависимости от их рабочих частот: низкочастотные и высокочастотные (рис. 1). Низкочастотные модемы используются преимущественно на больших дистанциях связи в низком частотном диапазоне, что приводит к низкой скорости передачи данных. Высокочастотные модемы обеспечивают широкую полосу частот и большие скорости, однако высокочастотные колебания быстрее затухают при распространении в водной среде. Для того чтобы увеличить дальность действия гидроакустического модема, необходимо понизить рабочую частоту, вследствие чего будет сужаться доступная полоса частот.

В работе [4] приводится доказательство того, что расширение радиуса действия модемов при одновременном повышении скорости обмена (или хотя бы сохранение скорости обмена на достаточном уровне) возможно лишь за счет увеличения числа гидроакустических модемов (узлов гидроакустической сети), образующих сеть подводной связи и работающих на сравнительно высоких частотах.



Рис. 1. Две категории модемов

На этапе разработки протоколов обмена и проектирования архитектуры наличие эмпирических описаний функциональной зависимости скорости передачи как функции от расстояния позволяет существенным образом упростить процесс системной интеграции и оптимизации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Предлагаемое исследование содержит результаты анализа современного уровня развития технологии передачи данных с использованием гидроакустических модемов. Приведены характеристики промышленных гидроакустических модемов следующих производителей: LinkQuest¹, DSPComm², EvoLogics³, Unavlab⁴, Teledyne Benthos⁵, WHOI⁶, Aquasent и др. [4]–[6]. Эти данные были использованы для сравнительного анализа влияния используемого типа модуляции на зависимость: *скорость – дальность*. Кроме того, были получены универсальные эмпирические описания функциональной зависимости скорости передачи данных как функции от дальности для всего диапазона используемых в настоящее время на практике решений.

В силу актуальности направления известно большое количество научно-исследовательских разработок [7]–[10], которые доводятся, в лучшем случае, до уровня создания опытных образцов. В соответствии с поставленной задачей в предлагаемой статье рассматриваются параметры только промышленных модемов.

Результаты (Results)

В таблице приведены данные по гидроакустическим модемам различных производителей, откуда следует, что производители модемов не приводят данные по отношению сигнал/шум (Signal to Noise Ratio — SNR) для указанных ранее моделей. Таким образом, данные характеристики следует интерпретировать для случая идеального канала. Расстояние и скорость передачи данных, указанные для модемов, являются максимальными расстоянием и скоростью, достижимыми в идеальных условиях. Тем не менее табличные данные являются полезными в качестве «стартовой точки» для сравнительного анализа используемых, а значит, и проверенных практикой решений.

¹ LinkQuest, Inc. Underwater acoustic modems. URL: <https://www.link-quest.com/html/models1.htm>.

² DSPComm devices features. URL: <https://www.dspcommgen2.com/aquacomm-underwater-wireless-modem>.

³ EvoLogics acoustic Modems features. URL: <https://evologics.de/acoustic-modems>.

⁴ UnavLab. Передача данных под водой. URL: <https://www.unavlab.com/produktsiya/peredacha-dannyh-pod-vodoj>.

⁵ Acoustic Communications. URL: <http://www.teledynemarine.com/acoustic-modems>.

⁶ Woods Hole Oceanographic Institution. URL: <http://acomms.whoi.edu/micro-modem>.

Технические характеристики гидроакустических модемов

Производитель, модель (страна)	Частотный диапазон, кГц	Дальность передачи, м	Скорость передачи, кбит/с	Потребляемая мощность, Вт	Модуляция
LinkQuest (США)					
UWM1000	26,77–44,62	350	19,2	TM 1–2; RM 0,75; SM 0,008	BASS
UWM2000	26,77–44,62	1500	19,2	TM 2–8; RM 0,8; SM 0,008	
UWM2000H	26,77–44,62	1200	17,8	TM 2–8; RM 0,8; SM 0,008	
UWM2200	53,55–89,25	1000	38,4	TM 6; RM 1; SM 0,012	
UWM3000	7,5–12,5	3000	5	TM 3–12; RM 0,8; SM 0,008	
UWM4000	12,75–21,25	4000	9,6	TM 7; RM 0,8; SM 0,008	
UWM10000	7,5–12,5	10000	5	TM 40; RM 0,9; SM 0,009	
Aquasent (США)					
AM-AUV	21–27	5000	0,375	TM 25; RM 0,8; SM 0,12	OFDM
AM-D2000	9–15	5000	0,750		
AM-OFDM-13A	21–27	5000	1,5		
EvoLogics (Германия)					
S2C M HS	120–180	300	62,5	TM 8.5; RM 0.8; SM 0,005	S2C
S2C R 48/78	48–78	1000	31,2	TM 60; RM 0,8; SM 0,0025	
S2C R 42/65	42–65	1000	31,2	TM 40; RM 0,8; SM 0,0025	
S2C R 18/34	18–34	3500	13,9	TM 65; RM 0,8; SM 0,0025	
S2C R 15/27	15–27	6000	9,2	TM 65; RM 0,8; SM 0,0025	
S2C R 12/24	13–24	6000	9,2	TM 57; RM 0,8; SM 0,0025	
S2C R 7/17	7–17	8000	6,9	TM 45; RM 0,8; SM 0,0025	
Unavlab (Россия)					
uWave	10–30	1000	0,078	TM 6; RM 0,33	–
Redline	5–15	8000	0,080	TM 10; RM 0,4	
RedGTR	5–15	8000	–	TM 25; RM 0,33	
DSPComm (Великобритания)					
Aquacomm	16–30	5000	0,48	TM 24; RM 2,4; SM 0,150	DSSS/ OFDM
Aquacomm Gen2	16–30	8000	1	TM 60; RM 6; SM 0,02	
Teledyne Benthos (США)					
ATM-900 Series	9–14 (LF)	2000–6000	0,08 (FHSS)	TM 20; RM 0,72; SM 0,012	FHSS, MFSK, PSK
	16–21 (MF)	2000–6000	0,14–2,4 (MFSK)	TM 28; RM 0,72; SM 0,012	
	22–27 (Band C)	2000–6000	2,65–15,36 (PSK)	TM 30; RM 0,72; SM 0,012	
WHOI (США)					
Micron Modem	20–28	500	0,04	TM 7,92; RM 0,72	FH / FSK

Примечания: TM — Transmit Mode — режим передачи; RM — Receive Mode — режим приема; SM — Sleep Mode — спящий режим.

Характеристики (скорость / дальность) зависят от следующих факторов: состояния среды; наличия шума; протоколов, применяемых на различных уровнях; типа используемой модуляции на физическом уровне и др. Водная среда как среда передачи накладывает ряд существенных ограничений на доступные для использования максимальные частоты. При дальности масштаба более 1 км такое ограничение частоты наблюдается на уровне $F_{\max} < 50$ кГц. Это связано, в первую очередь, с существенным рассеянием сигнала с повышением частоты, что приводит к наличию ограничений на максимально достижимые даже в теории скорости передачи данных. Однако для ряда практически важных применений не требуется большой дальности. Это потенциально открывает возможность увеличения частоты и, соответственно, скорости передачи данных. Промышленный модем этого класса S2C M HS (EvoLogics) использует частоты 120–180 кГц, обеспечивая скорость передачи данных 62,5 кБит/с на расстоянии 300 м.

Один из ведущих американских производителей LinkQuest для передачи данных со скоростью до 38,4 кбит/с на расстоянии 1 км использует в модемах UWM2200 частоты 53,55–89,25 кГц. На рис. 2 приведена зависимость *скорость – дальность* для различных типов модуляции.

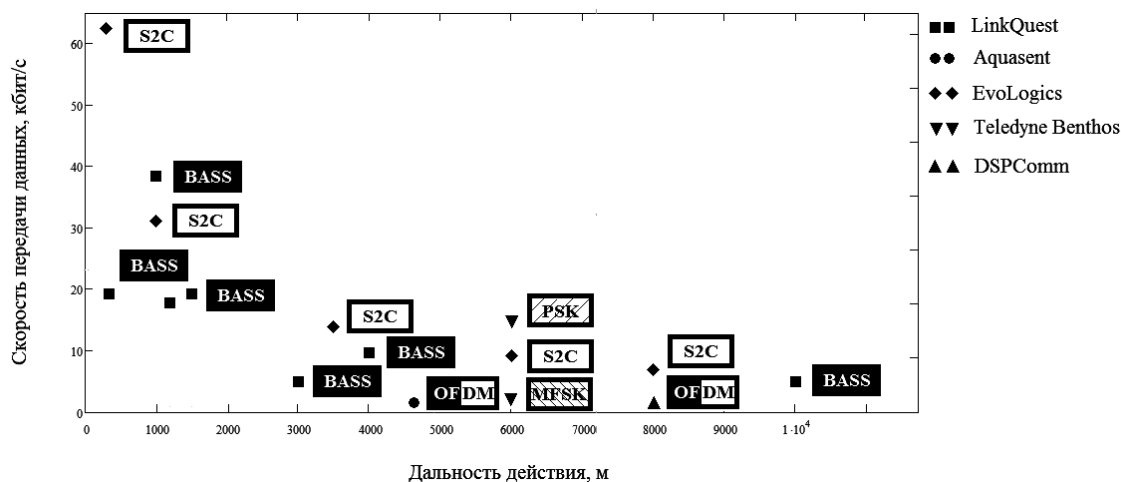


Рис. 2. Соотношение между скоростью передачи данных и дальностью действия при различных типах модуляции

Данные, приведенные в таблице и на рис. 2, были обработаны с целью получения эмпирических зависимостей. По известным точкам была выполнена аппроксимация для двух типов модуляции S2C и BASS производителей EvoLogics и LinkQuest соответственно (рис. 3).

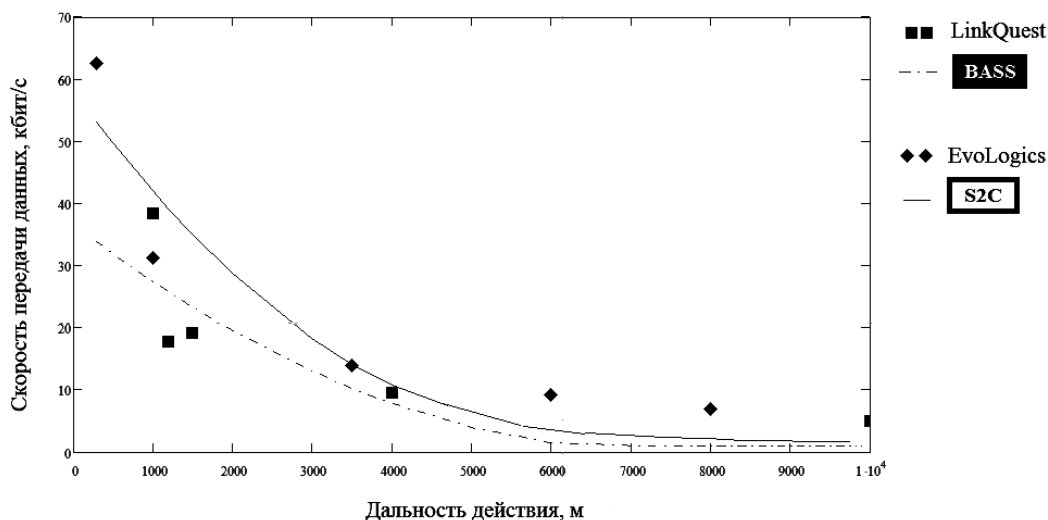


Рис. 3. Зависимость скорости передачи данных от дальности действия для модемов с модуляцией S2C и BASS

Аппроксимация позволяет более наглядно показать зависимость скорости передачи данных от дальности действия модемов. Полученные характеристики подтверждают эмпирическое правило: скорость передачи данных уменьшается приблизительно на 2–5 кбит/с на расстоянии, равном 1 км. При этом максимально достигнутая скорость передачи данных составляет 62,5 кбит/с.

При этом следует отметить, что в приведенных на рис. 3 зависимостях не учитываются отношения сигнал / шум и поэтому они относятся к случаю идеального канала. Скорость передачи данных напрямую зависит от свойств окружающей среды: более высокий уровень шума, более высокая многолучевость, и, как следствие, более низкая скорость передачи данных.

Обсуждение (Discussion)

Как следует из рис. 2, наилучшие соотношения *скорость – дальность* имеют модемы производителей EvoLogics и LinkQuest. Представляется целесообразным рассмотреть их особенности. В модемах EvoLogics на физическом уровне используется модуляция по технологии S2C (Sweep Spread Carrier). Технология частотной развертки несущей подразумевает использование сигнала, известного в русскоязычной технической литературе под названием *сигнал с линейной частотной модуляцией*.

Модуляция S2C строится на бионических принципах коммуникации дельфинов, вся совокупность акустической сигнализации которых может быть разделена на три категории:

- 1) широкополосные щелчки (Clicks), излучаемые, как правило, сериями;
- 2) тональные сигналы (свисты — Whistles);
- 3) импульсно-тональные сигналы (Burst-Pulses).

В работе [11] показано, что «свисты» представляют собой узкополосные частотно-модулированные сигналы длительностью до нескольких секунд, частота их основного тона обычно находится в пределах 3–25 кГц.

Запатентованная модуляция S2C [12] предназначена для борьбы с проблемой многолучевого распространения в подводном акустическом канале. Эта проблема возникает при передаче через неоднородные среды, в которых отправленный сигнал может отражаться от различных поверхностей и / или искажаться либо рассеиваться на ее границах. В неоднородной среде сигнал распространяется не только по прямому пути, но и при переотражении от объектов, т. е. более длинными путями.

Многолучевое распространение может вызывать ряд нежелательных эффектов. Сигналы, доходя до приемника разными путями, будут испытывать, соответственно, разные временные задержки. Таким образом, каждый из компонентов многолучевого распространения вносит свой «вклад» в приемник, где они перекрываются. Подобное перекрытие компонентов может привести к искажениям, а в наиболее неблагоприятном случае — к потере информации.

Особенность частотной модуляции заключается в использовании импульсных сигналов, несущая частота которых в течение определенной ширины импульса непрерывно изменяется в определенном диапазоне (рис. 4). Такие сигналы обеспечивают благоприятное распределение энергии в полосе пропускания, что делает их устойчивыми к помехам, способствует хорошему распознаванию и улучшению отношения сигнал / шум [13].

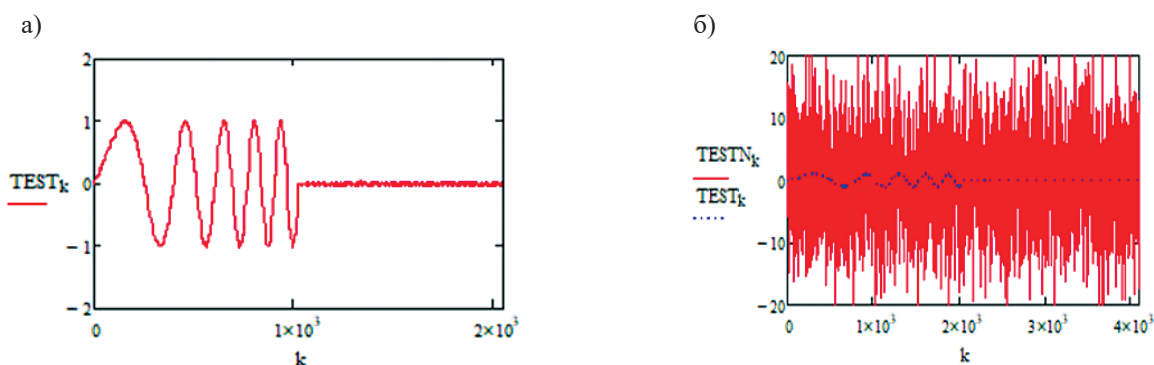


Рис. 4. Эталонный (а) и зашумленный (б) сигнал с линейной частотной модуляцией

Метод S2C дополнительно предполагает возможность распознавания и анализа доплеровского сдвига путем измерения отклонения преобразованной несущей частоты от ожидаемого номинального значения. Такая конфигурация особенно полезна для связи между быстро движущимися абонентами гидроакустической связи. Данный метод обеспечивает значительное улучшение обработки, позволяя четко разделить появление акустических волн при многолучевом распространении за счет преобразования их временных задержек в перераспределение частот.

Основная важная особенность рассматриваемого метода заключается в том, что фильтрация происходит не во времени, а в частотной области. Используя свойство распространения акустических сигналов под водой с относительно низкой скоростью, этот метод позволяет распределить все приходы многолучевого распространения в частотно-временной области путем преобразования их временных задержек в частотные перераспределения при условии применения достаточно крутых разверток.

В модемах LinkQuest используется запатентованная технология BASS (Broadband Acoustic Spread Spectrum). Информация о данном типе модуляции в открытой печати не приводится. Для возможности оценки деталей рассмотрим описание технологии Spread Spectrum как более общего класса методов, к которому относится BASS. Технология расширения спектра (Spread Spectrum) — это класс методов передачи одного сигнала с использованием относительно широкого сегмента спектра. В данной технологии сигнал занимает полосу частот существенно большую, чем необходимо для передачи информации с данной скоростью при использовании данного типа модуляции. Непосредственно расширение спектра производится с помощью некоторого расширяющего кода. В приемнике происходит обратное сужение спектра с использованием синхронизированной копии расширяющего кода [14]. Данная технология имеет ряд важных преимуществ по сравнению с другими типами связи, которые используют единственный узкий канал. Поскольку сигналы работают в относительно широкой полосе частот, они не чувствительны к узкополосным помехам. Неавторизованному пользователю может быть чрезвычайно сложно перехватить и декодировать содержимое сигнала. Также технология расширения спектра устойчива к многолучевому распространению.

Компанией LinkQuest представлена линейка устройств с различными параметрами дальности действия и полосами занимаемых частот. Скорость передачи данных этих модемов достигает значения 38,4 кбит/с. Максимальная дальность действия 10 км достигается в модеме UWM10000 при скорости передачи данных 5 кбит/с. В модемах имеется функция автоматической адаптации скорости. Несмотря на то, что модем работает со стандартной высокой скоростью передачи данных, он автоматически переключается на более низкую скорость передачи данных в условиях помех. Когда шумовые условия улучшаются, модем снова переключается на высокую скорость передачи данных [15].

Заключение (Conclusion)

Сравнительный анализ акустических модемов показывает, что производительность системы зависит от соответствующих типов модуляции, аппаратной реализации, рабочего диапазона частот и потребляемой мощности. Коммерческие модели могут достигать большой дальности действия с высоким потреблением энергии, что, как следствие, оказывает влияние на размеры устройства. Модели с низкой скоростью передачи данных, как правило, имеют меньшие размеры и легко могут быть установлены на подводных роботах. Таким образом, приведенные данные позволяют утверждать следующее:

- в настоящее время наилучшее соотношение *скорость* – *дальность* обеспечивают гидроакустические модемы производителей EvoLogics и LinkQuest;
- лучшими и проверенным на практике являются модуляции S2C и BASS;
- эмпирическое правило для идеального канала: скорость передачи данных по гидроакустическому каналу уменьшается приблизительно на 2–5 кбит/с на каждый километр дальности при максимальной достигнутой в настоящее время скорости передачи данных, составляющей 62,5 кбит/с. При использовании предлагаемого эмпирического правила для разрабатываемых гидроакустических

модемов следует учитывать ряд существенных ограничений. Важно, что предельная дальность передачи данных существенным образом зависит от соотношения SNR.

В таблице (с. 835) приведены данные производителей, которые не предоставляют информацию об условиях тестирования. В этой ситуации естественно считать, что приведенные данные соответствуют передаче по идеальному каналу с соотношением $\text{SNR} \gg 1$. Следует отметить, что для заданного уровня шумов увеличение дальности обеспечивается при увеличении мощности для передачи сигнала, но это относится к вновь разрабатываемой каналаобразующей аппаратуре. Кроме того, скорость передачи данных в цифровом формате зависит от соотношения BER (Bit Error Rate) — параметра, оказывающего существенное влияние на реализацию транспортного уровня протокола: передачу сигнала с контролем целостности данных, подтверждением, перезапросом и т. д.

Представленные в исследовании данные позволяют утверждать, что для создания отечественной гидроакустической аппаратуры в настоящее время актуальными научно-техническими задачами являются следующие:

- разработка и формализация методики расчета соотношения *сигнал – шум* для гидроакустического канала передачи данных;
- создание методики и стендового оборудования для тестирования;
- разработка безразмерных моделей передачи данных, обеспечивающих возможность сокращения размеров стендового оборудования за счет проведения тестов на малых уровнях используемой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубченко Э. С. Перспективы использования автономных подводных необитаемых аппаратов для обеспечения ВМФ гидрографической и океанологической информацией / Э. С. Зубченко, А. М. Шарков // Навигация и гидрография. — 2014. — № 37. — С. 59–65.
2. Инзарцев А. В. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике / А. В. Инзарцев [и др.] // Подводные исследования и робототехника. — 2007. — № 2(4). — С. 5–14.
3. Быкова В. С. Стенд для отработки системы управления автономного необитаемого подводного аппарата / В. С. Быкова [и др.] // Материалы конференции «Управление в морских системах» (УМС-2020). 13-я мультиконференция по проблемам управления. — СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. — С. 42–44.
4. Кеббал К. Г. Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования / К. Г. Кеббал, А. И. Машонин, Н. В. Мороз // Гироскопия и навигация. — 2019. — Т. 27. — № 2 (105). — С. 106–135. DOI 10.17285/0869–7035.2018.27.2.106–135.
5. Пат. 2655702 Российская Федерация, МПК H04R 1/44. Гидроакустическое устройство / А. В. Дикарев, С. М. Дмитриев; заяв. и патентообл. ООО «Лаборатория подводной связи и навигации». — № 2017110037; заявл. 27.03.2017; опубл. 29.05.2018. Бюл. № 16. — 10 с.
6. Annalakshmi G. Underwater Acoustic Modem — Challenges, Technology and Applications — A Review Survey / G. Annalakshmi, M. Sakthivel Murugan // Oceanography & Fisheries Open Access Journal. — 2017. — Vol. 2. — Is. 4. — Pp. 60–69. DOI: 10.19080/OFOAJ.2017.02.555592.
7. Benson B. Design of a low-cost underwater acoustic modem / B. Benson, Y. Li, B. Faunce, K. Domond, D. Kimball, C. Schurgers, R. Kastner // IEEE Embedded Systems Letters. — 2010. — Vol. 2. — Is. 3. — Pp. 58–61. DOI: 10.1109/LES.2010.2050191.
8. Sendra S. Underwater wireless communications in freshwater at 2.4 GHz / S. Sendra, J. Lloret, J. J. Rodriguez, J. M. Aguiar // IEEE Communications Letters. — 2013. — Vol. 17. — Is. 9. — Pp. 1794–1797. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.072313.131214.
9. Вершинин А. С. Сравнительный анализ гидроакустических модемов / А. С. Вершинин // Молодой ученый. — 2015. — № 12 (92). — С. 156–161.
10. Demirors E. A high-rate software-defined underwater acoustic modem with real-time adaptation capabilities / E. Demirors, G. Sklivantis, G. E. Santagati, T. Melodia, S. N. Batalama // IEEE Access. — 2018. — Vol. 6. — Pp. 18602–18615. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2815026.
11. Агафонов А. В. Свисты и импульсно-тональные сигналы: две системы акустической коммуникации афалин: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.10: защищена 15.02.2018; утв. 10.01.2018 / Александр Владиславович Агафонов. — М.: ФГБУ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 2017. — 178 с.

12. Pat. 6985749 B2 United States, H04B1/707, H04B14/026, H04L1/04, H04L25/4902, H04L27/10, H04L27/32, H04L5/02, H04B2001/6912. Method and devices for transmitting and receiving information / R. Bannash, K. Kebkal. — US20030022651A1; Declared 30.01.2003; publ. 10 Jan. 2006.

13. Kebkal K. G. Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation / K. G. Kebkal, R. Bannasch // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 2002. — Vol. 112. — Is. 5. — Pp. 2043–2052. DOI: 10.1121/1.1504855.

14. Сергиенко А. Б. Цифровая связь / А. Б. Сергиенко. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. — 165 с.

15. Yu X. Wireline Quality Underwater Wireless Communication Using High Speed Acoustic Modems / X. Yu // *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37158)*. — IEEE, 2000. — Vol. 1. — Pp. 417–422. DOI: 10.1109/OCEANS.2000.881294.

REFERENCES

1. Zubchenko, E. S., and A. M. Sharkov. “Perspektivy ispol’zovaniya avtonomnykh podvodnykh neobitaemykh apparatov dlya obespecheniya VMF gidrograficheskoy i okeanologicheskoy informacii.” *Navigatsiya i gidrografiya* 37 (2014): 59–65.

2. Inzartsev, A. V., A. V. Kamornyi, O. Yu. L’vov, Yu. V. Matvienko, and N. I. Rylov. “Primenenie avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata dlya nauchnykh issledovaniy v Arktike.” *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* 2(4) (2007): 5–14.

3. Bykova, V. S., I. V. Pashkevich, L. A. Martynova, and A. I. Mashonin. “Stend for testing the control system of an autonomous unmanned underwater vehicle.” *Materialy konferentsii «Upravlenie v morskikh sistemakh» (UMS-2020). 13-ya mul’tikonferentsiya po problemam upravleniya*. SPb.: “Kontsern “Tsentral’nyi nauchno-issledovatel’skii institut “Elektropribor”, 2020. 42–44.

4. Kebkal, K. G., A. I. Mashoshin, and N. V. Morozs. “Solutions for underwater communication and positioning network development.” *Gyroscopy and Navigation* 2(105) (2019): 106–135. DOI: 10.17285/0869–7035.2018.27.2.106–135.

5. Dikarev, A. V., and S. M. Dmitriev. RU 2 655 702, IPC H04R 1/44. Gidroakusticheskoe ustrojstvo. Russian Federation, assignee. Publ. 29 May 2018.

6. Annalakshmi, G., and S. Sakthivel Murugan. “Underwater Acoustic Modem-Challenges, Technology and Applications-A Review Survey.” *Oceanography & Fisheries Open Access Journal* 2.4 (2017): 60–69. DOI: 10.19080/OFOAJ.2017.02.555592.

7. Benson, Bridget, Ying Li, Brian Faunce, Kenneth Domond, Don Kimball, Curt Schurgers, and Ryan Kastner. “Design of a low-cost underwater acoustic modem.” *IEEE Embedded Systems Letters* 2.3 (2010): 58–61. DOI: 10.1109/LES.2010.2050191.

8. Sendra, Sandra, Jaime Lloret, Joel J. P. C. Rodrigues, and Javier M. Aguiar. “Underwater wireless communications in freshwater at 2.4 GHz.” *IEEE Communications Letters* 17.9 (2013): 1794–1797. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.072313.131214.

9. Vershinin, A. S. “Sravnitel’nyy analiz gidroakusticheskikh modemov.” *Young Scientist* 12(92) (2015): 156–161.

10. Demirors, Emrecan, George Sklivanitis, G. Enrico Santagati, Tommaso Melodia, and Stella N. Batalama. “A high-rate software-defined underwater acoustic modem with real-time adaptation capabilities.” *IEEE Access* 6 (2018): 18602–18615. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2815026.

11. Agafonov, A. V. *Svisty i impul’sno-tonal’nye signaly: dve sistemy akusticheskoy kommunikatsii afalin*. PhD diss. M.: FGBU Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN, 2017.

12. Bannash, R., and K. Kebkal. US 6985749 B2, IPC H04B1/707, H04B14/026, H04L1/04, H04L25/4902, H04L27/10, H04L27/32, H04L5/02, H04B2001/6912. Method and devices for transmitting and receiving information. United States, assignee. Publ. 10 Jan. 2006.

13. Kebkal, Konstantin G., and Rudolf Bannasch. “Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation.” *The Journal of the Acoustical Society of America* 112.5 (2002): 2043–2052. DOI: 10.1121/1.1504855.

14. Sergienko, A. B. *Cifrovaya svyaz’*. SPb.: SPbGETU «LETI», 2012.

15. Yu, Xiaolong. “Wireline quality underwater wireless communication using high speed acoustic modems.” *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37158)*. Vol. 1. IEEE, 2000. 417–422. DOI: 10.1109/OCEANS.2000.881294.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шарафутдинова Таисия Константиновна —
преподаватель
ВМПИ ВУНЦ ВМФ ВМА им. Н. Г. Кузнецова
198514, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
г. Петергоф, ул. Разводная, д. 15.
e-mail: *sharafutdinova.taya@yandex.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sharafutdinova, Taisiia K. —
Lecturer
Kuznetsov Naval Academy
15 Razvodnaya Str., St. Petersburg, Peterhof,
198514, Russian Federation
e-mail: *sharafutdinova.taya@yandex.ru*

*Статья поступила в редакцию 21 октября 2021 г.
Received: October 21, 2021.*

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-842-848

IMPROVING THE PROPERTIES OF MARINE FUEL BY ULTRASONIC PROCESSING

N. A. Pivovarova, Yu. Sh. Bayramova, G. V. Vlasova

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

The economic performance of ship power plants is directly dependent on fuel consumption. Consumption is determined by the completeness of fuel combustion, which is influenced by many factors, one of which is the component composition. High molecular weight compounds, resins and asphaltenes contained in marine fuels are poorly flammable. They also form a coarse dispersed phase in the fuel, which complicates the process of hydrocarbon oxidation and leads to a decrease in its efficiency. It is known that ultrasonic influences increase the degree of fuels dispersion. The purpose of the work is to identify the regularities of ultrasound effect on the physicochemical indicators of distillate marine fuel of the DMA brand, which determine its operational properties: flammability, combustibility and pumpability. Experimental studies on the processing of marine fuel are carried out on ultrasonic devices LUK-0.125/50-O and Volna UZTA-0.4/22–014 at a frequency of 50 and 22 kHz, respectively. For the theoretical substantiation of the observed effects, changes in the dispersed and structural-group composition of marine fuel are studied. The analysis of indicators in accordance with the regulatory documents is carried out. The greatest changes in all studied parameters are noted at an ultrasonic vibration frequency of 50 kHz. It is found that, in comparison with the initial sample, the kinematic viscosity decreases by 15 % after ultrasound exposure. The fuel density decreases by 0.002 kg / m³, the flash point of the fuel drops by 5 °C, and the cetane number shows a tendency to decrease by 2 points. The average particle size of the dispersed phase decreases by 12 %. An explanation for the improvement of the investigated fuel indicators on the basis of an increase in its degree of dispersion and redistribution of structural-group components is proposed. Ultrasonic treatment of marine fuel (50 kHz, 100 W, 43 s), carried out before feeding it to the engine on the fuel line in front of the filter and high-pressure pumps, can be used to improve the operational properties of the fuel and, consequently, reduce its consumption.

Keywords: ultrasonic treatment, properties of marine fuel, fuel consumption, oil dispersed system, degree of fuel dispersion.

For citation:

Pivovarova, Nadezhda A., Yulia Sh. Bayramova, and Galina V. Vlasova. "Improving the properties of marine fuel by ultrasonic processing." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 842–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-842-848.

УДК 665.6/.7+665.753.4+66.084.8+66.086.4

УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ СУДОВОГО ТОПЛИВА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

Н. А. Пивоварова, Ю. Ш. Байрамова, Г. В. Власова

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Российская Федерация

Исследованы экономические показатели работы судовых энергетических установок, зависящие от расхода топлива. Известно, что расход топлива определяется полнотой его сгорания, на которую оказывает существенное влияние компонентный состав. Высокомолекулярные соединения, смолы и асфальтены, содержащиеся в судовых топливах, обладают плохой воспламеняемостью, формируя грубую дисперсную фазу в топливе, которая затрудняет процесс окисления углеводородов и приводит к снижению его экономичности. Известно, что ультразвуковые воздействия способствуют увеличению степени дисперсности топлив. Целью работы является выявление закономерностей действия ультразвука на физико-химические показатели дистиллятного судового топлива марки DMA, определяющие его эксплуатационные свойства: воспламеняемость, горючесть и прокачиваемость. Экспериментальные исследования по обработке судового топлива

проводили на ультразвуковых аппаратах ЛУК-0,125/50- О и Волна УЗТА-0,4/22–014 при частоте 50 и 22 кГц соответственно. Для теоретического обоснования наблюдаемых эффектов исследовали изменения дисперсного и структурно-группового состава судового топлива. Анализ показателей проводили в соответствии нормативными документами. Наибольшие изменения всех исследованных показателей были отмечены при частоте ультразвуковых колебаний 50 кГц. Установлено, что по сравнению с исходным образцом после воздействия ультразвука кинематическая вязкость понизилась на 15 %. Плотность топлива уменьшилось на 0,002 кг/м³, температура вспышки топлива понизилась на 5 °С, а цетановое число показало тенденцию к понижению на два пункта. Средний размер частиц дисперсной фазы уменьшился на 12 %. Предложено объяснение улучшения исследованных показателей топлива на основании повышения его степени дисперсности вследствие перераспределения структурно-групповых компонентов. Ультразвуковая обработка судового топлива (50 кГц, 100 Вт, 43 с), осуществляемая перед подачей его в двигатель на топливопроводе перед фильтром и насосами высокого давления, может быть использована для улучшения эксплуатационных свойств топлива и, следовательно, снижения его расхода.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, свойства судового топлива, расход топлива, нефтяная дисперсная система, степень дисперсности топлива.

Для цитирования:

Пивоварова Н. А. Улучшение свойств судового топлива ультразвуковой обработкой / Н. А. Пивоварова, Ю. Ш. Байрамова, Г. В. Власова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 842–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-842-848.

Введение (Introduction)

Стоимость топлива является одной из основных статей затрат судоходных компаний (например, в себестоимости добываемой рыбопромысловым флотом рыбы она составляет около 20–40 %). Высокое потребление топлива ухудшает экономические показатели работы двигателя и увеличивает транспортные расходы [1]. Расход и полнота сгорания топлива определяются многими факторами, одним из которых является его компонентный и химический состав. Высокомолекулярные и полиароматические соединения, смолы и асфальтены, содержащиеся в судовых топливах повышенной плотности, обладают плохой воспламеняемостью и низкой скоростью горения. Они также формируют дисперсную фазу в топливе, которая, по мере увеличения размеров частиц, все больше затрудняет процесс окисления углеводородов, приводит к увеличению температуры отработанных газов двигателя и снижению его экономичности, а также ухудшению экологической обстановки.

Поиск и разработка новых эффективных технологических решений по обработке топлива и подготовке его к сгоранию (в том числе повышение дисперсности топлива) позволят повысить экономическую эффективность использования судовых двигателей и увеличить межремонтный период, снизить вредное влияние на окружающую среду, что является актуальной задачей, имеющей не только научное, но и практическое значение. Ранее в работах [2] и [3] была исследована эффективность низкоэнергетической технологии воздействия на топливо посредством постоянного магнитного поля в динамическом режиме. Показано, что преобразования дисперсного состава дизельных различного химического и дисперсного состава способствовали полноте сгорания, снижению расхода и уменьшению вредных выбросов с отработавшими газами.

Примерами низкоэнергетических технологий являются также ультразвуковые и кавитационные воздействия на нефтяные дисперсные системы. Установлено, что механические воздействия (ультразвук, кавитация, вибрация и т. п.), так же, как и магнитное поле, изменяют состав и структурно-механические свойства нефтепродуктов, оказывают влияние на процесс фазообразования [3]–[5]. При ректификации углеводородного сырья эти изменения фазового и дисперсного состава приводят к повышению выхода светлых нефтепродуктов в процессе первичной переработки нефти как при ультразвуковой, так и при кавитационной обработке [3].

Кавитационные воздействия для улучшения горения жидкого углеводородного топлива в устройствах для получения тепловой и механической энергии исследованы в работе [6]. Алгоритм испытаний заключался в следующем: сначала определяли количественное содержание компонентов, затем подогревали топливо до 35–40 °С, устанавливали скорость потока в пределах 20–40 см/с, прокачивали топливо через комбинированный универсальный статический смеситель-активатор,

где в первой секции вихревыми винтовыми потоками разрушаются кластеры топлива, в четырех кавитационных камерах второй секции предварительно диспергируются его частицы, а в третьей секции они окончательно диспергируются решетчатым фильтром, в четвертой секции пульсирующий турбулентный поток переводили в ламинарный с выровненной эпюрой скоростей, выдерживали обработанное топливо в емкости 50–60 дней, повторно определяли содержание компонентов и при выявлении не менее 20 % легких компонентов выдавали топливо в качестве товарного продукта [6]. Следует отметить многоступенчатость, непростое техническое оформление и значительную продолжительность такого вида кавитационной обработки.

Авторами [7] была проведена серия экспериментов, направленных на повышение качества сгорания дизельного топлива посредством ультразвуковой обработки на частоте 44 кГц (мощность 60 Вт). Динамическая вязкость дизельного топлива снизилась на 2 %, изменение плотности показало ее снижение с 830 кг/м³ до 828 кг/м³ через 30 с после обработки и до 825 кг/м³ после обработки в течение 60 с. Расход топлива на дизельном двигателе YANMAR 4TNV88-BGGE при оптимальном варианте подачи топлива в камеру снизился на 7,5–9 %.

Исследования по ультразвуковой обработке судовых топлив весьма немногочисленны, содержат неполную информацию по их свойствам и условиям обработки. Тем не менее есть основания полагать, что закономерности, наблюдаемые при ультразвуковой обработке дизельных топлив, будут также аналогично качественными и для дистиллятных судовых топлив. Однако утяжеление молекулярного и фракционного состава судовых топлив не может не оказать влияния на количественные результаты.

Целью настоящей работы является выявление закономерностей действия ультразвуковых колебаний при частотах 22 и 50 кГц и мощности 100 Вт на физико-химические показатели дистиллятного судового топлива марки DMA для улучшения его эксплуатационных свойств.

Методы и материалы (Methods and materials)

Обработку судового топлива проводили на ультразвуковых аппаратах ЛУК-0,125/50-О и Волна УЗТА-0,4/22–014 (ООО «Центр ультразвуковых технологий», г. Бийск). Устройство и принцип действия приведен в [8]. Частота ультразвуковых колебаний составляла 22 и 50 кГц соответственно. Мощность воздействия — 100 Вт, время пребывания топлива в зоне ультразвуковых колебаний — 43 ± 3 с.

В соответствии с ГОСТ 4.25–83 «Номенклатура показателей качества топлив. Показатели назначения» для исследования были выбраны следующие характеристики:

- кинематическая вязкость при температуре 40 °С, мм²/с (ГОСТ 33–2016);
- плотность при температуре 20 °С (ГОСТ ISO 3675–2014);
- цетановое число (экспресс-метод, анализатор SHATOX SX-300);
- температура вспышки в закрытом тигле (ГОСТ ISO 2719–2017).

Выбранные показатели характеризуют свойства воспламеняемости, горючести и прокачиваемости топлив. Анализ показателей проводили на соответствующем оборудовании по указанным нормативным документам и методам. Для теоретического обоснования наблюдаемых эффектов исследовали также структурно-групповой состав судового топлива по показателю преломления (ГОСТ 18995.2–73) и его дисперсный состав (средний размер частиц дисперсной фазы) [9]. Этот турбидиметрический метод определения дисперсности основан на измерении оптической плотности продукта при определенной длине волны проходящего света с помощью фотоэлектроколориметра. Если пренебречь поглощением света (в дистиллятных нефтепродуктах оно мало), а форму частиц принять за сферическую в соответствии с классическими представлениями [10], то, согласно закону Релея, интенсивности рассеянного и падающего света определяют оптическую плотность вещества и зависят от размера частиц дисперсной фазы. Топливо анализировали до обработки и сразу после нее. Все испытания проводили 2–3 раза.

Результаты (Results)

Экспериментально установлено, что при воздействии ультразвука кинематическая вязкость снижалась на 15 % по мере увеличения частоты обработки (погрешность определения 0,009 мм²/с).

Плотность топлива после ультразвуковой обработки снизилась по сравнению с исходным образцом на $0,002 \text{ кг/м}^3$ (погрешность измерения $0,00005 \text{ кг/м}^3$). Результаты представлены на рис. 1.

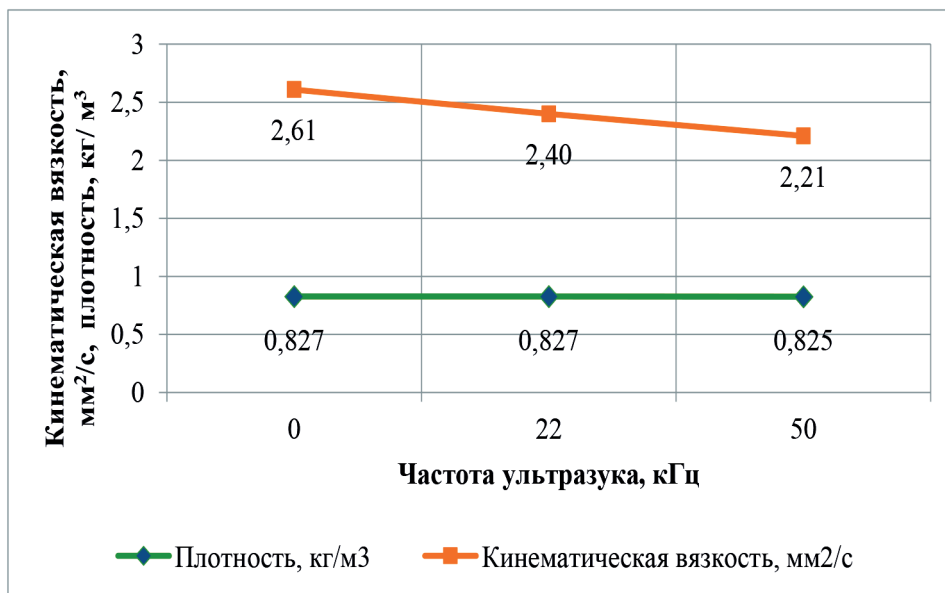


Рис. 1. Изменение плотности и кинематической вязкости топлива в зависимости от частоты ультразвука

Температура вспышки топлива в закрытом тигле снизилась с 72°C (исходное топливо) на пять градусов после обработки при 50 кГц (погрешность 2°C). Цетановое число (ЦЧ) имеет тенденцию к понижению (в пределах погрешности на два пункта). Результаты показаны на рис. 2.

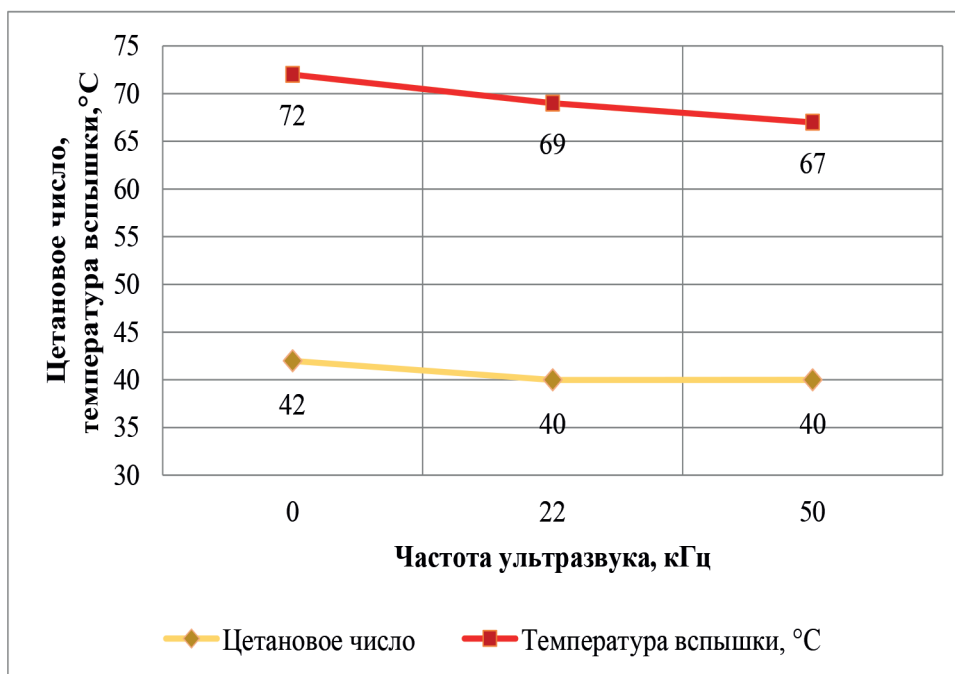


Рис. 2. Изменение цетанового числа и температуры вспышки в закрытом тигле судового топлива в зависимости от частоты ультразвука

Дисперсный состав судового топлива также изменяется. Воздействие ультразвука на топливо приводит к уменьшению среднего размера частиц дисперсной фазы по мере увеличения частоты ультразвука на 16 нм (погрешность измерения 4 нм), т. е. степень дисперсности нефтяной системы растет.

Показатель преломления также снижается (погрешность измерения 0,0002), что свидетельствует о перераспределении структурно-групповых компонентов в топливе. Изменения степени дисперсности (по размеру частиц дисперсной фазы) и показателя преломления показаны на рис. 3.

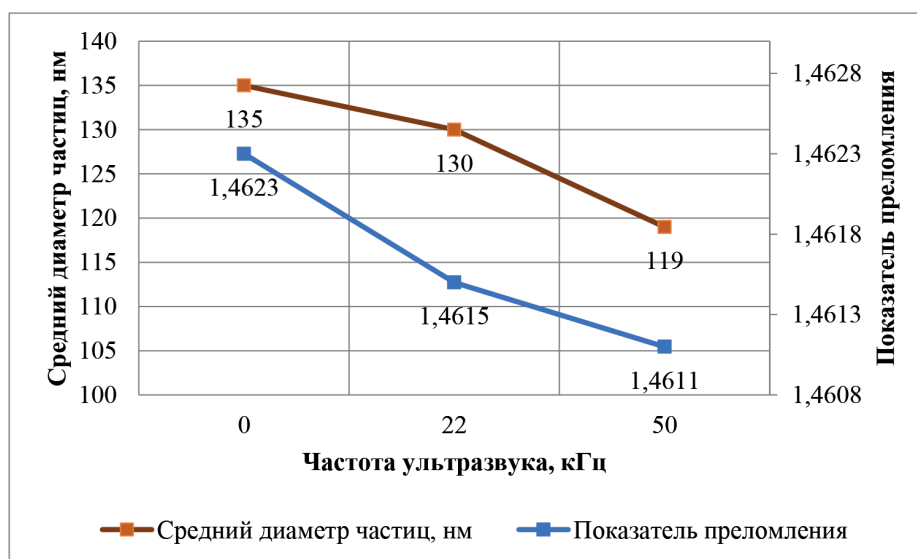


Рис. 3. Изменение среднего размера частиц дисперсной фазы и показателя преломления топлива в зависимости от частоты ультразвука

Обсуждение (Discussion)

Судовые топлива являются весьма неоднородными нефтяными системами разнообразного химического состава, состоящими из дисперсионной среды и дисперсной фазы, находящимися между собой в динамическом равновесии, зависящем от внешних воздействий. Дисперсную фазу можно представить в первом приближении в виде сферической частицы, условно состоящей из трех компонентов: ядра, внутреннего слоя и внешнего слоя. Внешние воздействия, в частности ультразвук, оказывают влияние в первую очередь на самый «уязвимый» внешний слой, который может частично разрушаться и переходить в дисперсионную среду [10]. При этом повышается дисперсность системы, что приводит к изменению физико-химических свойств.

Многочисленные исследования воздействия ультразвука на нефтяные дисперсные системы указывают на то, что гомогенность системы растет вследствие разукрупнения сложных структурных единиц (ССЕ) дисперсной фазы, которые разные авторы называют также агрегатами, кластерами, мицеллами, надмолекулярными структурами, ассоциатами, торами и т. д. [3]–[5], [8], [11]. Ранее было показано, что именно этим объясняется более полное сгорание дизельных топлив при воздействии на них низкоэнергетических волновых воздействий, таких как постоянное магнитное поле и ультразвук невысокой интенсивности [2], [3], [11].

Рассмотрим изменение исследованных показателей с позиций строения нефтяных дисперсных систем (НДС), а именно одного из основных показателей — дисперсного состава. Экспериментально установлено, что степень дисперсности повышается на 12 % за счет того, что размеры частиц уменьшаются, поскольку внешние оболочки частиц дисперсной фазы судового топлива или ССЕ, состоящие из полициклических нафтенных и нафтенно-ароматических углеводородов, высвобождаются в дисперсионную среду. Поэтому снижается показатель преломления, так как дисперсионная среда обогащается полициклическими нафтенными углеводородами, коэффициент преломления которых ниже.

Снижение вязкости также происходит вследствие увеличения гомогенности системы, но в данном интервале это благоприятно влияет на прокачиваемость топлива в топливоподающей аппаратуре, на процессы смесеобразования и, в конечном итоге, на полноту сгорания топлива. Плотность несколько снижается вследствие «саморазбавления» нефтяной дисперсной системы выходящими из оболочек ССЕ углеводородами нафтенного ряда. Уменьшение плотности также способствует более эффективному

распылению топлива, уменьшению размера капель топлива, лучшему смесеобразованию в камере внутреннего сгорания, более полному сгоранию, т. е. снижению его расхода.

Понижение температуры вспышки фазы способствует более интенсивному испарению и, следовательно, более полному сгоранию топлива. Наблюдаемую тенденцию к снижению цетанового числа (ЦЧ) можно объяснить обогащением дисперсионной среды полициклическими и нафтеноароматическими нафтеновыми углеводородами, имеющими меньшее значение ЦЧ. Однако значение этого показателя остается в рамках требования стандарта для данной марки топлива.

Наибольшие изменения всех исследованных показателей были отмечены при частоте ультразвуковых колебаний, равной 50 кГц (мощность 100 Вт). Таким образом, перестройка дисперсной структуры топлива при воздействии ультразвуковых колебаний при рассмотренных ранее условиях оказывает положительное влияние на все изученные физико-химические и эксплуатационные свойства, улучшает свойства топлива, способствует большему полному сгоранию топлив, создает условия для его более эффективного использования, в том числе снижения расхода.

Заключение (Conclusion)

Проведено исследование ультразвукового воздействия на физико-химические и эксплуатационные свойства судового топлива. Ультразвуковая обработка судового топлива (50 кГц, 100 Вт, 40–45 с), осуществляемая перед подачей его в двигатель на топливопроводе перед фильтром и насосами высокого давления, может быть использована для улучшения показателей свойств топлива и, следовательно, для повышения эффективности работы судовых энергетических установок и снижения расхода топлива. Достоинством ее является достаточно простое техническое исполнение, компактность, низкое энергопотребление, безреагентность, безопасность для персонала, а кроме того, ультразвуковое оборудование доступно, оно производится серийно для промышленного применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будин А. А. Основы технической эксплуатации флота / А. А. Будин. — Астрахань: ПКФ «Триада», 2018. — 346 с.
2. Пивоварова Н. А. Технология магнитной обработки топлив для дизелей рыбопромысловых и транспортных судов / Н. А. Пивоварова, А. Ф. Дорохов, Р. Велес Парра // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 941–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-941-950.
3. Pivovarova N. A. Use of Wave Effect in Processing of the Hydrocarbonic Raw Material / N. A. Pivovarova // Petroleum Chemistry. — 2019. — Vol. 59. — Is. 6. — Pp. 559–569. DOI: 10.1134/S0965544119060148.
4. Ануфриев Р. В. Влияние ультразвука на структурно-механические свойства нефтей и процесс осадкообразования / Р. В. Ануфриев, Г. И. Волкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2016. — Т. 327. — Is. 10. — Pp. 50–58.
5. Volkova G. I. Effect of ultrasonic treatment on the composition and properties of waxy high-resin oil / G. I. Volkova, R. V. Anufriev, N. V. Yudina // Petroleum Chemistry. — 2016. — Vol. 56. — Is. 8. — Pp. 683–689. DOI: 10.1134/S0965544116080193.
6. Пат. 2703600 Российская Федерация, МПК F02M 27/00. Способ уменьшения расхода жидкого углеводородного топлива в устройствах для получения тепловой и механической энергии / Ю. В. Воробьев, А. В. Дунаев, Ю. Ю. Воробьев, Г. С. Баронин; заяв. и патентообл. А. В. Дунаев. — № 2018111689; заявл. 02.04.2018; опубл. 03.10.2019, Бюл. № 30. — 9 с.
7. Пуков Р. В. Оценка времени нахождения топлива в зоне ультразвуковой обработки / Р. В. Пуков, С. В. Колупаев, А. С. Колотов, С. А. Кожин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее образование. — 2018. — № 2 (50). — С. 362–366.
8. Голых Р. Н. Ультразвук. Воздействие на системы с несущей жидкой фазой / Р. Н. Голых, В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, С. Н. Цыганок. — Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2018. — 276 с.
9. Зими́на С. Г. Усовершенствование метода определения дисперсности углеводородного сырья / С. Г. Зими́на, Н. А. Пивоварова // Научные труды АстраханьНИПИГАЗ. — 2006. — № 8. — С. 119.

10. Унгер Ф. Г. Фундаментальные и прикладные результаты исследования нефтяных дисперсных систем / Ф. Г. Унгер. — Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2011. — 264 с.
11. Хмелев В. Н. Ультразвук. Аппараты и технологии / В. Н. Хмелев [и др.]. — Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. — 688 с.

REFERENCES

1. Budin, A. A. *Fundamentals of technical operation of the fleet*. Astrakhan: PKF "Triada", 2018.
2. Pivovarova, Nadezhda A., Aleksandr F. Dorokhov, and Rikardo Velez Parra. "Technology of fuels magnetic processing for diesel engines of fishing and transport vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.5 (2019): 941–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-941-950.
3. Pivovarova, N. A. "Use of Wave Effect in Processing of the Hydrocarbon Raw Material." *Petroleum Chemistry* 59.6 (2019): 559–569. DOI: 10.1134/S0965544119060148.
4. Anufriev, Roman V., and Galina I. Volkova. "Influence of ultrasonic treatment on structuralmechanical properties of oil and sedimentation." *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 327.10 (2016): 50–58.
5. Volkova, G. I., R. V. Anufriev, and N. V. Yudina. "Effect of ultrasonic treatment on the composition and properties of waxy high-resin oil." *Petroleum Chemistry* 56.8 (2016): 683–689. DOI: 10.1134/S0965544116080193.
6. Vorobiev, Yu. V., A. V. Dunaev, Yu. Yu. Vorobiev, and G. S. Baronin. RU 2 703 600, IPC F02M 27/00. Method of reducing the consumption of liquid hydrocarbon fuel in devices for generating thermal and mechanical energy. Russian Federation, assignee. Publ. 3 October 2019.
7. Pukov, R. V., S. V. Kolupaev, A. S. Kolotov, and S. A. Kozhin. "Estimation of the fuel looking time in ultrasonic treatment zone." *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex* 2(50) (2018): 362–366.
8. Golykh, R. N., V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, and S. N. Tsyganok. *Ul'trazvuk. Vozdeistvie na sistemy s nesushchei zhidkoi fazoi*. Biisk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta, 2018.
9. Zimina, S. G., and N. A. Pivovarova. "Usovershenstvovanie metoda opredeleniya dispersnosti uglevodorodnogo syr'ya." *Nauchnye trudy Astrakhan'NIPIGAZ* 8 (2006): 119.
10. Unger, F. G. *Fundamental'nye i prikladnye rezul'taty issledovaniya neftyanykh dispersnykh sistem*. Ufa: Izd-vo GUP INKhP RB, 2011.
11. Khmelev, V. N., A. V. Shalunov, S. S. Khmelev, and S. N. Tsyganok. *Ul'trazvuk. Apparaty i tekhnologii*. Biisk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta, 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пивоварова Надежда Анатольевна — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, 16, корп. 4
e-mail: nadpivov@live.ru

Байрамова Юлия Ширбалаевна — инженер
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, 16, корп. 4
e-mail: bair567897@gmail.com

Власова Галина Владимировна — кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, 16, корп. 4
e-mail: ranec2003@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pivovarova, Nadezhda A. — Dr. of Technical Sciences, professor
Astrakhan State Technical University
16/4 Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: nadpivov@live.ru

Bayramova, Yulia Sh. — Engineer
Astrakhan State Technical University
16/4 Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: bair567897@gmail.com

Vlasova, Galina V. — PhD, associate professor
Astrakhan State Technical University
16/4 Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: ranec2003@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 июня 2021 г.
Received: June 25, 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-849-857

NUMERICAL SIMULATION OF THE VELOCITY COEFFICIENT OF THE NOZZLE DIAPHRAGM OF A LOW-CONSUMPTION TURBINE

A. A. Kryukov

Far Eastern State Technical Fisheries University,
Vladivostok, Russian Federation

The subject of the research is modern marine turbomachines which differ in many types, designs, purposes, materials and working bodies. It is noted that this diversity is guaranteed by the use of modern computer technologies from the stage of preliminary preparation of production to the release of final products. The design stage of turbine units taking into account the external characteristics of the turbine stage — power, speed, efficiency, shaft torque and others is considered. The efficiency of the stage is expressed by the efficiency coefficient, which is determined by the energy losses available in the stage. Losses, in turn, are expressed by losses in each individual element of the turbine stage design. At the same time, it is noted that the losses in the nozzle apparatus are decomposed into friction losses, edge and end losses. The object of the study is the nozzle apparatus of a low-consumption inflow turbine. The subject of the study is the velocity coefficient of the nozzle apparatus of a low-consumption inflow turbine. The research method is numerical simulation of gas flow using computational gas dynamics. The purpose of the study is to compare the value of the speed coefficient of the nozzle apparatus obtained during a physical experiment with the results of numerical modeling of the nozzle apparatus with subsonic (narrowing) channels. The conducted studies have shown that low-consumption inflow turbines are characterized by small sizes that do not allow us to fully carry out a physical experiment. A graph of the dependence of the velocity coefficient of the nozzle apparatus on the Mach number is provided in the study. A good convergence of the values of the velocity coefficient of the nozzle apparatus obtained by the numerical method with the results of the physical experiment has been established. The velocity fields of the flow part of the nozzle apparatus are obtained in the range of the Mach number ranging from 0.66 to 0.88. The possibility of using numerical modeling for this type of nozzle apparatus is concluded.

Keywords: nozzle diaphragm, velocity coefficients, simulation, numerical method, experiment, Mach number, calculation grid, gas dynamics, low-consumption.

For citation:

Kryukov, Aleksey A. “Numerical simulation of the velocity coefficient of the nozzle diaphragm of a low-consumption turbine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 849–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-849-857.

УДК 621.515.001.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СКОРОСТИ СОПЛОВОГО АППАРАТА МАЛОРАСХОДНОЙ ТУРБИНЫ

А. А. Крюков

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет», г. Владивосток, Российская Федерация

Предметом исследования работы являются современные судовые турбомашины, отличающиеся многообразием видов, конструкций, назначений, материалов и рабочих тел. Отмечается, что это многообразие гарантировано использованием современных компьютерных технологий от стадии предварительной подготовки производства до выпуска конечной продукции. Рассмотрен этап проектирования турбоагрегатов, учитывающий внешние характеристики турбинной ступени: мощность, частоту вращения, коэффициент полезного действия, вращающий момент на валу и др. Эффективность ступени выражается коэффициентом полезного действия, который определяется потерями энергии, имеющимися в ступени. Потери,

в свою очередь, выражаются потерями в каждом отдельном элементе конструкции турбинной ступени. При этом отмечается, что потери в сопловом аппарате разделяются на потери на трение, кромочные и концевые. Объектом исследования является сопловой аппарат центростремительной малорасходной турбины. Предметом исследования является коэффициент скорости соплового аппарата малорасходной центростремительной турбины. Цель исследования — сравнить значения коэффициентов скорости соплового аппарата, полученных в ходе физического эксперимента, с результатами численного моделирования. Методом исследования является численное моделирование течения газа с применением вычислительной газодинамики. Основной задачей исследования является сопоставление значения коэффициента скорости соплового аппарата, полученного в ходе физического эксперимента, с результатами численного моделирования соплового аппарата с дозвуковыми (сужающимися) каналами. Проведенные исследования показали, что малорасходные радиальные турбины характеризуются небольшими размерами, не позволяющими выполнить физический эксперимент. В исследовании приводится график зависимости коэффициента скорости соплового аппарата от числа Маха. Установлена хорошая сходимость значений коэффициента скорости соплового аппарата, полученного численным методом, с результатами физического эксперимента. Получены поля скоростей проточной части соплового аппарата в диапазоне числа Маха 0,66–0,88. Сделаны выводы о возможности применения численного моделирования для подобного типа сопловых аппаратов.

Ключевые слова: сопловой аппарат, коэффициент скорости, моделирование, численный метод, эксперимент, число Маха, расчетная сетка, газодинамика, малорасходная турбина.

Для цитирования:

Крюков А. А. Численное моделирование коэффициента скорости соплового аппарата малорасходной турбины / А. А. Крюков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 849–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-849-857.

Введение (Introduction)

Малорасходные радиальные турбин, применяемые в судовых установках, имеют некоторые достоинства по сравнению с осевыми микротурбинами. Для обеспечения высокой эффективности необходимо подбирать параметры с учетом оптимальных значений соотношений и достоверно оценивать потери в элементах малорасходных турбин.

Физические эксперименты по расчету коэффициента скорости соплового аппарата, описанные в работе А. С. Наталевич [1], позволили определить зависимость коэффициента скорости соплового аппарата от числа Маха: $\varphi = f(M_1)$. Воздействие числа Маха на потери в проточной части соплового аппарата (СА) определялось на стенде для статических продувок решеток. Было выполнено исследование решеток с дозвуковыми сопловыми каналами при варьировании параметров рабочего тела в следующем диапазоне:

$$p_0^* = 2 \cdot 10^5 \dots 7 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$p_1 = 8 \cdot 10^4 \dots 2,7 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T_1^* = 295 \text{ К}.$$

В сопловых решетках число Рейнольдса (Re) изменялось в диапазоне $3 \cdot 10^5 \dots 9 \cdot 10^5$. Данное изменение в указанных пределах привело к изменению коэффициента скорости соплового аппарата не более чем на 1,2 %.

Замена физического эксперимента численным позволяет сделать следующие выводы:

- целесообразность использования новейших информационных технологий для получения коэффициента скорости соплового аппарата;
- создание рекомендаций для проведения численных экспериментов подобных малорасходных турбин.

Компьютерное моделирование соплового аппарата с соразмерными и режимными параметрами может служить проверочным вариантом для подбора конечно-элементной сетки с определенными критериями. Используя численные эксперименты, можно определить характерные особенности пространственного течения потока в сопловом аппарате малорасходной центростремительной турбины с помощью виртуального стенда.

Цель исследования — сравнить значения коэффициентов скорости соплового аппарата, полученных в ходе физического эксперимента, с результатами численного моделирования

Задачи исследования:

- создать расчетную сетку для геометрической модели соплового аппарата малорасходной радиальной турбины;
- провести численное моделирование по принятым граничным условиям;
- сопоставить значения коэффициента скорости соплового аппарата, полученного в ходе физического эксперимента с результатами численного моделирования;
- сформулировать методические рекомендации для моделирования подобных малорасходных турбин.

Объект исследования — сопловой аппарат центростремительной малорасходной турбины.

Предметом исследования являются коэффициент скорости соплового аппарата малорасходной центростремительной турбины.

Метод исследования — численное моделирование течения газа с применением вычислительной газодинамики.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Малорасходные турбины имеют следующие специфические особенности: низкое число Рейнольдса ($Re < 10^5$), малые относительные значения высоты и длины лопаток, большие значения относительных толщин кромок лопаток, шероховатости и зазоров. Указанные особенности не могут позволить проводить физический эксперимент. Применение метода численного моделирования при исследовании особенностей структуры потока в проточной части соплового аппарата малорасходной турбины позволяет минимизировать влияние специфических особенностей на результаты эксперимента.

Численное моделирование в данном исследовании применяется в качестве тестируемого к проведенному физическому эксперименту с целью определения коэффициента скорости соплового аппарата. Это позволяет создавать виртуальный стенд для дальнейших исследований подобных типов турбин и, как следствие, снижать затраты времени и ресурсов за счет снижения количества экспериментов на физической турбинной ступени.

В настоящее время, ввиду значительного прогресса в области компьютерной индустрии, появилась возможность исследования потоков газа числовым методом вычислительной газовой динамики (CFD-метод) [2], базирующемся на численном определении системы уравнений Навье – Стокса, который описывает течение рабочего тела на основе основных законов сохранения энергии с минимальными допущениями. Кроме того, имеется большое количество исследований в области малорасходных турбин, опубликованных в отечественных [3]–[5] и зарубежных журналах [6]–[8] с использованием численных методов решения уравнений, которые описывают перетекание неламинарного потока рабочего тела. Применение этого метода накладывает дополнительные условия на профессиональный подход и проверку достоверности получаемых расчетных значений путем сопоставления их с результатами физического эксперимента.

Процесс численного моделирования течения рабочего тела в сопловом аппарате малорасходной турбинной ступени состоит из следующих стадий [9]–[11]:

- создание трехмерной объемной модели соплового аппарата с последующим созданием геометрической модели проточной части сопловых каналов с применением CAD-систем;
- генерация и анализ конечно-элементной сетки, определение параметров сетки;
- создание расчетной модели, на которую накладываются граничные условия, используемые в численном эксперименте (параметры рабочего тела и модели турбулентности, частота вращения, интерфейс сопряжения, количество итераций и др.);
- поиск решения с учетом требуемых значений невязок и небалансов, занимающий продолжительное время для проведения численного моделирования;
- анализ выходных данных численного моделирования.

На основе обобщенных данных выбрана турбинная ступень с техническими характеристиками соплового аппарата, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики соплового аппарата малорасходной турбины

Угол наклона сопел соплового аппарата, град.	Высота сопла l_c , мм	D_n , мм	$D_{вн}$, мм	Кромка «вход» $\Delta_{вх}$, мм	Кромка «выход» $\Delta_{вых}$, мм	Ширина горла a_1 , мм	$\epsilon_{экв}$	Z_{CA} сопел СА
18	2	60	50	0,9	0,2	1,4	1	30

Схема соплового аппарата малорасходной турбинной ступени приведена на рис. 1, визуальная трехмерная модель — на рис. 2.

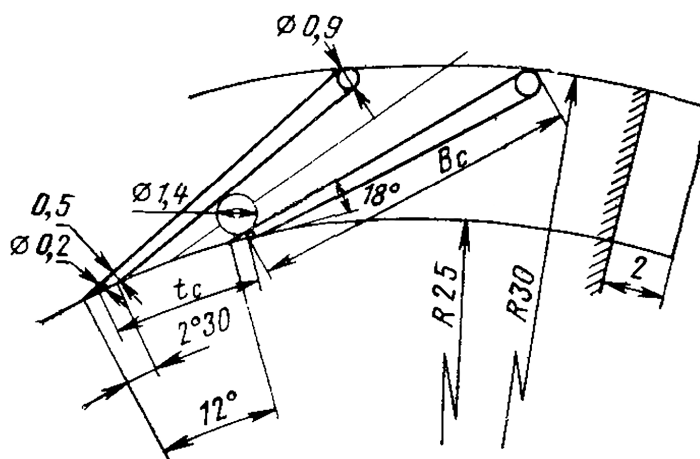


Рис. 1. Конструктивная схема соплового аппарата центробежной турбины

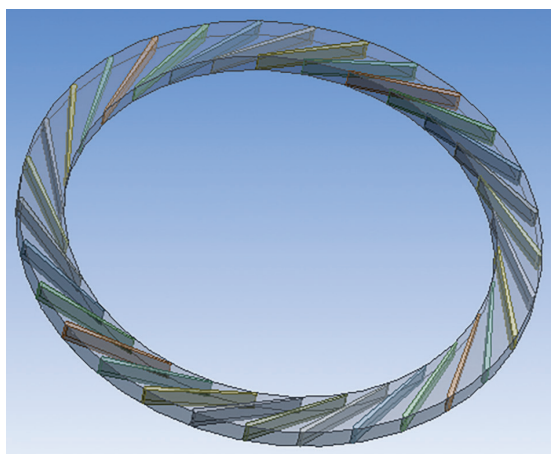


Рис. 2. Трехмерная объемная модель соплового аппарата центробежной турбины

Граничные условия, накладываемые на численное исследование [12]:

- постановка задачи — стационарная задача Frozen Rotor;
- рабочее тело — Air Ideal Gas (воздух);
- модель турбулентности — SST (Shear Stress Transport);
- давление торможения потока на входе в сопловой аппарат — $3 \cdot 10^5$ Па;
- температура потока газа на входе в проточную часть — 295 К;
- давление в потоке газа на выходе из проточной части — $1,53\text{--}2 \cdot 10^5$ Па.

Результаты (Results)

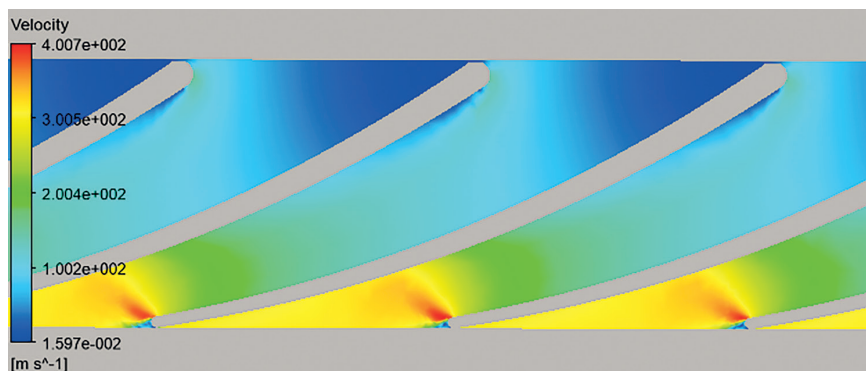
Основные результаты численного исследования приведены в табл. 2 и 3. Поля скоростей показаны на рис. 3 и 4.

Таблица 2

Основные результаты исследования при числах Маха 0,88 и 0,8

Результаты при числе Маха $M = 0,88$			Результаты при числе Маха $M = 0,8$		
Величина	Значение	Единица измерения	Величина	Значение	Единица измерения
Давление на входе в канал проточной части p_0^*	0,3	МПа	Давление на входе в канал проточной части p_0^*	0,3	МПа
Давление на выходе из канала проточной части p_1	0,153	МПа	Давление на выходе из канала проточной части p_1	0,168	МПа
Число Маха на выходе из канала проточной части M_1	0,88	—	Число Маха на выходе из канала проточной части M_1	0,8	—
Скорость потока на выходе из канала проточной части c_1	282,175	м/с	Скорость потока на выходе из канала проточной части c_1	261,01	м/с
Коэффициент скорости СА φ	0,876	—	Коэффициент скорости СА φ	0,868	—
Коэффициент потерь в СА ζ_c	0,232	—	Коэффициент потерь в СА ζ_c	0,247	—

а)



б)

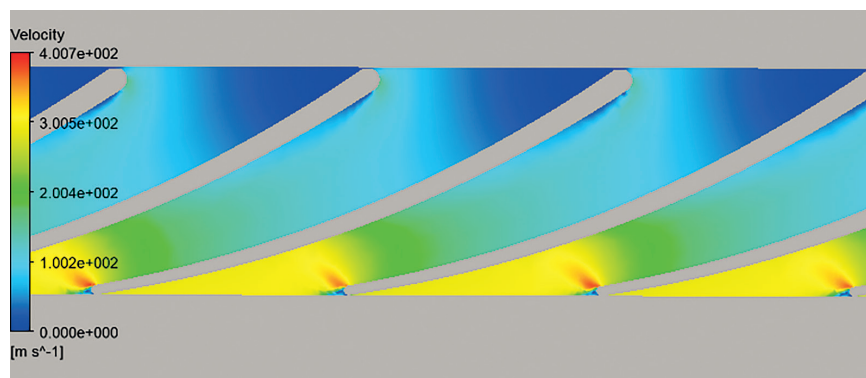


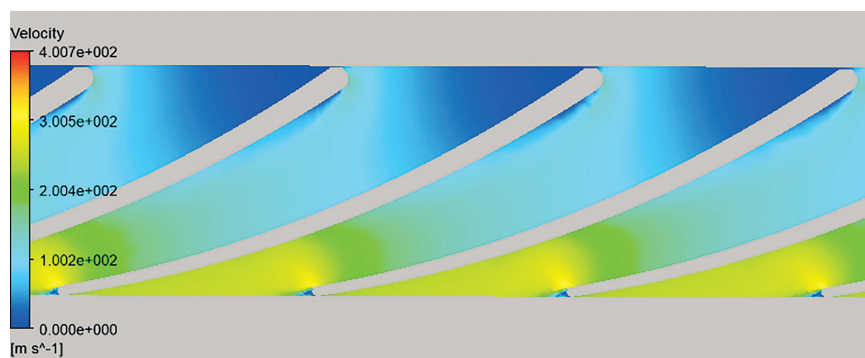
Рис. 3. Поле скоростей в сопловом аппарате с числами Маха на выходе:
а — $M_1 = 0,88$; б — $M_1 = 0,8$

Таблица 3

Основные результаты исследования при числах Маха 0,66 и 0,75

Результаты при числе Маха $M = 0,66$			Результаты при числе Маха $M = 0,75$		
Величина	Значение	Единица измерения	Величина	Значение	Единица измерения
Давление на входе в канал проточной части p_0^*	0,3	МПа	Давление на входе в канал проточной части p_0^*	0,3	МПа
Давление на выходе из канала проточной части p_1	0,2	МПа	Давление на выходе из канала проточной части p_1	0,171	МПа
Число Маха на выходе из канала проточной части M_1	0,66	—	Число Маха на выходе из канала проточной части M_1	0,75	—
Скорость потока на выходе из канала проточной части c_1	219,103	м/с	Скорость потока на выходе из канала проточной части c_1	256,5	м/с
Коэффициент скорости СА φ	0,86	—	Коэффициент скорости СА φ	0,865	—
Коэффициент потерь в СА ζ_c	0,26	—	Коэффициент потерь в СА ζ_c	0,252	—

а)



б)

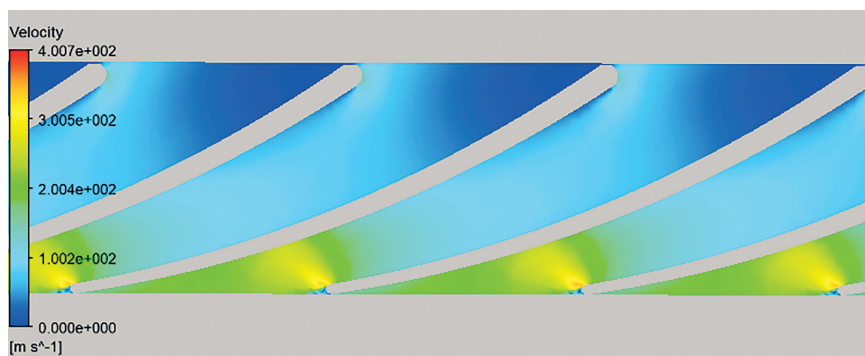


Рис. 4. Поле скоростей в сопловом аппарате с числами Маха на выходе:
а — $M_1 = 0,66$; б — $M_1 = 0,75$

Обсуждение (Discussion)

На основе выполненного анализа табл. 2 и 3 построен график зависимости коэффициента скорости соплового аппарата от числа Маха (рис. 5), на котором видно, что отклонение значений

коэффициента φ между физическим экспериментом и результатом, полученным на виртуальном стенде, не более 0,5 % в диапазоне числа Маха, $M = 0,66 \dots 0,88$.

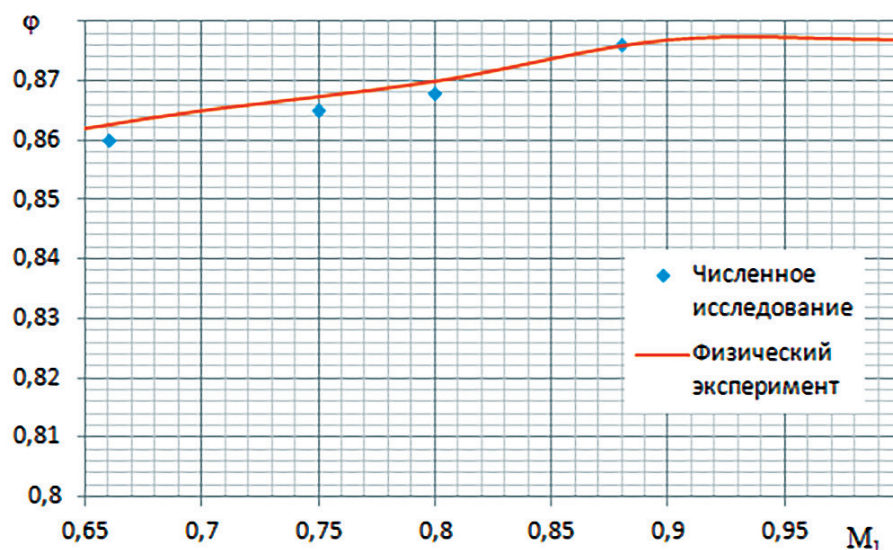


Рис. 5. Зависимость коэффициента скорости соплового аппарата от числа Маха

Численное исследование является лишь виртуальным воспроизведением реальной модели, достоверность которой определяется полнотой раскрытия исследуемых явлений, а также зависит от недочетов физической и численной моделей. В целом численная модель исследования полновальна для реальной модели.

Течение потока в сопловом аппарате формируется геометрическим размером проточной части, термодинамическими параметрами газа, а также принятыми граничными критериями в сопловом аппарате турбинной ступени.

Заключение (Conclusion)

На основе проведенного численного исследования можно сделать следующие выводы:

- полученные поля скоростей наглядно демонстрируют потери кинетической энергии в проточной части соплового аппарата центростремительной турбины, а также место максимального сужения соплового канала — горла сопла;
- анализ результатов численного метода показал точность использования этого метода с определенными геометрическими размерами и параметрами соплового аппарата;
- отклонения значений коэффициента скорости φ между двумя методами определения не выходят за границы погрешности опыта, следовательно, применение моделирования можно рассматривать в качестве замены и / или дополнения к физическому опыту для нахождения коэффициентов скорости в сопловых решетках данного типа;
- предложены методические рекомендации к основным критериям расчетной конечно-элементной сетки и граничным условиям, позволяющие получить выходные параметры для соплового аппарата подобного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наталевич А. С. Воздушные микротурбины / А. С. Наталевич. — М.: Машиностроение, 1979. — 192 с.
2. Епифанов А. А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин / А. А. Епифанов, А. И. Кириллов, В. А. Рассохин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2012. — № 1 (142). — С. 65–70.

3. Забелин Н. А. Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н. А. Забелин [и др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2013. — № 1 (166). — С. 45–53.

4. Нгуен А. К. Характеристики и структура потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности / А. К. Нгуен, К. Л. Лапшин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2016. — № 2 (243). — С. 163–173. DOI: 10.5862/JEST.243.17.

5. Rassokhin V. The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines / V. Rassokhin, N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olennikov, M. Cherkasova, A. Sebelev // Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover. — Polytechnical University Publishing House, 2014. — Pp. 139–155.

6. Rakov G. A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia / G. Rakov, V. Rassokhin, N. Zabelin, S. Olennikov, A. Sebelev, A. Sukhanov, S. Schislyaev // International Journal of environmental & science education. — 2016. — Vol. 11. — No. 18. — Pp. 11721–11733.

7. Smirnov M. V. Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I / M. V. Smirnov, A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, N. I. Kuklina // Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics. — Stockholm, Sweden, 2017. — Paper ID: ETC2017–100.

8. Sebelev A. Design and numerical analysis of processes in siloxane vapor driven turbine / A. Sebelev, R. Scharf, N. Zabelin, M. Smirnov // Proceedings of the 3rd International Seminar on ORC Power Systems. Brussels, Belgium. — 2015. — Pp. 640–649.

9. Нгуен Ан. К. Влияние тангенциального наклона рабочих лопаток на потери кинетической энергии / Ан. К. Нгуен, К. Л. Лапшин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. — 2017. — Т. 23. — № 4. — С. 66–73. DOI: 10.18721/JEST.230406.

10. Kryukov A. A. Determination of the velocity coefficient of a turbine nozzle diaphragm with partial blading of the runner / A. A. Kryukov, G. L. Rakov, S. V. Chekhranov, R. R. Simashov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 986. — Is. 1. — Pp. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012045.

11. Крюков А. А. Численное исследование течения потока в ступени центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 4–1 (50). — С. 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.

12. Крюков А. А. Трехмерный газодинамический расчет соплового аппарата малорасходной центростремительной турбины / А. А. Крюков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 4. — С. 89–95. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-89-95.

REFERENCES

1. Nataleovich, A. S. *Vozdushnye mikroturbiny*. M.: Mashinostroenie, 1979.
2. Epifanov, A. A., A. I. Kirillov, and V. A. Rassokhin. “Raschet trekhmernogo techeniya v stupenjah malorashodnykh turbin.” *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* 1(142) (2012): 65–70.
3. Zabelin, N. A., G. L. Rakov, V. A. Rassokhin, A. A. Sebelev, and M. V. Smirnov. “Research of flow characteristics in low flow rate LPI turbine stages.” *St. Petersburg State Polytechnical University Journal* 1(166) (2013): 45–53.
4. Nguyen, A. Q., and K. L. Lapshin. “Characteristics and structure of the flow in a turbine stage with a negative gradient of the degree of reactivity.” *St. Petersburg State Polytechnical University Journal* 2(243) (2016) 163–173. DOI: 10.5862/JEST.243.17.
5. Nguyen, A. Q., and K. L. Lapshin. “The influence of tangential inclination of rotor blades on kinetic energy losses in an axial turbine stage.” *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology* 23.4 (2017): 66–73. DOI: 10.18721/JEST.230406.
6. Kryukov, A. A., G. L. Rakov, S. V. Chekhranov, and R. R. Simashov. “Determination of the velocity coefficient of a turbine nozzle diaphragm with partial blading of the runner.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 986. No. 1. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012045.

7. Rassokhin, V., N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olennikov, M. Cherkasova, and A. Sebelev. "The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines." *Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover*. Polytechnical University Publishing House, 2014. 139–155.

8. Rakov, Gennadiy, Viktor Rassokhin, Nikolay Zabelin, Sergey Olennikov, Aleksandr Sebelev, Aleksandr Sukhanov, and Sergey Schislyaev. "A Low Emission Axial-Flow Turbine for the Utilization of Compressible Natural Gas Energy in the Gas Transport System of Russia." *International Journal of environmental & science education* 11.18 (2016): 11721–11733.

9. Smirnov, M. V., A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, and N. I. Kuklina. "Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I." *Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics*. Stockholm, Sweden, 2017. Paper ID: ETC2017–100.

10. Sebelev, A., R. Scharf, N. Zabelin, and M. Smirnov. "Design and numerical analysis of processes in siloxane vapor driven turbine." *Proceedings of the 3rd International Seminar on ORC Power Systems*. Brussels, Belgium. 2015. 640–649.

11. Krykov, Aleksey A., and Sergei V. Chekhranov. "Numerical experiment of flow in stages of inflow turbine with fractional blading of the rotor wheel." *Marine intelligent technologies* 4–1(50) (2020): 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.

12. Kriukov, Aleksei Alekseevich. "Three dimensional gas-dynamic calculation of nozzle block of small flow-rate centripetal turbine." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 4 (2019): 89–95. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-89-95.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Крюков Алексей Алексеевич —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный
технический рыбохозяйственный университет»
690087, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Луговая, 52б
e-mail: aleksey902@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 25 октября 2021 г.

Received: October 25, 2021.

EVALUATION OF FATIGUE LIFE AND SERVICE LIFE OF THE BOAT BODY OUTER COMPOSITE SKIN

V. E. Strizhius

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

It is known that for many years various polymer composite materials have been widely used in the design and manufacture of boats structural elements. The estimated service life of modern boats is, as a rule, at least 20 years, during which the necessary level of fatigue strength of such elements must be provided. It is noted that the problem of ensuring the design life of composite elements in the body of boats is currently being solved mainly by providing a reduced level of design stresses and analyzing operational experience. As a rule, any calculated estimates of the fatigue life of these elements are not carried out. At the same time, the need for such assessments is now obvious. In order to form a method suitable for such assessments, the main provisions of methods for fatigue life evaluations of elements made of layered composites in aircraft structures are considered. Based on the analysis of these provisions, a method for fatigue life and service life evaluations of the outer composite skin of the boat body is proposed. Using the proposed method, a test calculation of the outer composite skin of the boat body about 60 meters long made of intact fiberglass of the "rovimat" type with the laying layers at an angle of 45° and the same fiberglass with impact damages is performed. The results obtained have shown that the service life of the skin with impact damages is significantly less than the estimated service life of a boat of 20 years. The obtained result has shown the need to introduce periodic inspections and control of the outer composite skin during the operation of the boat.

Keywords: polymer composite materials, fatigue life, service life, damage summation rule, reliability coefficient, outer composite skin, impact damage, boat body.

For citation:

Strizhius, Vitaly E. "Evaluation of fatigue life and service life of the boat body outer composite skin." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.6 (2021): 858–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-858-866.

УДК 629.7

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И СРОКА СЛУЖБЫ НАРУЖНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ОБШИВКИ КОРПУСА СУДНА

В. Е. Стрижиус

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация

Предметом исследования в работе являются широко применяемые в течение многих лет при проектировании и производстве элементов конструкции судов полимерные композиционные материалы. Отмечается, что расчетный срок службы современных судов составляет, как правило, не менее 20 лет, в течение которых должен быть обеспечен необходимый уровень усталостной прочности таких элементов. Подчеркивается, что проблема обеспечения расчетного срока службы композитных элементов в корпусах судов в настоящее время решается в основном обеспечением пониженного уровня расчетных напряжений и анализом опыта эксплуатации, при этом какие-либо расчетные оценки усталостной долговечности рассматриваемых элементов, как правило, не выполняются. Вместе с тем необходимость подобных оценок в настоящее время очевидна. С целью формирования метода, пригодного для подобных оценок, рассмотрены основные положения способов расчета на усталость элементов, изготовленных из слоистых композитов, используемых в авиационных конструкциях. На основе анализа этих положений предложен метод расчета усталостной долговечности и срока службы наружной композитной обшивки корпуса судна. С использованием предложенного метода выполнен тестовый расчет наружной композитной обшивки корпуса судна длиной около 60 м из неповрежденного стеклопластика типа rovimat с укладкой слоев 45° и из того же стеклопластика с ударными повреждениями. Полученные результаты показали, что срок службы обшивки с ударными повреждениями значительно меньше расчетного срока службы неповрежденного судна, который

составляет 20 лет. Сделан вывод о том, что полученный результат показывает необходимость введения периодических осмотров и контроля наружной композитной обшивки в процессе эксплуатации судна.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, усталостная долговечность, срок службы, гипотеза суммирования повреждений, коэффициент надежности, наружная композитная обшивка, ударные повреждения, корпус судна.

Для цитирования:

Стрижиус В. Е. Оценка усталостной долговечности и срока службы наружной композитной обшивки корпуса судна / В. Е. Стрижиус // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 858–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-858-866.

Введение (Introduction)

Известно, что на протяжении многих лет различные полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются при проектировании и производстве элементов конструкции судов. Расчетный срок службы современных судов составляет, как правило, не менее 20 лет — период, в течение которого должен быть обеспечен необходимый уровень усталостной прочности таких элементов.

Проблема обеспечения расчетного срока службы элементов корпуса судна, изготовленных из ПКМ, в настоящее время решается в основном обеспечением пониженного уровня расчетных напряжений и анализом опыта эксплуатации. Какие-либо расчетные оценки усталостной долговечности рассматриваемых элементов, как правило, не выполняются. Вместе с тем необходимость подобных оценок можно обосновать следующими факторами.

1. С точки зрения решения целого спектра проблем, связанных с усталостной прочностью элементов из ПКМ, выбор пониженного уровня расчетных напряжений и анализ опыта эксплуатации нельзя считать достаточными условиями обеспечения безопасности и расчетного срока службы элементов корпуса судна, изготовленных из ПКМ.

2. Во многих случаях возникает потребность продления расчетных сроков службы судов. Без расчетных оценок усталостной долговечности обоснование такого продления на должном техническом уровне выполнить невозможно.

3. Достаточно часто реальные условия эксплуатации судов отличаются от условий, заявленных при проектировании. Коррекция сроков службы в этом случае также требует расчетных оценок усталостной долговечности.

4. Известно, что корпуса судов, в отличие от планера самолетов, не проходят полномасштабные натурные усталостные испытания, таким образом экспериментальная база для обоснования усталостной прочности и расчетного срока службы корпусов судов практически отсутствует, или крайне ограничена.

Обзор открытых для изучения источников, связанных с усталостной долговечностью элементов конструкции судов, изготовленных из ПКМ, показывает достаточную заинтересованность исследователей в решении данной проблемы. В этом плане можно выделить в первую очередь работы зарубежных исследователей [1]–[3], в которых рассмотрены многие вопросы, касающиеся данной проблемы, однако следует отметить, что какие-либо методы расчетных оценок и примеры подобного анализа в указанных работах не представлены.

Цель настоящего исследования состоит в разработке основных положений такого метода и представлении конкретного примера расчета для наружной композитной обшивки корпуса судна. Известно, что обеспечение усталостной прочности подобных обшивок является одной из важнейших задач при проектировании судов, однако, как отмечалось ранее, типовое решение этой задачи в настоящее время заключается лишь в обеспечении пониженного уровня расчетных напряжений и анализе опыта эксплуатации. Практическая значимость планируемой работы заключается в возможности уточнения решения данной задачи с использованием специально разработанного метода.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Основные материалы для формирования методов расчета усталостной долговечности элементов конструкции судов, изготовленных из ПКМ, предлагается выбирать в публикациях, в которых отражены основные положения методов расчета усталости элементов из слоистых композитов в авиационных конструкциях. Известно, что в этой области в авиации достигнут определенный прогресс, который целесообразно рассмотреть и, возможно, применить при расчетах усталостной долговечности силовых элементов конструкции судов, изготовленных из ПКМ.

На основе результатов обзора работ [4]–[12] можно выделить следующие основные положения метода, применяемого при расчетах на усталость элементов композитных авиаконструкций.

1. Формирование спектра механических нагрузок на элемент за программный блок нагрузок. Этот блок может быть представлен в виде циклограммы нагрузок (напряжений), в виде гистограммы нагрузок (напряжений) различного уровня или в виде некоего блока нагрузок (напряжений) различных амплитуд и средних значений.

2. В случае представления нагрузок в виде циклограммы нагрузок (напряжений) выполняется обработка циклограммы методом «дождевого потока» [4], и выделяются полные циклы нагружения.

3. Обработка экспериментальных данных по усталостным характеристикам ПКМ рассматриваемого элемента, получение кривой усталости для какой-либо асимметрии регулярного циклического нагружения. Как правило, кривые усталости представлены в форме уравнения Менделля [1], [5]. Например, в работе [5] предложен один из наиболее простых способов аппроксимации экспериментальных данных: $\sigma - N$, при циклическом растяжении стеклопластиков с различными укладками в диапазоне долговечностей 10^2 – 10^6 циклов:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{UTS} - B \lg N, \quad (1)$$

где $\sigma_{\max}$ — максимальное значение циклических напряжений растяжения ламината из ПКМ;

σ_{UTS} — предел прочности ламината на растяжение;

N — число циклов нагружения до разрушения;

B — константа уравнения.

В случае аппроксимации экспериментальных данных $\sigma - N$ при циклическом нагружении симметричным циклом ($R = -1$) уравнение кривой усталости (1) принимает вид:

$$\sigma_a^{R=-1} = \sigma_{UCS} - B_1 \lg N, \quad (2)$$

где $\sigma_a^{R=-1}$ — максимальное значение циклических напряжений растяжения ламината из ПКМ при нагружении симметричным циклом;

σ_{UCS} — предел прочности ламината на сжатие;

N — число циклов нагружения до разрушения;

B_1 — константа уравнения.

4. Приведение каждого асимметричного полного цикла нагружения к эквивалентному циклу с коэффициентом асимметрии R , соответствующему коэффициенту асимметрии циклического нагружения, при котором получена кривая усталости (1). Приведение выполняется с помощью диаграмм постоянной усталостной долговечности, при этом наиболее часто используются эквивалентный симметричный цикл нагружения и диаграмма Гудмана [6]–[8]:

$$-\frac{\sigma_a - \sigma_a^{R=-1}}{\sigma_a^{R=-1}} = \begin{cases} \frac{\sigma_m}{\sigma_{UTS}}, & 0 \leq \sigma_m \leq \sigma_{UTS}; \end{cases} \quad (3)$$

$$-\frac{\sigma_a - \sigma_a^{R=-1}}{\sigma_a^{R=-1}} = \begin{cases} \frac{\sigma_m}{\sigma_{UCS}}, & \sigma_{UCS} \leq \sigma_m \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

где σ_a — амплитуда циклических напряжений растяжения-сжатия;

$\sigma_a^{R=-1}$ — амплитуда симметричного цикла нагружения, соответствующая определенной (фиксированной) усталостной долговечности слоистого ПКМ;

- σ_m — среднее напряжение цикла нагружения;
 σ_{UTS} — предел прочности рассматриваемого ПКМ при растяжении;
 σ_{UCS} — предел прочности рассматриваемого ПКМ при сжатии.

5. Оценка усталостной долговечности N_i с использованием уравнений (1) или (2) каждого уровня нагружения.

6. Оценка усталостного повреждения n_i / N_i каждого уровня нагружения.

7. Определение суммы накопленного повреждения $\Sigma n_i / N_i$ за программный блок нагрузок элемента. Выбор гипотезы суммирования усталостных повреждений: $N_{bl} \Sigma n_i / N_i = A$, где N_{bl} — усталостная долговечность элемента, выраженная в количестве блоков нагружения. По данным работ [9]–[11], при сложном квазислучайном циклическом нагружении элементов из ПКМ консервативная оценка величины A может составлять значение, равное 0,05.

8. Определение усталостной долговечности элемента $N_{bl} = A / \Sigma n_i / N_i$.

9. Определение значения коэффициента надежности η . Согласно рекомендациям работы [12], средние значения коэффициента надежности η , применяемые при расчетах на усталость элементов из слоистых композитов в авиационных конструкциях, находятся в диапазоне $\eta = 20 \dots 30$.

10. Определение располагаемого ресурса элемента: $T = N_{bl} / \eta$.

В работах [1], [2] можно найти исходные данные, позволяющие выполнить расчетные оценки усталостной долговечности и располагаемого срока службы наружной композитной обшивки (бортовая секция) корпуса судна длиной около 60 м. На основании анализа основных положений представленного в пп. 1–10 метода, применяемого при расчетах на усталость элементов композитных авиаконструкций, можно предложить метод расчета усталостной долговечности и срока службы таких обшивок.

Основные положения данного метода можно представить следующим образом.

1. Формирование спектра механических нагрузок на рассматриваемый элемент в течение расчетного срока службы судна. По данным работ [1] и [2], этот спектр может быть представлен в виде гистограммы нагрузок (напряжений) различного уровня.

2. Обработка экспериментальных данных по усталостным характеристикам ПКМ элемента, получение кривой усталости для выбранной асимметрии регулярного циклического нагружения. Согласно данным работы [1], такая кривая усталости может быть представлена уравнением (1).

3. Оценка усталостной долговечности N_i с использованием уравнения (1) от каждого уровня нагружения.

4. Оценка усталостного повреждения n_i / N_i от каждого уровня нагружения.

5. Определение суммы накопленного повреждения $\Sigma n_i / N_i$ за расчетный срок службы элемента. Выбор гипотезы суммирования усталостных повреждений: $N_{bl} \Sigma n_i / N_i = A$, где N_{bl} — усталостная долговечность элемента, выраженная в расчетных сроках службы. Принимается допущение, что при сложном циклическом нагружении рассматриваемой обшивки значение A может составлять 0,05.

6. Определение усталостной долговечности обшивки: $N_{bl} = A / \Sigma n_i / N_i$.

7. Определение значения коэффициента надежности η . Принимается допущение, что консервативное значение коэффициента надежности $\eta = 30$.

8. Определение величины располагаемых сроков службы обшивки: $T = N_{bl} / \eta$.

Результаты (Results)

Рассмотрим примеры расчетных оценок усталостной долговечности и срока службы наружной композитной обшивки (бортовая секция) корпуса судна длиной около 60 м, выполненные для двух вариантов расчета: неповрежденной конструкции и конструкции с ударными повреждениями.

Исходные данные для расчета неповрежденной конструкции:

1. Материал обшивки — стеклопластик типа govimat с укладкой слоев 45° [1].

2. Предполагается, что расчетный срок службы судна составляет 20 лет. Гистограмма максимальных растягивающих напряжений в обшивке за расчетный срок службы рассматриваемого судна, полученная на основе обработки данных работ [1], [2], представлена в табл. 1.

Таблица 1

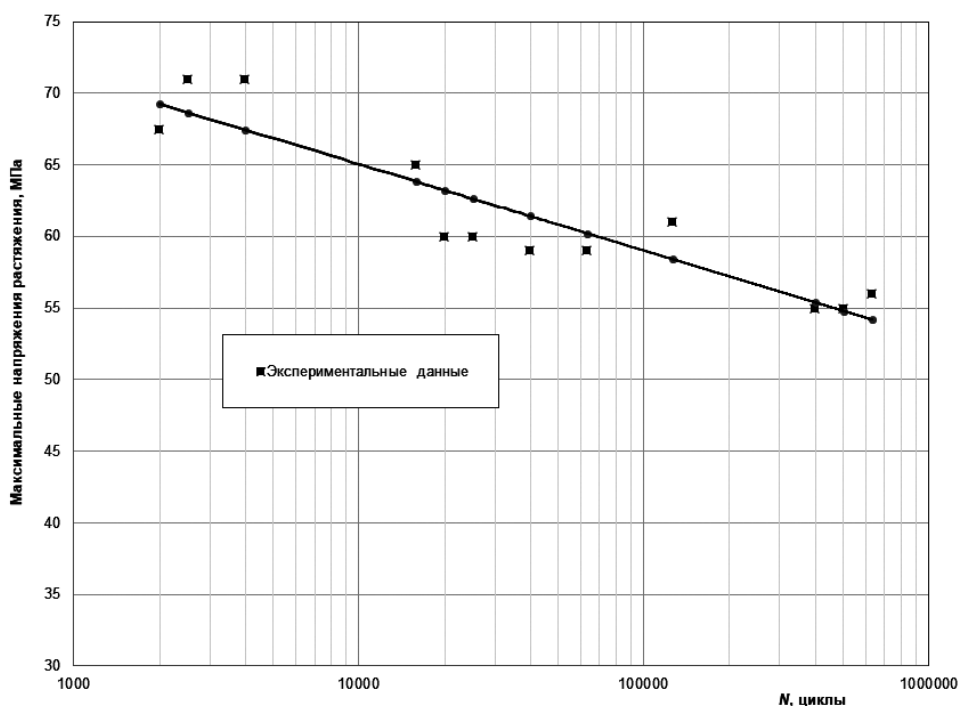
Гистограмма напряжений в наружной композитной обшивке корпуса
ассматриваемого судна

Коэффициент нагрузки	$\sigma_{\max}$, МПа	n_i , циклы
0,00025	7,86	$3,0 \cdot 10^7$
0,00050	15,71	$1,0 \cdot 10^7$
0,00075	23,57	$1,2 \cdot 10^6$
0,00100	31,43	$1,1 \cdot 10^5$
0,00125	39,29	$1,0 \cdot 10^4$
0,00150	47,14	$9,5 \cdot 10^2$
0,00175	55	$3,0 \cdot 10^1$

3. Уравнение кривой усталости типа (1) материала обшивки:

$$\sigma_{\max} = 89,145 - 6,026 \lg N. \quad (5)$$

Уравнение (5) получено на основе результатов обработки экспериментальных данных, приведенных на рисунке по данным работы [1].



Кривая усталости образцов из стеклопластика Rovimat с укладкой слоев 45°

4. Принимается допущение, что в качестве гипотезы суммирования усталостных повреждений может быть использована гипотеза линейного суммирования усталостных повреждений в виде $N_{bl} \sum n_i / N_i = 0,05$, где N_{bl} — усталостная долговечность элемента, выраженная в расчетных сроках службы.

5. Принимается допущение $\eta = 30$.

Результаты расчета усталостной долговечности срока службы для неповрежденной наружной композитной обшивки корпуса рассматриваемого судна приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты расчета усталостной долговечности и срока службы
для неповрежденной наружной композитной обшивки корпуса рассматриваемого судна**

$\sigma_{\max}$, МПа	Цикл N_i	Цикл n_i	n_i / N_i	$\Sigma n_i / N_i$	Период службы N_{bl}	Период службы T
7,86	$3,09 \cdot 10^{13}$	$3,0 \cdot 10^7$	$9,72 \cdot 10^{-7}$	0,000272	183,8	6,1
15,71	$1,53 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^7$	$6,52 \cdot 10^{-6}$	—	—	—
23,57	$7,62 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^6$	$1,58 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
31,43	$3,78 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^5$	$2,91 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
39,29	$1,88 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^4$	$5,32 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
47,14	$9,34 \cdot 10^6$	$9,5 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	—	—	—
55	$4,64 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^1$	$6,47 \cdot 10^{-5}$	—	—	—

Известно, что наружные, как металлические, так и композитные, обшивки корпусов судов очень часто подвергаются ударным повреждениям самого различного характера, а также, что элементы из ПКМ с ударными повреждениями имеют значительно худшие усталостные характеристики, чем те же элементы, не имеющие ударных повреждений.

В работе [13] приведена следующая классификация ударных повреждений для элементов композитных авиаконструкций: «Категория 1. Допустимое повреждение, которое может развиваться, будучи не обнаруженным во время планового или целевого осмотра, или допустимые производственные дефекты. Обоснование допустимости повреждения Категории 1 включает демонстрацию надежного ресурса при сохранении статической прочности от расчетной нагрузки». Типичными примерами повреждений Категории 1 является повреждения типа BVID (*Barely Visible Impact Damage* — едва видимые ударные повреждения) и допустимые производственные дефекты и эксплуатационные повреждения (например, небольшие расслоения, пористость, небольшие царапины и вмятины, а также незначительные повреждения от воздействия среды), с которыми в течение всего срока службы конструкция самолета должна выдерживать расчетную нагрузку» (курсив авт.)

Таким образом, очевидно, что кроме оценок усталостной долговечности неповрежденных элементов композитных авиаконструкций как минимум должна быть проведена аналогичная оценка элементов с ударными повреждениями типа BVID. Представляется целесообразным выполнить расчет усталостной долговечности и срока службы рассматриваемой композитной обшивки с ударными повреждениями Категории 1 (типа BVID).

Исходные данные для расчета конструкции с ударными повреждениями:

1. Материал обшивки — стеклопластик типа rovimat с укладкой слоев 45° с ударными повреждениями Категории 1.
2. Гистограмма напряжений в течение расчетного срока службы судна, составляющего 20 лет, приведена в табл. 1.
3. Уравнение кривой усталости типа (1) материала обшивки с ударными повреждениями Категории 1:

$$\sigma_{\max} = 75,773 - 5,122 \lg N. \quad (6)$$

Данное уравнение получено на основе уравнения (5) с учетом результатов обработки экспериментальных данных, представленных в работе [14] для неповрежденных ПКМ и ПКМ с ударными повреждениями Категории 1.

4. Принимается допущение, что в качестве гипотезы суммирования усталостных повреждений может быть использована гипотеза линейного суммирования усталостных повреждений в виде $N_{bl} \Sigma n_i / N_i = 0,05$, где N_{bl} — усталостная долговечность элемента, выраженная в расчетных сроках службы.

5. Принимается допущение: $\eta = 30$.

Результаты расчета усталостной долговечности и срока службы для наружной композитной обшивки корпуса рассматриваемого судна с ударными повреждениями Категории 1 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета усталостной долговечности и срока службы рассматриваемого судна с ударными повреждениями Категории 1

$\sigma_{\max}$, МПа	Цикл N_i	Цикл n_i	n_i / N_i	$\Sigma n_i / N_i$	Срок службы N_{bl}	Срок службы T
7,86	$1,82 \cdot 10^{13}$	$3,0 \cdot 10^7$	$1,65 \cdot 10^{-6}$	0,00618	8,1	0,27
15,71	$5,32 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,88 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
23,57	$1,55 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^6$	$7,72 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
31,43	$4,54 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^5$	$2,42 \cdot 10^{-4}$	—	—	—
39,29	$1,33 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^4$	$7,52 \cdot 10^{-4}$	—	—	—
47,14	$3,89 \cdot 10^5$	$9,5 \cdot 10^2$	$2,44 \cdot 10^{-3}$	—	—	—
55	$1,14 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^1$	$2,64 \cdot 10^{-3}$	—	—	—

По результатам выполненных расчетных оценок можно сделать следующие основные выводы:

Срок службы наружной композитной обшивки (бортовая секция, без ударных повреждений) корпуса рассматриваемого судна составляет $T_{\text{расп}} = 6,1 \cdot 20 = 122$ года, что значительно больше расчетного срока службы подобного судна (20 лет).

Срок службы наружной композитной обшивки (бортовая секция с ударными повреждениями категории 1) корпуса рассматриваемого судна составляет $T_{\text{расп}} = 0,27 \cdot 20 = 5,4$ года, что значительно меньше расчетного срока службы подобного судна (20 лет).

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты в качественном плане достаточно хорошо коррелируются с результатами и выводами работ [1]–[3] в части долговечности и сроков службы морских судов, а также не противоречат результатам исследования усталостной прочности типовых ПКМ в аэрокосмической области.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. С использованием основных положений методов расчета на усталость элементов из слоистых композитов в авиационных конструкциях предложен метод расчета усталостной долговечности и срока службы наружной композитной обшивки корпуса судна.
2. Выполнен тестовый расчет усталостной долговечности и срока службы наружной композитной обшивки корпуса судна длиной около 60 м из неповрежденного стеклопластика типа govimat с укладкой слоев 45° и такого же стеклопластика с ударными повреждениями Категории 1.
3. Полученные результаты показали, что срок службы обшивки с ударными повреждениями Категории 1 равен примерно 5,4 года, что значительно меньше расчетного срока службы судна (20 лет).
4. Полученный результат показывает необходимость введения периодических осмотров и контроля наружной композитной обшивки рассматриваемого судна после 5,4 года эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davies P. Fatigue and durability of marine composites / P. Davies, D. Choqueuse // Fatigue in composites. Ed. by Harris B. — Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003. — Pp. 709–729.
2. Smith C. S. Design of Marine Structures in Composite Materials / C. S. Smith. — London: Elsevier, 1990. — 389 p.

3. Reinforced Plastics Durability / G. Pritchard, ed. — Woodhead Publishing, 1998. — 384 p.
4. ГОСТ 25.101–83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. — СССР, 1984. — 25 с.
5. Mandell J. F. Fatigue behaviour of fibre-resin composites / J. F. Mandell // *Developments in Reinforced Plastics-2*; edited by G. Pritchard. — Springer, 1982. — Pp. 67–108.
6. Kawai M. Fatigue life prediction of composite materials under constant amplitude loading / M. Kawai // *Fatigue life prediction of composites and composite structures*; Edited by A. P. Vassilopoulos. — Woodhead Publishing, 2020. — Pp. 425–463. DOI: 10.1016/B978-0-08-102575-8.00012-7.
7. Buimovich Y. Examination of the KAWAI CLD method for fatigue life prediction of composites / Y. Buimovich, D. Elmalich // *International Committee on Aeronautical Fatigue*. — Springer, Cham, 2019. — Pp. 399–409. DOI: 10.1007/978-3-030-21503-3_31.
8. Стрижиус В. Е. Особенности диаграмм постоянной усталостной долговечности слоистых композитов / В. Е. Стрижиус // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. — 2019. — Т. 25. — № 3. — С. 120–132. DOI: 10.18721/JEST.25309.
9. Phillips E. P. Effects of truncation of a predominantly compression load spectrum on the life of a notched graphite/epoxy laminate / E. P. Phillips // *Fatigue of Fibrous Composite Materials*; Edited by K. N. Lauraitis. — ASTM International, 1981. — Pp. 197–212. DOI: 10.1520/STP27621S.
10. Strizhius V. Fatigue damage accumulation under quasi-random loading of composite airframe elements / V. Strizhius // *Mechanics of Composite Materials*. — 2016. — Vol. 52. — Is. 4. — Pp. 455–468. DOI: 10.1007/s11029-016-9597-9.
11. Strizhius V. E. Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading / V. E. Strizhius // *International Committee on Aeronautical Fatigue*. — Springer, Cham, 2019. — Pp. 423–431. DOI: 10.1007/978-3-030-21503-3_33.
12. Рекомендательный циркуляр РЦ-АП25.571–1А. Оценка допустимости повреждений и усталостной прочности конструкции. — М.: ЦАГИ, 2015.
13. Advisory Circular AC 20–107B. Composite Aircraft Structure. — U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2009. — 37 p.
14. Tomblin J. Determining the Fatigue Life of Composite Aircraft Structures Using Life and Load-Enhancement Factors. Final Report (DOT/FAA/AR-10/6) / J. Tomblin, W. Seneviratne. — U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2011. — 155 p.

REFERENCES

1. Davies, P., and Choqueuse, D. “Fatigue and durability of marine composites.” *Fatigue in composites*. Ed. by Harris, B. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003. 709–729.
2. Smith, C. S. *Design of Marine Structures in Composite Materials*. London: Elsevier, 1990.
3. Pritchard, G., ed. *Reinforced Plastics Durability*. Woodhead Publishing, 1999.
4. GOST 25.101–83. Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results. USSR, 1984.
5. Mandell, J. F. “Fatigue behaviour of fibre-resin composites.” *Developments in Reinforced Plastics* — 2. Edited by G. Pritchard. Springer, 1982. 67–108.
6. Kawai, M. “Fatigue life prediction of composite materials under constant amplitude loading.” *Fatigue life prediction of composites and composite structures*. Edited by Anastasios P. Vassilopoulos. Woodhead Publishing, 2020. 425–463. DOI: 10.1016/B978-0-08-102575-8.00012-7.
7. Buimovich, Yael, and Dvir Elmalich. “Examination of the KAWAI CLD method for fatigue life prediction of composites.” *International Committee on Aeronautical Fatigue*. Springer, Cham, 2019. 399–409. DOI: 10.1007/978-3-030-21503-3_31.
8. Strizhius, V. E. “Constant-life diagrams of layered composites.” *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology* 25.3 (2019): 120–132. DOI: 10.18721/JEST.25309.
9. Phillips, Edward P. “Effects of truncation of a predominantly compression load spectrum on the life of a notched graphite/epoxy laminate.” *Fatigue of fibrous composite materials*. ASTM International, 1981. 197–212. DOI: 10.1520/STP27621S.
10. Strizhius, V. “Fatigue damage accumulation under quasi-random loading of composite airframe elements.” *Mechanics of Composite Materials* 52.4 (2016): 455–468. DOI: 10.1007/s11029-016-9597-9.

11. Strizhius, Vitaly E. "Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading." *International Committee on Aeronautical Fatigue*. Springer, Cham, 2019. 423–431. DOI: 10.1007/978-3-030-21503-3_33.
12. Advisory circular RTs-AP25.571–1A. Otsenka dopustimosti povrezhdenii i ustalostnoi prochnosti konstruktssii. M.: TsAGI, 2015.
13. Advisory Circular AC 20–107B. Composite Aircraft Structure. U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2009.
14. Tomblin, J., and W. Seneviratne. *Determining the Fatigue Life of Composite Aircraft Structures Using Life and Load-Enhancement Factors. Final Report (DOT/FAA/AR-10/6)*. U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Стрижиус Виталий Ефимович —
доктор технических наук
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
125993, Российская Федерация, Москва,
Волоколамское шоссе, 4
e-mail: vitaly.strizhius@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Strizhius, Vitaly E. —
Dr. of Technical Sciences
Moscow Aviation Institute
(National Research University)
4 Volokolamsk Highway, Moscow, 125993,
Russian Federation
e-mail: vitaly.strizhius@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 24 октября 2021 г.
Received: October 24, 2021.*

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-867-874

OPERATING PARAMETERS OF ABSORPTION REFRIGERATION UNIT INFLUENCE ON THE ZONE OF DEGASSING

E. V. Bogatyreva

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

For small vessels of the fishing fleet of the Crimean region, the problem of cargo safety is acute. Vessels are equipped with compression refrigeration units that do not provide the vessel with the required amount of cold due to the removal of the fishery from the base. In compressor refrigeration plants, electric energy is spent to perform the work of compressing the refrigerant. It is possible to use recycling absorption refrigeration units on such vessels. It seemed possible to use the energy of the exhaust gases to heat the water-ammonium mixture. Currently, the exhaust heat of the internal combustion engine is widely used for the operation of refrigeration plants and air conditioning systems. To achieve the required cooling capacity, it is possible to implement a two-stage cooling cycle, which entails an increase in mass-overall parameters of the equipment. As known, an increase in temperature of the cooling source negatively affects the cooling capacity. In the Azov-Black Sea basin in the warm period of the year, the water temperature reaches 25 °C. To ensure reliable operation of the absorption refrigeration unit, the circulation rate of the water-ammonium solution should be more than one. Otherwise, all the liquid will evaporate in the generator and the solution will not return to the absorber. It is not possible to absorb the vapour leaving the evaporator. At the same time increase of circulation multiplicity leads to increase of mass flow rate of circulating solution, which negatively affects mass-overall parameters of the unit. The effect of operational parameters of the utilization absorption water-ammonium refrigerator on the degassing zone is examined in the paper. It is shown that with the specified operating parameters, the degassing zone allows a single-stage cycle with the required cooling capacity.

Keywords: absorption refrigeration unit, water-ammonium mixture, degassing zone, circulation multiplicity, mass-overall parameters, solution concentration, heating medium, cooling medium, exhaust gases, single-stage cycle.

For citation:

Bogatyreva, Elena V. "Operating parameters of absorption refrigeration unit influence on the zone of degassing." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 867–874. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-867-874.

УДК 621.574.013–932.2

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА ЗОНУ ДЕГАЗАЦИИ

Е. В. Богатырева

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Российская Федерация

В работе рассмотрена актуальная для малых судов рыболовного флота Крымского региона проблема сохранности груза. Отмечается, что данные суда оснащены компрессионными холодильными установками, не обеспечивающими их необходимым количеством холода в связи с удалением промысла от места базирования. Отмечается, что в компрессорных холодильных установках затрачивается электрическая энергия на совершение работы сжатия холодильного агента. На таких судах представляется возможным применение утилизационных абсорбционных холодильных установок, в которых реализовано использование энергии отработавших газов для нагрева водоаммиачной смеси. Подчеркивается, что в настоящее время широко используется теплота отработавших газов двигателя внутреннего сгорания для работы холодильных установок и систем кондиционирования. Для достижения требуемой холодопроизводительности возможно осуществление двухступенчатого холодильного цикла, что влечет увеличение массогабаритных показателей

оборудования. Известно, что повышение температуры охлаждающего источника негативно сказывается на холодопроизводительности. В Азово-Черноморском бассейне в теплый период года температура воды достигает 25 °С, поэтому для обеспечения надежной работы абсорбционной холодильной установки кратность циркуляции водоаммиачного раствора должна быть больше единицы, в противном случае в генераторе испарится вся жидкость, и раствор не возвратится в абсорбер. При этом невозможно осуществить абсорбцию пара, уходящего из испарителя. В то же время повышение кратности циркуляции приводит к увеличению массового расхода циркулирующего раствора, что негативно сказывается на массогабаритных показателях установки. В работе исследовано влияние эксплуатационных параметров утилизационной абсорбционной водоаммиачной холодильной машины на зону дегазации. Показано, что при указанных эксплуатационных параметрах зона дегазации позволяет осуществить одноступенчатый цикл с обеспечением требуемой холодопроизводительности.

Ключевые слова: абсорбционная холодильная установка, водоаммиачная смесь, зона дегазации, кратность циркуляции, массогабаритные показатели, концентрация раствора, греющая среда, охлаждающая среда, уходящие газы, одноступенчатый цикл.

Для цитирования:

Богатырева Е. В. Влияние эксплуатационных параметров абсорбционной холодильной установки на зону дегазации / Е. В. Богатырева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 867–874. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-867-874.

Введение (Introduction)

В настоящее время суда рыбопромыслового флота Крымского региона (Азово-Черноморский бассейн) имеют тенденцию удаляться от места базирования. Часть таких судов изначально не оборудована холодильными установками, что создает проблему сохранности груза в теплое время года при удалении от мест базирования. На малых судах, оборудованных компрессорными холодильными установками, электрическая энергия затрачивается на совершение работы сжатия холодильного агента. В настоящее время в рамках энергосбережения все большее распространение получают *теплоиспользующие холодильные машины*. В частности, на таких судах возможна установка утилизационных абсорбционных холодильных машин (АБХМ). Такие машины могут использовать пар утилизационного котла, работающего на отработавших газах судового главного двигателя внутреннего сгорания. Одним из требований, предъявляемых к новому оборудованию в целом и к АБХМ в частности является соблюдение минимально возможных массогабаритных показателей. Для этого необходимо, чтобы требуемая холодопроизводительность обеспечивалась одноступенчатым циклом.

Энергосбережению и, как следствие, энергетической эффективности холодильных машин посвящены работы [1]–[5]. Теплоиспользующие холодильные машины рассмотрены в работах [1], [2], [6]–[8]. Наряду с аммиачными, рассматриваются утилизационные бромисто-литиевые холодильные машины [9], которые, однако, не способны обеспечить низкие температуры для хранения улова. Таким образом, для решения поставленной задачи следует исследовать возможность использования на малых судах промыслового флота утилизационной абсорбционной одноступенчатой холодильной машины.

Целью данной работы является оценка возможности осуществления одноступенчатого цикла путем исследования зависимости зоны дегазации от эксплуатационных параметров АБХМ на малых промысловых судах, работающих в Азово-Черноморском бассейне в теплый период года.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Поставленная задача исследований решалась при помощи использования известных методик, применяемых в работе [10]. На результаты расчета цикла значительное влияние оказывает кратность циркуляции, которая зависит от концентрации растворов в установке и определяется по выражению:

$$f = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a}, \quad (1)$$

где ξ_d , ξ_a , ξ_r — соответственно концентрация раствора после конденсатора, слабого раствора после генератора (кипятильника) и крепкого раствора после абсорбера.

Из выражения (1) следует, что на кратность циркуляции большое влияние оказывает зона дегазации, т. е. $(\xi_r - \xi_a)$. В водоаммиачных АБХМ действительная зона дегазации должна быть больше 6 %, в противном случае резко возрастает кратность циркуляции, и работа АБХМ становится неустойчивой [11].

Для обеспечения работоспособности установки при $(\xi_r - \xi_a) < 0,06$ используются многоступенчатые циклы, что вызывает существенное ее усложнение. В данном случае греющей средой для работы АБХМ является насыщенный пар, производимый утилизационным паровым котлом, использующим теплоту уходящих газов. Температура пара зависит от давления в котле. Изначально предполагалось использовать греющий пар давлением не более $p = 1$ МПа, исходя из соображений безопасности, поэтому диапазон изменения температуры греющего источника составил $t_h = (100-170)^\circ\text{C}$.

В качестве охлаждающей среды АБХМ планируется использовать забортную воду. Температура охладителя t_w оказывает влияние на давление конденсации паров аммиака. Диапазон ее изменения принят $15-25^\circ\text{C}$, что соответствует температурному режиму Азово-Черноморского бассейна в теплый период года. Давление в конденсаторе p_k и давление кипения в генераторе p_g равны и определяются по температуре конденсации чистого аммиака. Если повышать давление конденсации при постоянной температуре греющего источника t_h , то температура конденсации чистого аммиака увеличивается, соответственно, растет концентрация слабого раствора после генератора, и, как следствие, уменьшается зона дегазации (рис. 1, а).

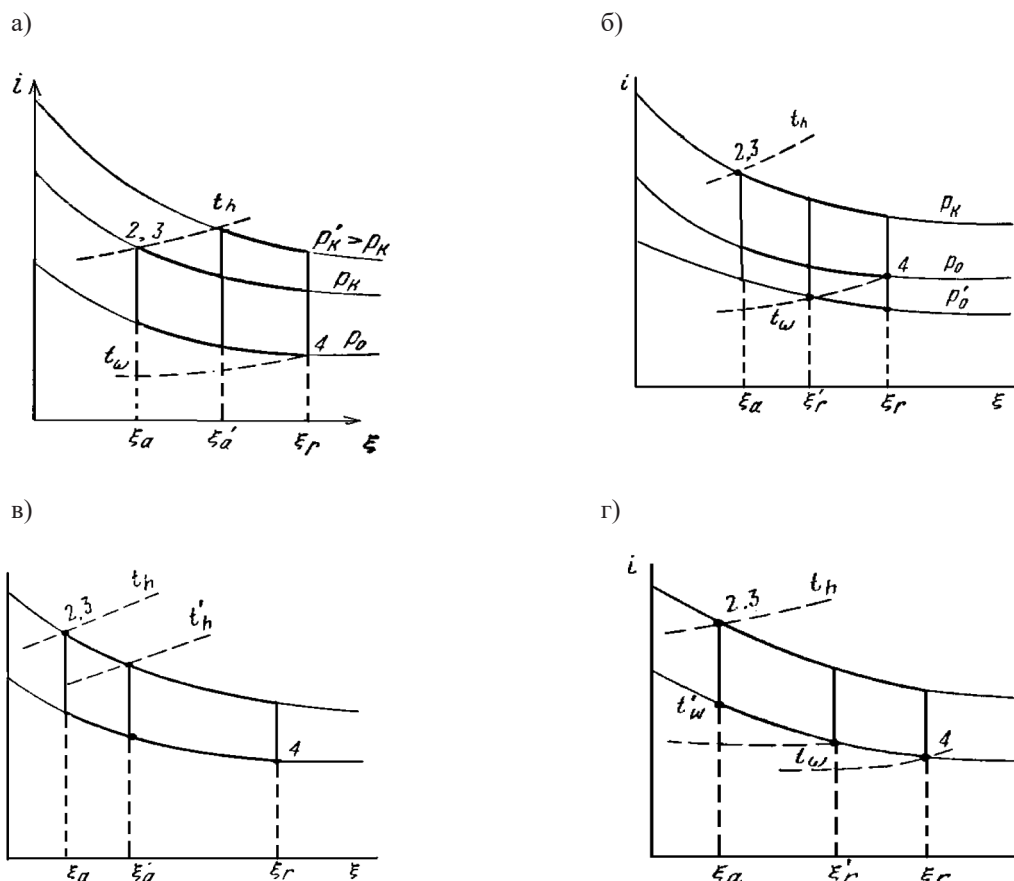


Рис. 1. Зона дегазации при: а — увеличении давления конденсации; б — при уменьшении давления кипения; в — при понижении температуры греющего источника; г — при повышении температуры охлаждающей воды

Влияние давления в генераторе на зону дегазации исследовалось при температуре греющего пара $t = t_h = (140-160)^\circ\text{C}$. В соответствии с выбранным диапазоном изменения температуры охлаждающей

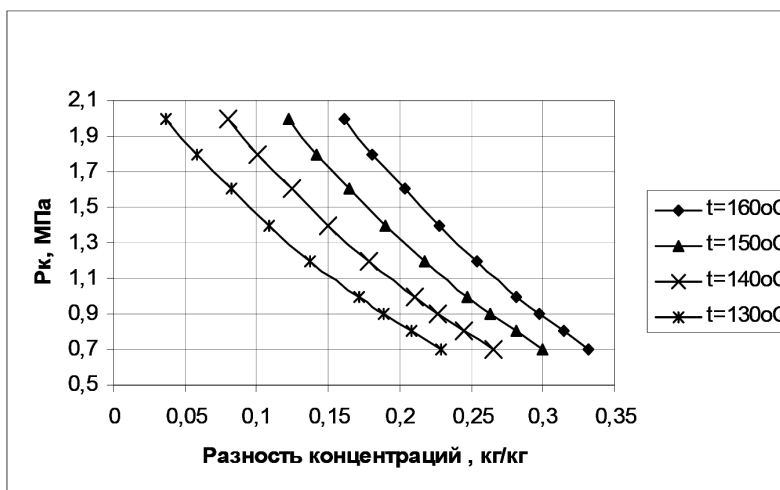
воды давления в генераторе были приняты в интервале $p_k = (0,6-2,0)$ МПа. Известно, что уменьшение давления в абсорбере, которое равно давлению в испарителе p_0 , при неизменной температуре охлаждающей среды приводит к меньшей концентрации крепкого раствора (рис. 1, б).

Как следует из рис. 1, в, понижение температуры греющего источника при неизменном давлении конденсации вызывает повышение концентрации слабого раствора на выходе из генератора. Оценка влияния температуры греющего источника на разность концентраций выполнялась при различных значениях давления конденсации.

Результаты (Results)

Зависимость $(\xi_r - \xi_a)$ от p_k представлена на рис. 2, а. Анализ полученных зависимостей показал, что зона дегазации становится меньше допустимого значения для $t_h \leq 130^\circ\text{C}$ и $p_k > 1,8$ МПа. При давлении в генераторе $p_k = 1,8$ МПа, но при $t_h = 140^\circ\text{C}$, зона дегазации имеет допустимые значения для осуществления одноступенчатого цикла АБХМ.

а)



б)

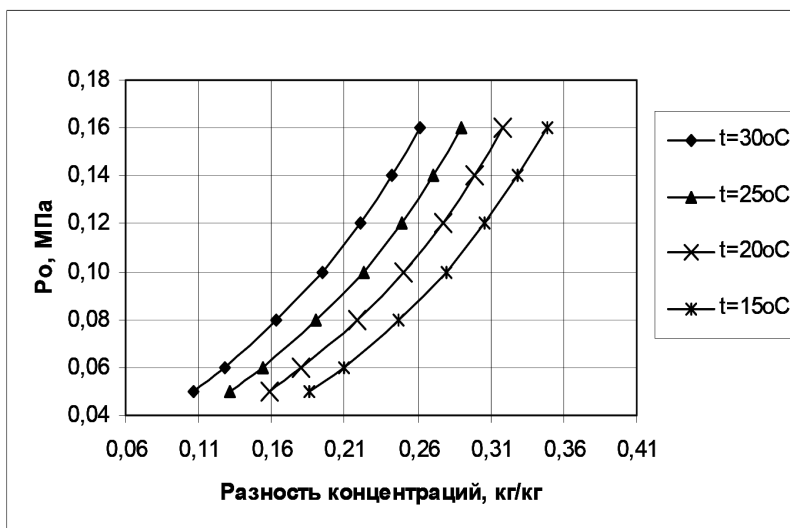


Рис. 2. Влияние давления в генераторе на зону дегазации при различных значениях температуры греющего пара (а) и охлаждающей воды (б)

На рис. 2, б представлены результаты исследований влияния давления кипения в испарителе на зону дегазации для диапазона температур охлаждающей воды $t_w = t$ (15...30) °С. В интервале

давлений $p_0 = (0,05...0,16)$ МПа и исследуемых температур зона дегазации находится в допустимых пределах.

Из рис. 3 следует, что значения давлений $p_k = (0,9-1,2)$ МПа и температур $t_h = (110-160)$ °С, в зоне дегазации меньше допустимых при $p_k > 1,2$ МПа, $t_h < 112$ °С.

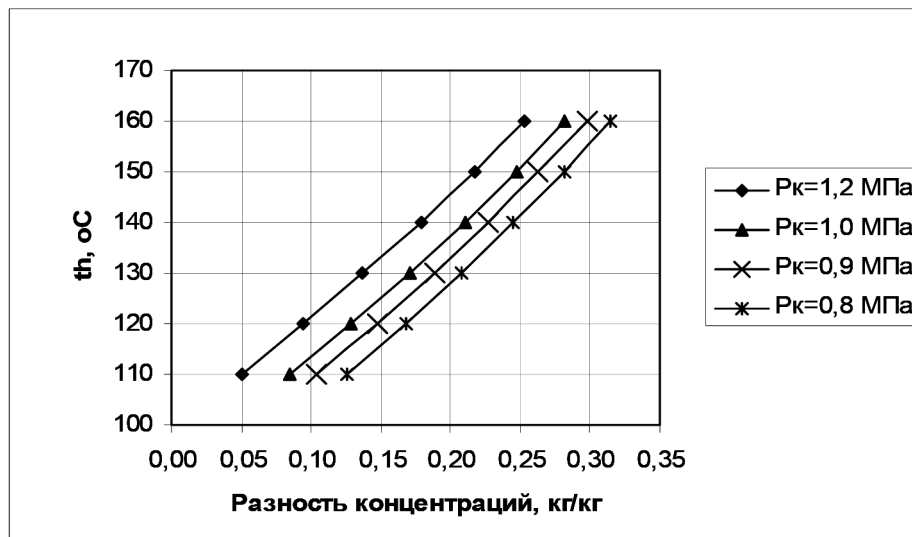


Рис. 3. Влияние температуры греющего источника на разность концентраций при различных давлениях конденсации аммиака

Ранее (см. рис. 1, а, рис. 2, а) отмечалось, что повышение давления конденсации p_k при постоянной температуре греющего пара t_h ведет к уменьшению зоны дегазации. Так, при $t_h = 112$ °С, но при $p_k = 1,0$ МПа зона дегазации уже находится в допустимых пределах. Известно также, что повышение температуры охлаждающей среды приводит к понижению концентрации крепкого (см. рис. 1, з), а давление кипения в испарителе определяется по требуемой температуре в холодильной камере. Низшая требуемая температура в холодильной камере рассматриваемой АБХМ $t_s = -15$ °С. Данной температуре соответствует давление кипения в испарителе $p_0 = 0,15$ МПа. Результаты исследований влияния температуры охлаждающей воды на разность концентраций при различных значениях давления конденсации и температуры греющего пара (температура кипения в испарителе $t_s = -15$ °С) приведены на рис. 4.

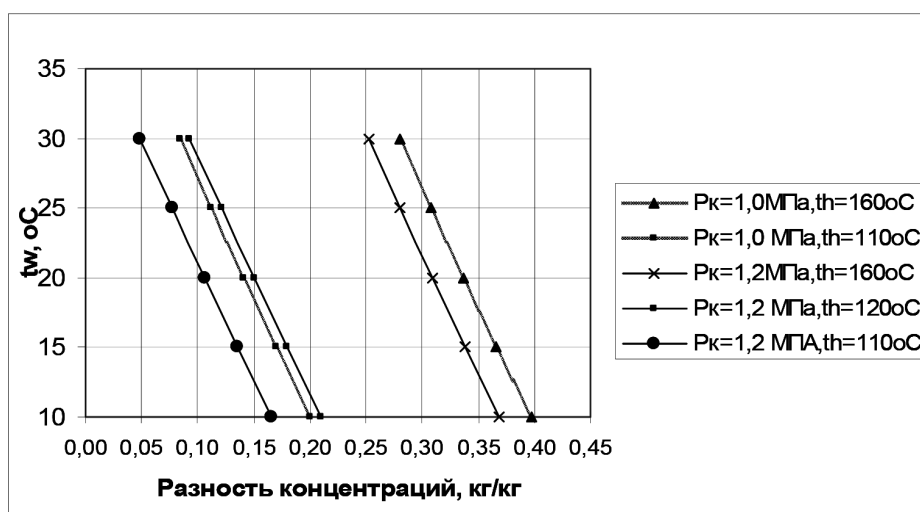


Рис. 4. Влияние температуры охлаждающей воды на разность концентраций при различных значениях давления конденсации и температуры греющего пара

Обсуждение (Discussion)

Результаты исследований показали, что при давлении конденсации $p_k = (1,0–1,2)$ МПа и, соответственно, температуре греющего пара $t_h = (110–160)$ при $p_k = 1,2$ МПа требуемый предел разности концентраций обеспечивается при температуре $t_h > 120$ °С греющего источника. При давлении конденсации аммиака $p_k = 1,0$ МПа и ниже разность концентрации находится в допустимых пределах в интервале температур $t_h = (110...160)$.

Усовершенствованию циклов холодильных машин как за счет добавления новых элементов, так и вследствие оптимизации эксплуатационных параметров посвящены работы [12]–[16]. Включение в состав утилизационных АБХМ таких агрегатов, как дефлегматор, теплообменник и ректификатор не оказывает влияния на цикл жидкой фазы раствора, но повышает холодопроизводительность машины за счет доочистки паров аммиака от примесей водяных паров.

Заключение

Исследования АБХМ показали, что в интервале изменения температуры греющего пара $t_h = (110...160)$ и температуры охлаждающей воды $t_w = (15–25)$ °С ее работоспособность может быть обеспечена одноступенчатым циклом, что позволяет в дальнейшем оптимизировать эксплуатационные параметры применительно к малым рыболовным судам при промысле с теплым периодом года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титлов А. С. Поиск методов повышения энергетической эффективности абсорбционных холодильных приборов / А. С. Титлов [и др.] // Холодильная техника и технология. — 2017. — Т. 53. — № 2. — С. 21–28. DOI: 10.15673/ret.v53i2.591.
2. Товарас Н. В. Энергосбережение и энергоэффективность: утилизация тепловых выбросов / Н. В. Товарас, Н. В. Савкина // Холодильная техника. — 2019. — № 2. — С. 6–10.
3. Sukhikh A. A. Experimental and numerical investigations of heat regeneration process efficiency in a heat pump with a mixture of refrigerants / A. A. Sukhikh, I. S. Antanenkova, V. N. Kuznetsov, E. V. Mereutsa // International Journal of Energy for a Clean Environment. — 2016. — Vol. 17. — Is. 2–4. — Pp. 209–222. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2017019186.
4. Yu F. W. Cooling effectiveness of mist precooler for improving energy performance of air-cooled chiller / F. W. Yu, K. T. Chan, J. Yang, R. K. Y. Sit // Thermal Science. — 2018. — Vol. 22. — Is 1. — Pp. 193–204.
5. Менделеев Д. И. Исследование влияния условий эксплуатации на эффективность использования абсорбционно-холодильной машины в цикле газотурбинных и парогазовых установок / Д. И. Менделеев [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2020. — Т. 24. — № 4 (153). — С. 821–831. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-4-821-831.
6. Титлова О. А. Системы автоматического управления для повышения эффективности абсорбционных холодильных приборов / О. А. Титлова // Refrigeration Engineering and Technology. — 2016. — № 52 (1). — С. 86–94. DOI: 10.21691/ret.v52i1.35/.
7. Мереуца Е. В. Экспериментальное исследование термодинамической эффективности комплекса абсорбционной холодильной установки и теплового насоса / Е. В. Мереуца, А. А. Сухих // Вестник Международной академии холода. — 2019. — № 3. — С. 23–28. DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-3-23-28.
8. Zúñiga-Puebla H. F. Thermodynamic analysis of one and two stages absorption chiller powered by a co-generation plant / H. F. Zúñiga-Puebla, E. C. Vallejo-Coral, J. R. V. Galaz // Ingenius. — 2019. — № 21. — Pp. 41–52. DOI:10.17163/ings.n21.2019.04.
9. Radchenko R. Utilizing the heat of gas module by an absorption lithium-bromide chiller with an ejector booster stage / R. Radchenko, N. Radchenko, A. Tsoy, S. Forduy, Z. Anatoliy, I. Kalinichenko // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing LLC, 2020. — Vol. 2285. — Is. 1. — Pp. 030084. DOI: 10.1063/5.0026788.
10. Сакун И. А. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин / И. А. Сакун. — Л.: Судостроение, 1983. — 328 с.
11. Бадылькес И. С. Абсорбционные холодильные машины / И. С. Бадылькес, Р. Л. Данилов. — М.: Москва, 1966. — 356 с.

12. Возможности оптимизации «небольших» систем холодоснабжения // Холодильная техника. — 2019. — № 6. — С. 10–13.

13. Талызин М. С. 8-я Международная конференция «Холодильные технологии с использованием аммиака и CO₂» / М. С. Талызин // Холодильная техника. — 2019. — № 5. — С. 44–45.

14. Осадчук Е. А. Математическое моделирование рабочих режимов дефлегматора абсорбционного водоаммиачного холодильного агрегата в системах получения воды из атмосферного воздуха с использованием солнечной энергии / Е. А. Осадчук, В. Х. Кириллов // Холодильная техника и технология. — 2017. — Т. 53. — № 1. — С. 11–19. DOI: 10.15673/ret.v53i1.534.

15. Холодков А. О. Моделирование тепловых режимов дефлегматора бытового абсорбционного холодильного агрегата / А. О. Холодков, А. С. Титлов, О. А. Титлова // Холодильная техника и технология. — 2017. — Т. 53. — № 4. — С. 4–11.

16. Pathak S. Design Investigation of 5 kW Organic Rankine Cycle (ORC) System Using Diffusion Absorption Refrigeration (DAR) for Cooling and Power Generation for India / S. Pathak, S. K. Shukla // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. — 2019. — Vol. 16. — Is. 2. — Pp. 35–42. DOI: 10.3233/AJW190017.

REFERENCES

1. Titlov, A. S., I. N. Ishchenko, O. A. Titlova, A. O. Kholodkov, and Yu. A. Ocheretyany. “Search of Methods for Increasing Absorption Refrigeration Devices Power Efficiency.” *Refrigeration engineering and technology* 53.2 (2017): 21–28.

2. Tovaras, N. V., and N. V. Savkina. “Energoberezhenie i energoeffektivnost’: utilizatsiya teplovykh vybrosov.” *Kholodil’naya tekhnika* 2 (2019): 6–10.

3. Sukhikh, Andrey A., I. S. Antanenkova, V. N. Kuznetsov, and E. V. Mereutsa. “Experimental and numerical investigations of heat regeneration process efficiency in a heat pump with a mixture of refrigerants.” *International Journal of Energy for a Clean Environment* 17.2–4 (2016): 209–222. DOI: 10.1615/InterJEnerClean Env.2017019186.

4. Yu, Fu Wing, K. T. Chan, J. Yang, and R. K. Y. Sit. “Cooling effectiveness of mist pre-cooler for improving energy performance of air-cooled chiller.” *Thermal Science* 22.1 (2018): 193–204.

5. Mendelev, Dmitrii I., Georgiy E. Marin, Yuri Ya. Galitskii, and Azat R. Akhmetshin. “Study of the effect of operating conditions on the efficiency of the absorption-refrigerating system in gas turbine and combined-cycle plants.” *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 24.4(153) (2020): 821–831. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-4-821-831.

6. Titlova, O. A. “Automatic control systems for improving the efficiency of absorption refrigeration units.” *Refrigeration Engineering and Technology* 52(1) (2016): 86–94. DOI: 10.21691/ret.v52i1.35.

7. Mereutsa, E. V., and Andrey Anatolyevich Sukhikh. “Experimental study of thermodynamic efficiency of the absorption refrigeration machine and heat pump complex.” *Journal of International Academy of Refrigeration* 3 (2019): 23–28. DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-3-23-28.

8. Zúñiga-Puebla, Hugo F., E. C. Vallejo-Coral, and Jose Ramon Vega Galaz. “Thermodynamic analysis of one and two stages absorption chiller powered by a cogeneration plant.” *Ingenius* 21 (2019): 41–52. DOI:10.17163/ings.n21.2019.04.

9. Radchenko R, N. Radchenko, A. Tsoy, S. Forduy, Z. Anatoliy, and I. Kalinichenko. “Utilizing the heat of gas module by an absorption lithium-bromide chiller with an ejector booster stage.” *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2285. No. 1. AIP Publishing LLC, 2020. DOI: 10.1063/5.0026788.

10. Sakun, I. A. *Teplovye i konstruktivnye raschety kholodil’nykh mashin*. L.: Sudostroenie, 1983.

11. Badyl’kes, I. S., and R. L. Danilov. *Absorbtsionnye kholodil’nye mashiny*. M.: Moskva, 1966.

12. “Vozmozhnosti optimizatsii «nebolshikh» sistem kholodosnabzheniya.” *Kholodil’naya tekhnika* 6 (2019): 10–13.

13. Talyzin, M. S. “8-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Kholodil’nye tekhnologii s ispol’zovaniem ammiaka i SO₂».” *Kholodil’naya tekhnika* 5 (2019): 44–45.

14. Osadchuk, E. A., and V. Kh. Kirillov. “Mathematical Simulation of Operating Modes of Absorption Water-Ammonia Refrigeration Unit Rectifier in the Systems for Producing Water from Atmospheric Air Using Solar Energy.” *Refrigeration Engineering and Technology* 53.1 (2017): 11–19. DOI: 10.15673/ret.v53i1.534.

15. Kholodkov, A. O., A. S. Titlov, and O. A. Titlova. “Simulation of the Thermal Regime of the Reflux Condenser Domestic Absorption Refrigeration Unit.” *Refrigeration Engineering and Technology* 53.4 (2017): 4–11.

16. Pathak, Saurabh, and S. K. Shukla. “Design Investigation of 5 kW Organic Rankine Cycle (ORC) System Using Diffusion Absorption Refrigeration (DAR) for Cooling and Power Generation for India.” *Asian Journal of Water, Environment and Pollution* 16.2 (2019): 35–42. DOI: 10.3233/AJW190017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Богатырева Елена Владимировна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: arev_66@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Bogatyreva, Elena V. —
PhD, associate professor
Kerch State Maritime
Technological University
82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: arev_66@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 8 ноября 2021 г.
Received: November 8, 2021.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886

STUDYING DYNAMICS OF HOISTING APPARATUS DRIVES OF A FISHING VESSEL

A. V. Ivanovskaya¹, V. A. Zhukov², V. V. Popov¹

¹ — Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The existing types of drives for ship deck lifting devices are analyzed in the paper; a rationale for the use of a hydraulic drive that is sensitive to load changes at designing such devices is provided. A typical feature of the most deck hoisting equipment is work in special conditions. The effect of wind, rolling, changes in the parameters of the “cable-load” system (its shape, mass, hydrodynamic and inertial coefficients, cable length), the transition from one medium to another one should be considered as special conditions. Non-stationary loads arising during the operation of this class of equipment occur not only during transient processes, but also during steady-state operation, which negatively affects their performance and reliability. One of the requirements for the drive of such equipment is the optimal operating parameters: speed variation in a wide range, possibility of reversing, implementation of smooth regulation of turnovers and torque, overload capacity. Both hydromechanical and electric drives meet these requirements. Therefore, for the optimal selection of the lifting devices drive of a fishing vessel during design, it is necessary to perform a dynamic analysis. The choice of a model for dynamic calculations depends on many factors corresponding to specific tasks. The mathematical models of electromechanical and hydraulic drive of a ship lifting device with a transmission mechanism and one engine are developed in the paper. Numerical simulation analysis has shown that the hydraulic drive has better recoverability to normal operation after a transient. Therefore, in the drive system of the lifting devices of a fishing vessel, it is more expedient to use a hydraulic drive capable of adapting to load variability.

Keywords: boat hoist, drive dynamics, load variability, adaptive drive

For citation:

Ivanovskaya, Aleksandra V., Vladimir A. Zhukov, and Vladimir V. Popov. “Studying dynamics of hoisting apparatus drives of a fishing vessel.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 875–886. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886.

УДК 621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИВодОВ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ РЫБОПРОМЫСЛОВОГО СУДНА

А. В. Ивановская¹, В. А. Жуков², В. В. Попов¹

¹ — ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», Керчь, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе выполнен анализ существующих видов приводов судовых палубных грузоподъемных устройств и представлено обоснование применения гидравлического привода, чувствительного к изменению нагружения при проектировании таких устройств. Исследована такая характерная особенность большинства палубных грузоподъемных устройств, как работа в особых условиях, к которым относятся: воздействие ветра, качки, изменение параметров системы «трос – груз» (его формы, массы, гидродинамического и инерционного коэффициентов, длины троса), переход из одной среды в другую. Отмечается, что нестационарные нагрузки, возникающие при работе такого класса оборудования, имеют место не только при переходных процессах, но и во время установившегося режима работы, что негативно отражается на их работоспособности и надежности. Подчеркивается, что одним из требований, предъявляемых к приводу такого оборудования, является соблюдение оптимальных рабочих параметров: изменение скоростей в широком диапазоне, возможность реверсирования, осуществление плавного регулирования оборотов и крутящего момента перегрузочная способность. Этим параметрам удовлетворяет как

гидромеханический, так и электрический привод. Поэтому для оптимального выбора привода грузоподъемных устройств рыбопромыслового судна при проектировании необходимо проведение динамического анализа. Известно, что применение распространенных моделей Кельвина – Фойгта, Максвелла и Томсона – Пойнтинга или их систем позволяет получить некоторую конечную деформацию от мгновенной и бесконечно длительной приложенной нагрузки, что, в некоторой степени, соответствует реальной деформации, имеющей место во время работы судового грузоподъемного оборудования. Выбор модели для динамических расчетов зависит от многих факторов, соответствующих конкретно поставленным задачам. В статье разработаны математические модели электромеханического и гидравлического привода судового грузоподъемного устройства с передающим механизмом и одним двигателем. Данные приводы представлены в виде четырехмассовой физической модели. В полученных моделях учтено влияние особых условий работы оборудования и переменность нагружения. Анализ численного моделирования показывает, что гидравлический привод обладает лучшей восстанавливаемостью к нормальной работе после переходного процесса. Поэтому в системе привода грузоподъемного устройств рыбопромыслового судна более целесообразным является использование гидравлического привода, способного адаптироваться к переменности нагружения.

Ключевые слова: судовая лебедка, динамика привода, переменность нагружения, адаптивный привод.

Для цитирования:

Ивановская А. В. Исследование динамики приводов грузоподъемных устройств рыбопромыслового судна / А. В. Ивановская, В. А. Жуков, В. В. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 875–886. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886.

Введение (Introduction)

Одним из целевых показателей «Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 г.», соответствующей базовому варианту «Прогноза социально-экономического развития РФ до 2036 г.», является полное обновление добывающих мощностей судов рыбопромыслового флота, а также его энерговооружения.

Эффективность эксплуатации рыбопромыслового судна напрямую зависит от надежности и работоспособности грузоподъемных устройств, задействованных в промысловых операциях. К такому оборудованию относятся траловые лебедки, лебедки для кошелькового невода, неводо-выборочные барабаны, машины для выборки кошельковых неводов, тяговые комплексы и т. п. [1]. Для привода в действие такого оборудования расходуется значительная часть всей вырабатываемой энергии. На рыбопромысловых судах суммарная мощность вспомогательных механизмов измеряется в пределах 30–40 % мощности главного двигателя. Режим промысла на рыбодобывающем судне составляет порядка 40–90 %, поэтому общее относительное энергопотребление в переводе на топливо для вспомогательных энергетических установок достигает 70 % [2].

Доля отказов, приходящаяся на судовые вспомогательные механизмы рыбопромыслового судна, составляет в пределах 30–50 % [3]. От надежности грузоподъемных устройств в значительной степени зависит безопасность судна, а также экономическая и эксплуатационная эффективность промысла гидробионтов, так как такое оборудование на судне не дублируется. Отдельное внимание при оценке надежности вспомогательных механизмов рыбопромыслового судна следует уделить исследованию динамических процессов, имеющих место при работе грузоподъемного оборудования. Буксируемое и поднимаемое на борт судна орудие лова с уловом, достигающим сотни тонн, может привести к опрокидыванию судна. Несмотря на значительное количество работ, посвященных изучению вопросов надежности, проведение исследований в этой области применительно к судовой энергетической установке в целом и ее вспомогательному оборудованию по-прежнему является актуальным и имеет практическую значимость.

Целью работы является исследование динамики привода грузоподъемных устройств рыбопромыслового судна.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В состав приводной системы грузоподъемного оборудования рыбопромыслового судна входят рабочие элементы и элементы приводов, передач, управления, обслуживания и опорные элементы.

Все они находятся в определенном функциональном взаимодействии (рис. 1). Так, рабочие элементы (навивочный барабан) преобразуют вращательное движение привода в поступательное движение грузовой системы; элементы привода (двигатели и энергопитатели) являются источниками получения энергии и, соответственно, движения с заданной скоростью, которое передается к исполнительным (рабочим) элементам за счет элементов передач (цилиндрические, конические и червячные редукторы, вариаторы и др.). В качестве элементов управления используется следующая аппаратура: пусковые реостаты, контроллеры, контакторы, магнитные станции, распределители, золотники, дроссели и другие устройства, а также защитная и блокировочная аппаратура, муфты включения, тормозные устройства, измерительные приборы, сигнальные устройства и т. д.

Элементы управления обеспечивают выполнение рабочего процесса грузоподъемного устройства в заданной последовательности и с необходимыми параметрами. Управление может осуществляться как дистанционно, так и непосредственно на машине, размещаясь частично в ней или на некотором расстоянии от нее. Под *обслуживающими элементами* понимают системы смазки, регулирования, охлаждения и др. В качестве источника энергии, передаваемой на рабочий элемент, на судне применяются гидравлический или электрический двигатель, которые могут быть скомпонованы с барабаном в одном элементе или размещены отдельно. Возможен также вариант получения энергии непосредственно от двигателя внутреннего сгорания.

Выбор вида системы привода осуществляется в соответствии требованиями, предъявляемыми непосредственно к судовому грузоподъемному устройству (широкий диапазон скоростей, реверсивность, адаптивность к внешним условиям нагружения и гидрометеорологическим факторам). Немаловажным при проектировании грузоподъемного оборудования являются массогабаритные, эксплуатационные и экономические показатели, а также целесообразность получения энергии от того или иного источника питания.

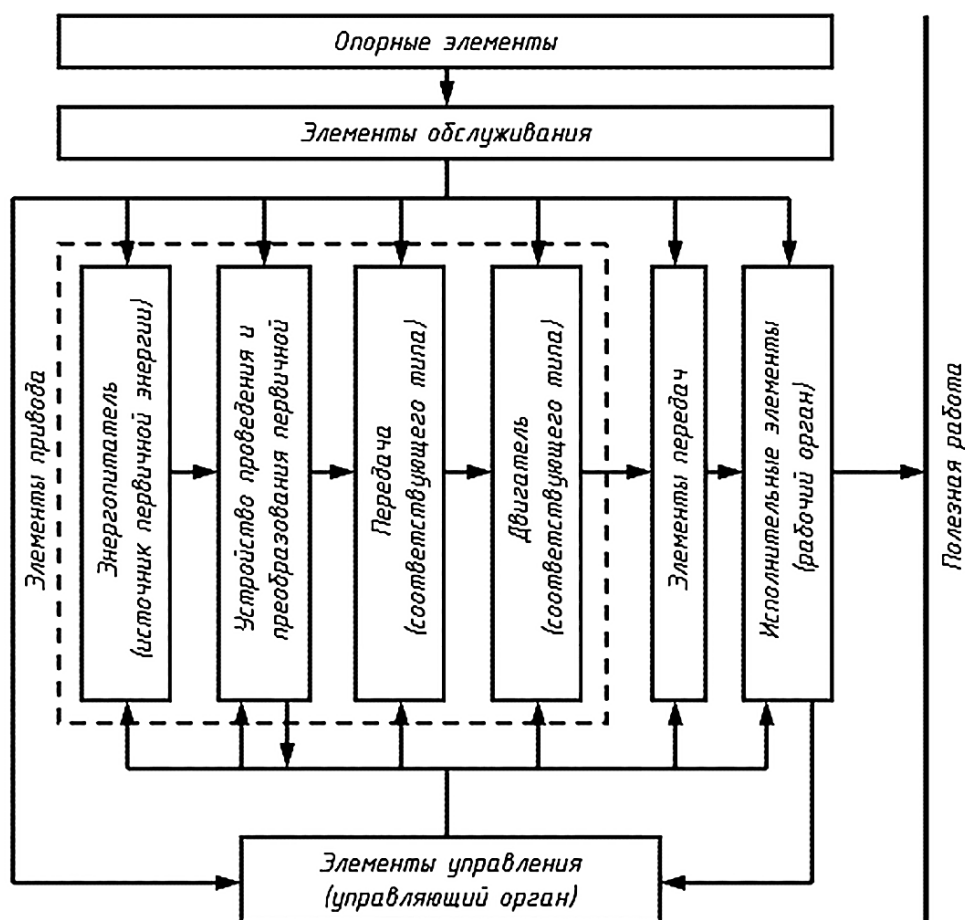


Рис. 1. Структурная схема привода грузоподъемных устройств рыболовецкого судна

Для привода грузоподъемного оборудования на рыбопромысловых судах используются электро- и гидропривод, позволяющие осуществлять наиболее целесообразную схему отбора мощности от главных двигателей или от бортовой электросети. На рис. 2 и 3 приведены примеры структурных схем судовых энергетических установок отечественных промысловых судов, представляющие собой использование многофункционального отбора мощности от главных двигателей для привода грузоподъемных устройств, движения судна и обеспечения резерва электроэнергии для судовых электростанций.

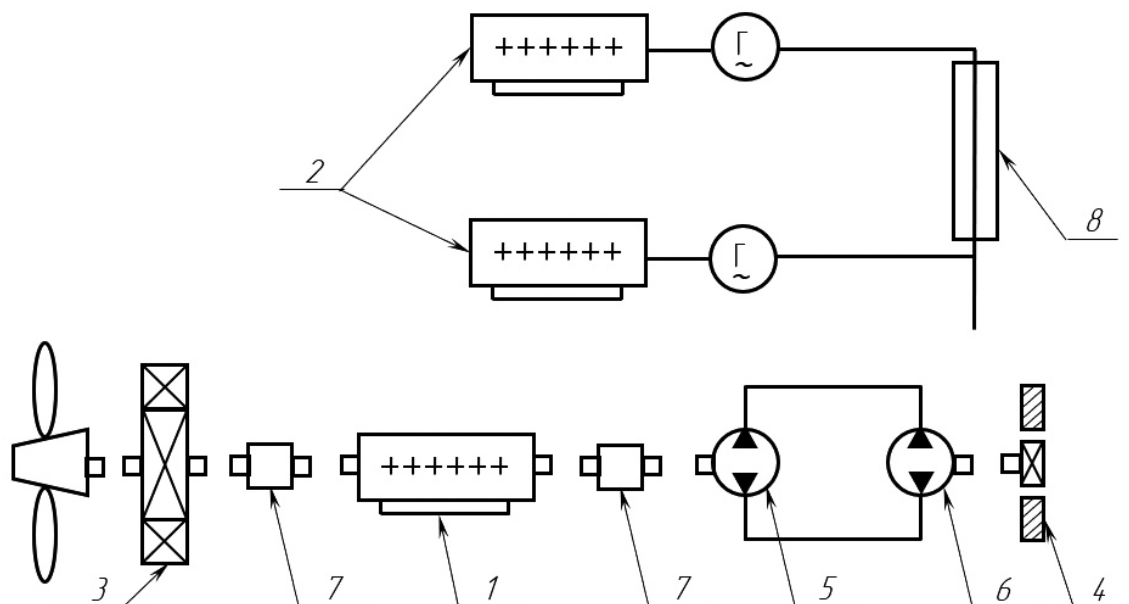


Рис. 2. Структурная схема СЭУ с гидроприводом:
1 — главный двигатель; 2 — вспомогательный дизель-генератор; 3 — редуктор;
4 — промышленная лебедка; 5 — насос гидропередачи; 6 — гидродвигатель;
7 — разобщительная муфта; 8 — ГРЩ

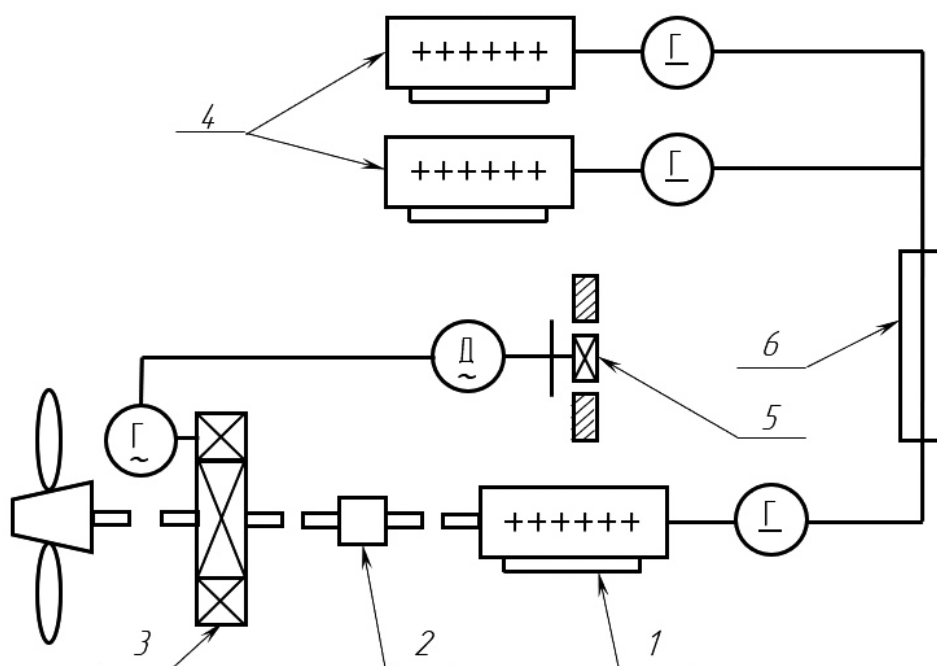


Рис. 3. Структурная схема СЭУ с электроприводом:
1 — главный двигатель; 2 — гидравлическая муфта; 3 — редуктор;
4 — вспомогательный дизель-генератор; 5 — промышленная лебедка; 6 — ГРЩ

Привод от двигателей внутреннего сгорания имеет небольшое распространение, в частности, на маломерных судах, характеризуемых ограничениями по массогабаритным показателям грузоподъемного устройства. В качестве первичного источника энергии используется либо главный двигатель с отбором мощности порядка 15–20 %, либо вспомогательный двигатель с отбором мощности в пределах номинальной мощности. Поэтому при проектировании промышленного грузоподъемного оборудования выбор осуществляется между гидро- и электроприводами.

Во время выбора типа привода с разными источниками энергии необходимо руководствоваться не только удельными показателями энергозатрат, металлоемкости, габаритными размерами, но и показателями динамических характеристик этих приводов, так как во время переходных процессов рабочие элементы системы привода воспринимают наибольшие пиковые нагрузки, а в механической системе могут возникать длительные колебательные процессы, которые являются причиной появления в ней нежелательных резонансных явлений. Поэтому необходимо провести исследование динамических явлений в электромеханическом и гидравлическом приводах, при котором целесообразно моделировать механическую часть привода отдельно от гидравлической и электрической. Расчетные модели при этом могут быть различными, в зависимости от поставленной задачи моделирования, требуемой степени эквивалентности. В них учитываются тип передачи механической энергии от приводного двигателя, конструктивные особенности конструируемого рабочего механизма, его динамические свойства, тип натяжного устройства, упруго-инерционные характеристики элементов и т. п. [4]–[9].

Задачи динамики судового грузоподъемного устройства непосредственно связаны с деформацией троса, который при большой длине (порядка 1000 м) может иметь переменные массу и гидродинамический коэффициент сопротивления. Поэтому при решении таких задач также необходимо учитывать и динамические свойства троса [10]–[14]. Наиболее распространенными в исследованиях динамических процессов тросов являются модели Кельвина – Фойгта (рис. 4, а), Максвелла (рис. 4, б) и модель Томсона – Пойнтинга (рис. 4, в), в основе которых находится упругий элемент E (тело Гука) и вязкий элемент μ (вязкое тело Ньютона).

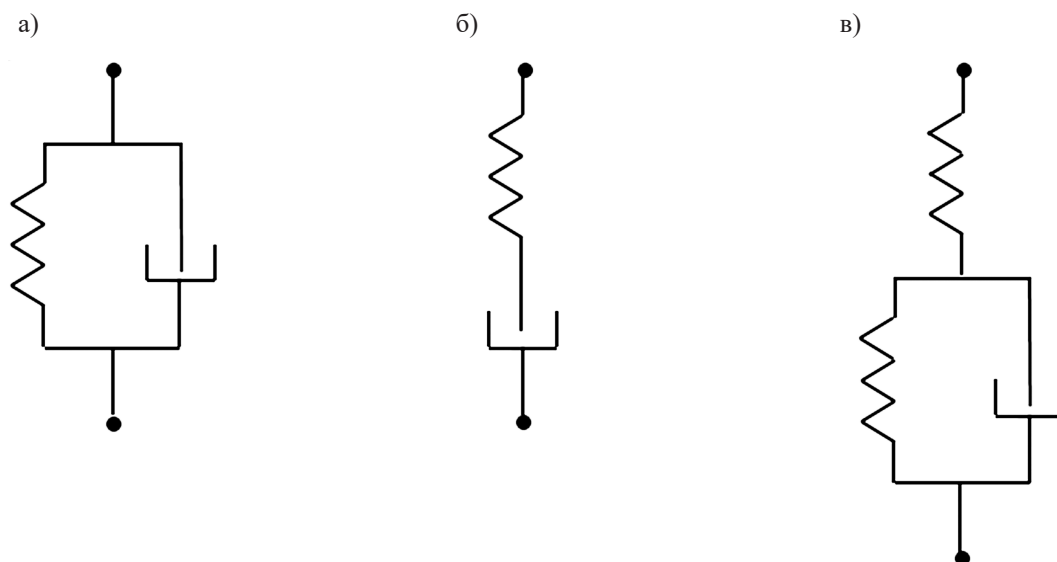


Рис. 4. Реологические модели троса а — модель Кельвина – Фойгта; б — модель Максвелла; в — модель Томсона – Пойнтинга

В модели Кельвина – Фойгта и Максвелла упругий и вязкий элемент связаны параллельно и последовательно соответственно. В первом случае после внезапно приложенной нагрузки деформация уменьшается не мгновенно, а в течение некоторого периода времени. Во втором случае после быстрого нагружения вязкий элемент не перемещается, в то время как упругий деформируется.

В модели Кельвина – Фойгта деформация элементов будет одинаковой, напряжение равно сумме напряжений в элементах, напряжение и деформация связаны между собой соотношением

$$\sigma(t) = E\varepsilon + \mu \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1)$$

где E — статический модуль упругости;

μ — коэффициент вязкости;

ε — относительная деформация, равная нулю в начальный момент времени.

Относительная деформация определяется в виде

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-\lambda t}), \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{E}{\mu}$ — интенсивность релаксации колебательного процесса.

В модели Максвелла система ведет себя как упругое тело, т. е. при свободном росте нагрузки к некоторой постоянной деформации упругого тела прибавляется неограниченно возрастающая деформация вязкого элемента, и система начинает вести себя как упругая жидкость. При постоянном росте нагрузки к постоянной деформации упругого тела добавится непрерывно возрастающая деформация вязкого тела, и общая деформация будет определяться в виде их суммы.

Зависимость между напряжением и деформацией можно представить в виде

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\mu}. \quad (3)$$

Отсюда уравнение Максвелла запишется в виде

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\varepsilon}{dt} E - \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) E. \quad (4)$$

Соответствующая зависимость релаксации напряжения при $\mu = 0$:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5)$$

где $\tau = \frac{\mu}{E}$ — время релаксации.

Вводя в модели Кельвина – Фойгта дополнительную жесткость, получается модель Томсона – Пойнтинга. Для нее реологические соотношения и уравнение поведения модели имеют вид

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1 + E_2}{\mu} \sigma = E \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 + E_2}{\mu} \varepsilon. \quad (6)$$

Применение таких моделей или их систем позволяет получить некоторую конечную деформацию от мгновенной и бесконечно длительной приложенной нагрузки, что в некоторой степени соответствует реальной деформации, имеющей место во время работы судового грузоподъемного оборудования. Выбор модели для динамических расчетов зависит от многих факторов в соответствии с конкретно поставленными задачами.

При моделировании механической части реального привода необходимо также обосновать выбор числа дискретных масс. Имитационное моделирование доказывает возможность уменьшения общего количества дискретных масс физических моделей для машин, отличающихся сложностью конструкции с большим количеством движимых масс, не снижая при этом существенно точность выполнения расчетов. При разработке такой физической модели привода необходимо считать детали, имеющие наибольший размер больше диаметра вала более чем в два раза, отдельными дискретными массами. Упругими звеньями при этом будут валы, соединительные муфты, зубчатые

колеса и т. д. Так, для исследуемого судового грузоподъемного оборудования расчетная физическая модель гидравлического привода представлена на рис. 5.

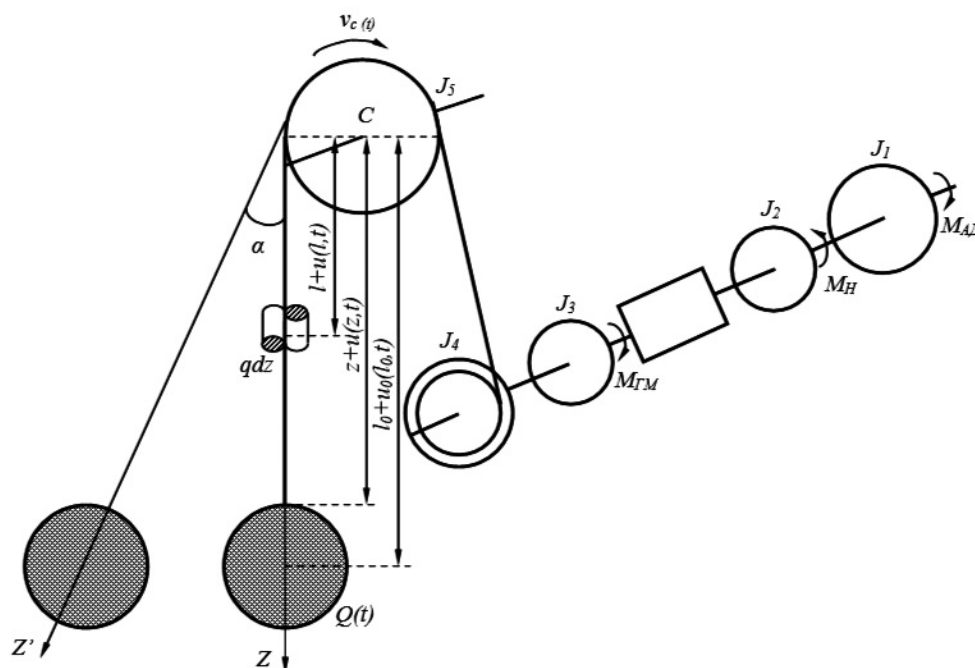


Рис. 5. Расчетная физическая модель
судового грузоподъемного оборудования:
1 — электродвигатель; 2 — насос; 3 — гидромотор;
4 — навивочный барабан; 5 — шкив грузовой ветви

Полученную систему для практических расчетов целесообразно упростить, принимая во внимание численные исследования, податливостью участков тяговых элементов между навивочным барабаном и шкивом грузовой ветви можно пренебречь, т. е. момент инерции барабана J_4 объединить с моментом J_5 . Данное допущение не приведет к сколько-нибудь заметным искажениям.

Приведение моментов инерции звеньев механизмов следует выполнять с помощью уравнения, которое связывает кинетические энергии этих звеньев и звенья приведения. Так, для механизмов, совершающих вращательное движение, в общем виде такие уравнения имеют вид

$$\sum_{i=1}^n \frac{J_i \omega_i^2}{2} = \frac{J_{пр} \omega_{пр}^2}{2}, \quad (7)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ — число звеньев приведения;

J — момент инерции;

ω — угловая скорость.

Для такой механической системы приведенная крутильная жесткость упругих звеньев механизма определяется из условия потенциальной энергии системы:

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_i \phi_i^2}{2} = \frac{c_{пр} \phi_{пр}^2}{2}, \quad (8)$$

где c — крутильная жесткость;

ϕ — угол поворота.

Результаты

Используя приведенные соотношения, электромеханический и гидравлический привод судового грузоподъемного устройства с передающим механизмом и одним двигателем приведены к четырехмассовой физической модели (рис. 6).

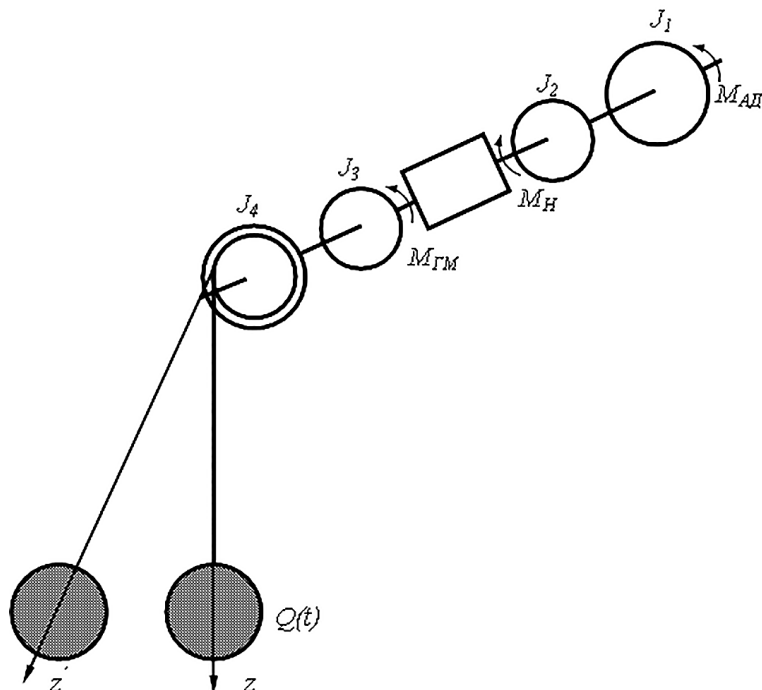


Рис. 6. Приведенная физическая модель судового грузоподъемного оборудования

Описанные принципы моделирования физических моделей использованы при построении простых расчетных моделей электромеханического и гидравлического привода палубного грузоподъемного устройства для сравнения их динамических свойств [15]–[17]. Так, математическая модель гидропривода имеет вид:

$$\begin{aligned}
 J_1 \ddot{\varphi}_1 + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + b_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) &= M_{AD}(t); \\
 J_2 \ddot{\varphi}_2 + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + b_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) &= -M_H(t); \\
 J_3 \ddot{\varphi}_3 + c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) + b_{34}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) &= M_{ГМ}(t); \\
 J_4 \ddot{\varphi}_4 - c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) + c_{45}(\varphi_4 - \varphi_5) - b_{34}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) + \mu(\dot{\varphi}_4 R_6 - \dot{\varphi}_5 r) + \\
 + (Q + ql_t) R_6 \left[1 - \frac{1}{g} (\ddot{l}_t + \dot{l}_t + l_t \ddot{U}) \right] &= -M_1(t) \\
 \frac{l_t}{g} \left(Q + \frac{ql_t}{3} \right) \ddot{U} + \left[\frac{l_t}{g} \left(Q + \frac{ql_t}{2} \right) + \mu \right] \dot{U} + EF\bar{U} &= \frac{l}{g} \left(Q + \frac{ql_t}{2} \right) (g + \ddot{l}_t); \\
 l_t &= l_{01} - \varphi_4 R_6; \\
 q_H n_H - \sigma P_1 - q_{ГМ} n_{ГМ} - K_1 V_1 \left(\frac{dP_1}{dt} \right) &= 0; \\
 M_{ГМ} &= q_{ГМ} P_1.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Электромагнитные явления в асинхронном двигателе с учетом насыщения магнитопровода описываются уравнениями

$$\frac{di_s}{dt} = A_s (u_s + \Omega_s \Psi_s - R_s i_s) + B_s (\Omega_r \Psi_r - R_r i_r); \tag{10}$$

$$\frac{di_r}{dt} = A_r (\Omega_r \Psi_r - R_r i_r) + B_s (u_s + \Omega_s \Psi_s - R_s i_s), \quad (11)$$

где i_s, i_r, u_s — матрицы тока и напряжения;

$A_r, B_r, A_s, B_s, \Omega_s, \Omega_r, \Psi_s, \Psi_r$ — матрицы связей, вращения, потокоцепления соответственно;

R_s, R_r — активные сопротивления статора и ротора соответственно.

Электромагнитный момент представлен зависимостью

$$M_E = \frac{3}{2} p_0 u \frac{1}{\tau} (i_{rx} i_{sy} - i_{ry} i_{sx}), \quad (12)$$

где p_0 — число пар магнитных полюсов;

u — передаточное отношение привода;

$i_{rx}, i_{ry}, i_{sx}, i_{sy}$ — проекции токов на координатные оси x, y .

Обсуждение (Discussion)

Для сравнения динамических характеристик гидравлического и электрического привода было выполнено численное моделирование в математическом пакете MathCad и построены графические зависимости действующих моментов (рис. 7), анализ которых показывает, что гидравлический привод обладает лучшей восстанавливаемостью к нормальной работе после переходного процесса.

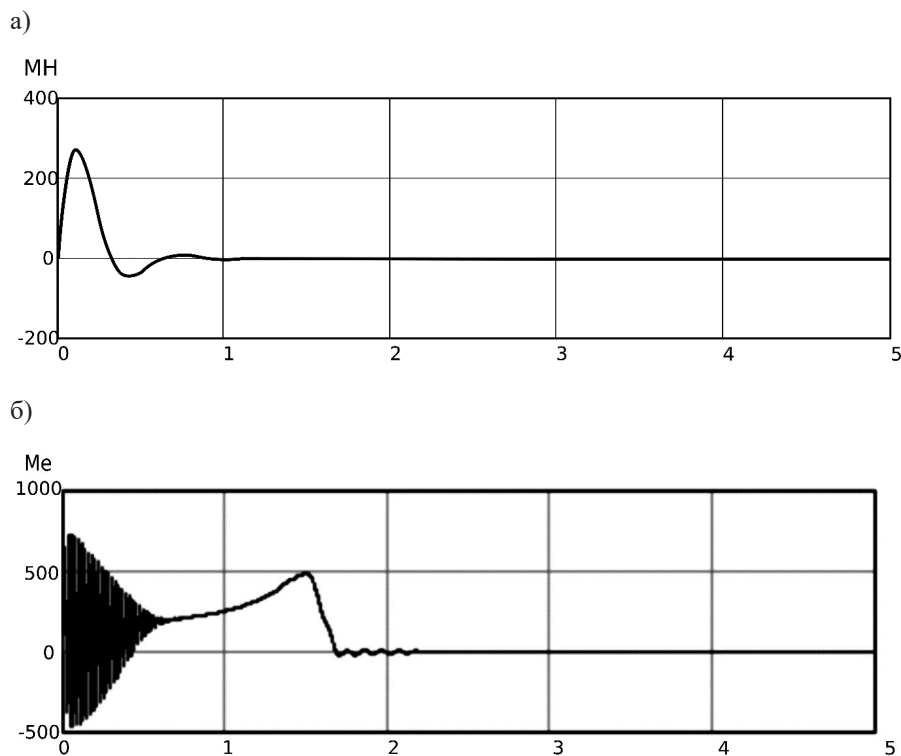


Рис. 7. Динамические характеристики: а — гидравлического грузоподъемного устройства; б — электропривода грузоподъемного устройства

Поэтому в системе привода грузоподъемного устройств рыбопромыслового судна целесообразнее использовать гидравлический привод, имеющий способность адаптироваться к переменности нагрузки.

Выводы (Summary)

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для повышения эксплуатационной надежности и эффективности работы системы привода тросового класса грузоподъемных устройств по динамическим показателям целесообразнее применение гидравлического привода.

2. При моделировании механической части привода грузоподъемного устройства, работающего в особых условиях, рекомендуется рассматривать трос как нить переменной длины.

3. Полученные системы дифференциальных уравнений позволяют исследовать продольные колебания, определять натяжение вязкоупругого каната при буксировке объекта и могут быть использованы при изучении, проектировании и эксплуатации подобного рода приводов грузоподъемных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко В. П. Механизация и автоматизация процессов промышленного рыболовства / В. П. Карпенко, С. С. Торбан. — М.: Агропромиздат, 1990. — 464 с.
2. Те А. М. Эксплуатация судовых вспомогательных механизмов, систем и устройств / А. М. Те. — Л., 2014. — 86 с.
3. Башуров Б. П. Функциональная надежность и контроль технического состояния судовых вспомогательных механизмов: учеб. пособие / Б. П. Башуров, А. Н. Скиба, В. С. Чебанов. — Новороссийск: МГА имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 2009. — 192 с.
4. Анисимов В. Н. Продольные резонансные колебания вязкоупругого каната грузоподъемной установки / В. Н. Анисимов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2016. — Т. 18. — № 4. — С. 128–133.
5. Горошко О. А. Введение в механику деформируемых одномерных тел переменной длины / О. А. Горошко, Г. Н. Савин. — Киев: Наукова думка, 1971. — 270 с.
6. Бабаков И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков. — М.: Наука, 1976. — 592 с.
7. Бурлакова Н. Н. Проектирование палубного оборудования рыбопромысловых судов с использованием виртуальных тренажеров / Н. Н. Бурлакова, Д. Б. Бурлаков, Ю. В. Еремин // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. — 2011. — № 1 (6). — С. 153–160.
8. Антипов В. В. Математическое обеспечение и аппаратная реализация задач управления комплексом «рыбопромысловое судно — орудия лова» / В. В. Антипов, В. Ю. Бобрович, В. К. Болховитинов, А. А. Болисов // Морской вестник. — 2011. — № 4 (40). — С. 45–49.
9. Нино В. П. Диагностика технических средств на рыбопромысловых судах в процессе их эксплуатации / В. П. Нино // Рыбное хозяйство. — 2014. — № 4. — С. 113–115.
10. Ханычев В. В. Информационно-аналитическое обеспечение процессов импортозамещения и локализации судового комплектующего оборудования / В. В. Ханычев, Д. О. Стоянов, Ш. Г. Петросян // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. — 2019. — № 2 (19). — С. 10–15.
11. Ханычев В. В. Российский рынок судового оборудования: конъюнктура, перспективы развития и нормативно-правовое регулирование отрасли / В. Ханычев, Д. Стоянов // Морское оборудование и технологии. — 2019. — № 3 (20). — С. 12–17.
12. Kim Y. H. The simulation of the geometry of a tuna purse seine under current and drift of purse seiner / Y. H. Kim, M. C. Park // Ocean engineering. — 2009. — Vol. 36. — Is. 14. — Pp. 1080–1088. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.06.011.
13. Bi C. W. Experimental investigation of the reduction in flow velocity downstream from a fishing net / C. W. Bi, Y. P. Zhao, G. H. Dong, T. J. Xu, F. K. Gui // Aquacultural engineering. — 2013. — Vol. 57. — Pp. 71–81. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2013.08.002.
14. Carral J. Fishing grounds' influence on trawler winch design / J. Carral, L. Carral, M. Lamas, M. J. Rodríguez // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 102. — Pp. 136–145. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.055.
15. Ivanovskaya A. V. Simulation of drive of mechanisms, working in specific conditions / A. V. Ivanovskaya, A. T. Rybak // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 1015. — Is. 3. — Pp. 032054. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032054.
16. Ivanovskaya A. Development of complex mathematical model of hydraulic drive, sensitive to the loading variations / A. Ivanovskaya, V. Popov, E. Bogatyreva, S. Bidenko // Vibroengineering Procedia. — 2019. — Vol. 25. — Pp. 171–176. DOI: 10.21595/vp.2019.20797.
17. Ivanovskaya A. Basic principles of mathematical modeling of operating modes of deck equipment for fishing vessels / A. Ivanovskaya, V. Zhukov // Transportation Research Procedia. — 2021. — Vol. 54. — Pp. 104–110. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.053.

REFERENCES

1. Karpenko, V. P., and S. S. Torban. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya protsessov promyshlennogo rybolovstva*. M.: Agropromizdat, 1990.
2. Te, A. M. *Ekspluatatsiya sudovykh vspomogatel'nykh mekhanizmov, sistem i ustroystv*. L., 2014.
3. Bashurov, B. P., A. N. Skiba, and V. S. Chebanov. *Funktsional'naya nadezhnost' i kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh vspomogatel'nykh mekhanizmov: uchebnoe posobie*. Novorossiisk: MGA imeni admirala F. F. Ushakova, 2009.
4. Anisimov, Valery. "Longitudinal resonant oscillations of viscoelastic rope of capacity plants." *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* 18.4 (2016): 128–133.
5. Goroshko, O. A., and G. N. Savin. *Vvedenie v mekhaniku deformiruemyykh odnomernykh tel peremennoi dliny*. Kiev: Naukova dumka, 1971.
6. Babakov, I. M. *Teoriya kolebanii*. M.: Nauka, 1976.
7. Burlakova, Natalya N., Dmitry B. Burlakov, and Yry V. Yeremin. "Design deck equipment of fishing vessels using the virtual simulation." *Vestnik Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 1(6) (2011): 153–160.
8. Antipov, V. V., V. Yu. Bobrovich, V. K. Bolkhovitinov, and A. A. Bolisov. "Matematicheskoe obespechenie i apparatnaya realizatsiya zadach upravleniya kompleksom «rybopromyslovoe sudno–orudiya lova»." *Morskoi vestnik* 4(40) (2011): 45–49.
9. Nino, V. P. "Diagnostics of fishery vessels' technical facilities during exploitation." *Rybnoe khozyaistvo* 4 (2014): 113–115.
10. Khanychev, V. V., D. O. Stoyanov, and Sh. G. Petrosyan. "Informatsionno-analiticheskoe obespechenie protsessov importozameshcheniya i lokalizatsii sudovogo komplektuyushchego oborudovaniya." *Problemy razvitiya korabel'nogo vooruzheniya i sudovogo radioelektronnogo oborudovaniya* 2(19) (2019): 10–15.
11. Khanychev, V., and D. Stoyanov. "Rossiiskii rynek sudovogo oborudovaniya: kon'yunktura, perspektivy razvitiya i normativno-pravovoe regulirovanie otrasli." *Morskoe oborudovanie i tekhnologii* 3(20) (2019): 12–17.
12. Kim, Yong-Hae, and Myeong-Chul Park. "The simulation of the geometry of a tuna purse seine under current and drift of purse seiner." *Ocean engineering* 36.14 (2009): 1080–1088. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.06.011.
13. Bi, Chun-Wei, Yun-Peng Zhao, Guo-Hai Dong, Tiao-Jian Xu, and Fu-Kun Gui. "Experimental investigation of the reduction in flow velocity downstream from a fishing net." *Aquacultural engineering* 57 (2013): 71–81. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2013.08.002.
14. Carral, Juan, Luis Carral, Miguel Lamas, and M Jesús Rodríguez. "Fishing grounds' influence on trawler winch design." *Ocean Engineering* 102 (2015): 136–145. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.055.
15. Ivanovskaya, A. V., and A. T. Rybak. "Simulation of drive of mechanisms, working in specific conditions." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1015. No. 3. IOP Publishing, 2018. 032054. DOI: 10.1088/1742–6596/1015/3/032054.
16. Ivanovskaya, Alexandra, Vladimir Popov, Elena Bogatyreva, and Sergey Bidenko. "Development of complex mathematical model of hydraulic drive, sensitive to the loading variations." *Vibroengineering PROCEDIA* 25 (2019): 171–176. DOI: 10.21595/vp.2019.20797.
17. Ivanovskaya, Aleksandra, and Vladimir Zhukov. "Mathematical Modeling of Operating Modes of Deck Equipment for Fishing Vessels." *Transportation Research Procedia* 54 (2021): 104–110. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.053.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ивановская Александра Витальевна — кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: invkerch@yandex.ru
Жуков Владимир Анатольевич — доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanovskaya, Aleksandra V. — PhD, associate professor
Kerch State Maritime Technological University
82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: invkerch@yandex.ru
Zhukov, Vladimir 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: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

Попов Владимир Владимирович —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: kamushburun@gmail.com

Popov, Vladimir V. —
Senior Lecturer
Kerch State Maritime
Technological University
82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: kamushburun@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 8 ноября 2021 г.
Received: November 8, 2021.*

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-887-907

APPLICATION OF FRACTIONAL-ORDER SECOND-ORDER CONTINUOUS SLIDING MODE CONTROLLER IN DIRECT FLUX AND TORQUE CONTROL SYSTEM OF DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR INTEGRATED TO WIND TURBINE: SIMULATION STUDIES

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 new nonlinear controller for direct flux and torque control (DFTC) of a doubly-fed induction generator (DFIG) based on a single-rotor wind turbine (SRWT) using the fractional-order second-order continuous sliding mode (FOSOCMS) controller is presented in this paper. Three different controllers are proposed to control the electromagnetic torque and rotor flux of the doubly-fed induction generator driven by a single-rotor wind turbine. The main goal of the proposed DFTC control structure is to improve the quality of the electromagnetic torque and stator current of the SRWT system by reducing electromagnetic torque undulations, stator current, and rotor flux undulations in the DFIG-SRWT systems. The mathematical model of the DFIG has been described. The descriptions of the modified space vector modulation (MSVM) strategy and the proposed FOSOCMS controller have been presented. The DFTC-MSVM control structure with proposed FOSOCMS controllers has been described. This proposed strategy has been shown to be robust and stable against parametric uncertainties and load electromagnetic torque. The validity, robustness, and effectiveness of the proposed DFTC-FOSOCMS technique are demonstrated through simulation studies in the MATLAB® software environment. Numerical simulation results demonstrate that the proposed DFTC control scheme with proposed FOSOCMS controllers has a faster transient response than traditional DFTC and DFTC with classical SOCSM controllers. Also, it reduces ripples in both electromagnetic torque of stator current, and rotor flux significantly compared to the classic technique and DFTC with traditional SOCSM controllers.

Keywords: single-rotor wind turbine, direct flux and torque control, doubly-fed induction generator, fractional-order second-order continuous sliding mode, modified space vector modulation.

For citation:

Almakki, Ali Nadhim Jbarah, and Andrey A. Mazalov. “Application of fractional-order second-order continuous sliding mode controller in direct flux and torque control system of doubly-fed induction generator integrated to wind turbine: simulation studies.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 887–907. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-887-907.

УДК 621.311.2

ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЛЕРА НЕПРЕРЫВНОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА ВТОРОГО ПОРЯДКА (SMC) В DFTC АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ДВОЙНЫМ ПИТАНИЕМ (DFIG), ИНТЕГРИРОВАННОГО В ВЕТРОТУРБИНУ: ИМИТАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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 представлен новый нелинейный контроллер для управления прямым потоком и крутящим моментом (DFTC) ветротурбины (SRWT) на базе асинхронного генератора с двойным питанием

(DFIG) с использованием контроллера непрерывного скользящего режима второго порядка (FOSOCMSM). Предложены к сравнению три различных контроллера для управления электромагнитным моментом и током ротора асинхронного генератора с двойным питанием, приводимого в действие ветроколесом. Основной целью предлагаемой структуры управления DFTC является улучшение качества электромагнитного момента и тока статора системы SRWT за счет уменьшения пульсаций электромагнитного момента, тока статора и пульсаций потока ротора в системах DFIG–SRWT. Описана математическая модель DFIG. Представлены описания модифицированной стратегии пространственной векторной модуляции (MSVM) и предлагаемого контроллера FOSOCMSM. Описана структура управления DFTC–MSVM с предлагаемыми контроллерами FOSOCMSM. Показано, что предлагаемая стратегия является надежной и стабильной в отношении параметрических неопределенностей и электромагнитного момента нагрузки. Обоснованность, надежность и эффективность данной методики DFTC–FOSOCMSM продемонстрированы в ходе имитационных исследований в программной среде MATLAB®. Результаты численного моделирования показывают, что предложенная схема управления DFTC с контроллерами FOSOCMSM имеет более быструю переходную характеристику, чем традиционные DFTC и DFTC с классическими контроллерами SOCSM, что значительно уменьшает пульсации как в электромагнитном моменте тока статора, так и в потоке ротора по сравнению с классической техникой и с DFTC с традиционными контроллерами SOCSM.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, прямое управление потоком, крутящий момент, асинхронный генератор с двойным питанием, непрерывный скользящий режим второго порядка, модифицированная пространственная векторная модуляция.

Для цитирования:

Алмакки А. Н. Д. Применение контроллера непрерывного скользящего режима второго порядка (SMC) в DFTC асинхронного генератора с двойным питанием (DFIG), интегрированного в ветротурбину: имитационные исследования / А. Н. Д. Алмакки, А. А. Мазалов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 887–907. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-887-907.

Introduction

In recent years, there has been a great deal of demand for the use of renewable energies in generating electric power, especially wind energy, due to its advantages compared to other renewable sources. Among the advantages of wind energy, we mention that it is infinite energy, inexpensive, and can be used easily in contrast to petroleum energy, and the low cost of production of electrical energy from some sources. In [1], the completed wind energy capacity at the end of 2021 reached 800 GW, this large value reflects the increasing demand for this source. This value is constantly increasing over the years. To generate electric power using wind energy we need electric generators, the latter are multiple and many, for example, we mention doubly-fed induction generators (DFIG), synchronous generator (SG), Squirrel cage asynchronous generator (SCAG), coiled rotor asynchronous generator (CRAG). These generators can be used in the case of variable and constant wind speeds. Among the generators used in variable speed wind turbines, we find DFIG the most used compared to other types [2–4]. However, the DFIG gives more efficiency in the case of variable wind speed compared to a synchronous generator. Therefore, different control algorithms have been proposed for DFIGs. Among the most famous and most widely used methods in the field of generator control, we find direct flux and torque control (DFTC) [5], field-oriented control (FOC) [6], fuzzy control [7], sliding mode control (SMC) [8], super twisting algorithm [9], direct active and reactive power control (DARPC) [10], second-order sliding mode control (SOSMC) [11], neural control [12], backstepping control [13] and hybrid control [14–19]. Among these algorithms, the classical DFTC technique offers many advantages include: simplicity in calculations, fast dynamic response, robustness algorithm, easy to implementation and robustness against machine parameter mismatches [20–22]. The DFTC technique presented in [23], imposes some drawbacks such as electromagnetic torque ripple, variable switching frequencies, flux ripple, and harmonic distortion of current. Although several techniques have been designed with fixed switching frequency [24, 25], these techniques require high sampling frequency to show good transient performance and steady-state. In order to take high frequencies, high-speed sensors must be used and they must also be strong against external noise, and this is what makes the cost very high. In [26], the DFTC technique is presented

based on the traditional space vector modulation (SVM) strategy, and a neural proportional-integral (NPI) controller is used to minimize rotor flux and electromagnetic torque undulations. This designed strategy is a simple algorithm, robust control and easy to implement compared to vector control. The NPI controller used in this DFTC strategy makes it necessary for minimizing the harmonic distortion of current and response time. The numerical simulation results show the characteristics of the designed technique. In [27], the authors proposed the use of a twelve sectors DFTC method with a fuzzy controller applied to the DFIG. In this proposed technique, the switching table was replaced by fuzzy logic control. The proposed technique is more robust than traditional DFTC control. However, the harmonic distortion of current is reduced by fuzzy DFTC. In [28], the DFTC technique based on a neural switching table has been proposed. The simulation results show the superiority of the designed method. In [29], a modified DFTC method was proposed based on STA controllers with a constant switching frequency. STA and neural algorithms were combined to improve the performances of the DFTC method [30]. In [31], the electromagnetic torque and rotor flux undulations were reduced when using the DFTC method with fuzzy STA controllers. This proposed technique is more robust than the traditional technique. In addition, the harmonic distortion of current was reduced by DFTC with fuzzy STA controllers. In [32], the second-order continuous sliding mode-based DFTC technique (SOCSM-DFTC) is used to regulate and control the rotor flux and electromagnetic torque of the DFIG-based wind turbines. In addition, this control reduces more the rotor flux and electromagnetic torque undulations compared to the traditional DFTC control scheme. Moreover, it does not take into account the mathematical form of the system and its analytical information. In this method, two SOCSM controllers are used to control the torque and flow together. On the other hand, due to the non-linearity and ease of controlled tuning, it is very easy to improve the performance and efficiency of the DFIG according to this reference.

In this work, a new DFTC method for DFIG in wind power conversion systems is proposed. The designed technique is a fractional-order SOCSM-based DFTC control scheme (FOSOCSM-DFTC). The objective of improving the performance of the SOCSM controller by fractional calculus is to reduce the electromagnetic torque and rotor flux error of the rotor DFIG in the event of changing machine parameters (R_s , R_r , L_s , and L_r). The stability of the fractional-order SOCSM controller is proven using the Lyapunov stability technique. On the other hand, the proposed fractional-order SOCSM controller is robust, easy to implement, simple algorithm, and easy to adjust.

The main contributions of this paper are as follows:

- a new robust control theory is proposed for the DFIG-based single-rotor wind turbine system.
- the proposed DFTC control scheme with fractional-order SOCSM controller (FOSOCSM) is robust compared to the classical DFTC control technique with PI and SOCSM controllers.
- the DFTC control scheme with fractional-order SOCSM controllers improved the dynamic performances of the DFIG-based single-rotor wind turbine system.
- the proposed control scheme reduced electromagnetic torque and rotor flux ripples.
- the proposed method is simple and easy to implement compared to field-oriented control.

This research work is presented in the following section; in section 2, the DFIG mathematical model is presented. The modified SVM technique is presented in section 3. The proposed fractional-order SOCSM controller is detailed in section 4. Section 5 describes the DFTC control scheme of DFIG based on a modified SVM technique and two PI controllers. The designed DFTC control structure is evaluated and the simulated results are analyzed in Section 6. Finally, concluding remarks are given in the last section.

Methods and Materials

DFIG model. In order to give the mathematical model of an electric machine, the Park transform is the most commonly used. The Park transformation is an uncomplicated mathematical method used to give a mathematical concept to electric machines. The rotor and stator voltage are given, respectively, as follows [33], [34]:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - \omega_r \Psi_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr}; \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \omega_r \Psi_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr}; \\ V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds}; \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs}, \end{cases} \quad (1)$$

where ω_r and ω_s — are respectively the rotor and stator electrical pulsations, while ω is the mechanical one.

The rotor and stator pulsations and rotor speed are interconnected by the following equation:
 $\omega_s = \omega_r + \omega$.

Equation (2) represents the stator and rotor flux of the three-phase DFIG.

$$\begin{cases} \Psi_{dr} = M I_{ds} + L_r I_{dr}; \\ \Psi_{qr} = M I_{qs} + L_r I_{qr}; \\ \Psi_{ds} = M I_{dr} + L_s I_{ds}; \\ \Psi_{qs} = M I_{qr} + L_s I_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

$(V_{dr}, V_{qr}, V_{ds}, V_{qs})$, $(\Psi_{dr}, \Psi_{qr}, \Psi_{ds}, \Psi_{qs})$, $(I_{dr}, I_{qr}, I_{ds}, I_{qs})$, 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 electric machine contains two parts, the electrical part and the mechanical part, the electrical part is represented in the equations of voltages, and flux, and the mechanical part is represented by the following equation:

$$T_e = T_r + J \frac{d\Omega}{dt} + F_r \Omega. \quad (3)$$

The torque of the machine is related to the flux and current, and its expression is given by the following equation:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{M}{L_s} n_p (-\Psi_{ds} I_{qr} + \Psi_{qs} I_{dr}). \quad (4)$$

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 stator active and reactive powers of the stator side are defined as:

$$\begin{cases} Q_s = 1,5(-V_{ds} I_{qs} + V_{qs} I_{ds}); \\ P_s = 1,5(V_{qs} I_{qs} + V_{ds} I_{ds}). \end{cases} \quad (5)$$

In order to develop a decoupled control of the stator's active and reactive powers, we use a Park reference frame linked to the stator flux. By supposing that the d -axis oriented along with the stator flux position and based on equation (6) with neglecting R_s we can write [30]:

$$\Psi_{qs} = 0 \quad \text{and} \quad \Psi_s = \Psi_{ds}; \quad (6)$$

$$\begin{cases} V_{ds} = \Psi_s \omega_s; \\ V_{qs} = 0; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} I_{qs} = -I_{qr} \frac{M}{L_s}; \\ I_{ds} = \frac{\Psi_s}{L_s} - I_{dr} \frac{M}{L_s} \end{cases} \quad (8)$$

Equation (8) can be written as:

$$\begin{cases} Q_s = -\frac{3}{2} \left(-\frac{\omega_s \Psi_s^2}{L_s} + \frac{\omega_s \Psi_s M}{L_s} I_{dr} \right); \\ P_s = (-1.5) I_{qr} \frac{\omega_s \Psi_s M}{L_s}. \end{cases} \quad (9)$$

Thus, the torque equation can be written as follows:

$$T_e = -1.5 \frac{M}{L_s} n_p I_{qr} \Psi_{ds}. \quad (10)$$

Modified SVM technique. Currently, most AC machine control uses the traditional SVM technique. This is due to many advantages such as reduce the harmonic distortion of current, and robust modulation technique compared to traditional pulse width modulation (PWM). The SVM technique is an algorithm for the control of PWM. This technique is used to obtain alternating current and to control the speed of AC motors. But this technique is difficult to implement compared to the traditional PWM technique, especially with the multi-level inverters. In [35], an experimental result of the SVM technique with a neural algorithm has been presented. The obtained results showed the effectiveness of the proposed method. In [36], a simplified SVM technique was proposed to control the three-phase five-level cascaded H-bridge inverter. The proposed method used in [36] significantly minimizes calculation time and efforts without reducing the fundamental output voltage of the inverter. In [37, 38], a new SVM algorithm is proposed to control the traditional inverter. This new technique is based on the calculated maximum and minimum of three-phase voltages. This technique was used to control the five-phase inverter [39, 40]. A schematic diagram of this modified SVM technique of a two-level inverter is shown in Figure 1. Through Figure 1, we find that this method is very simple, easy, and it can be easily applied to multilevel inverters compared to the traditional SVM technique.

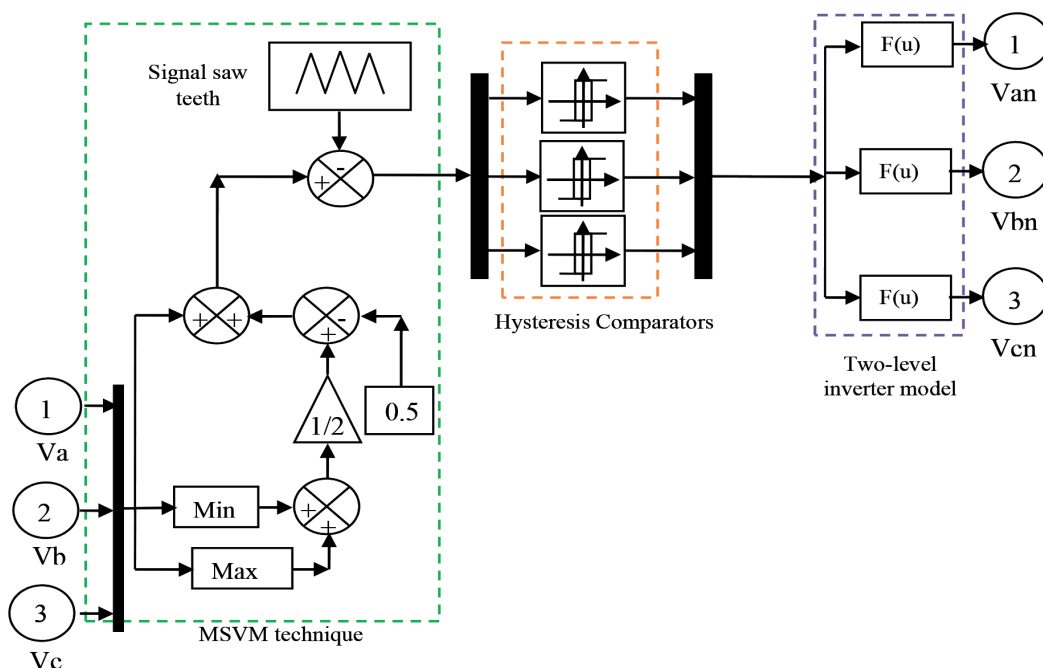


Figure 1. Block diagram of the modified SVM technique [41]

DFTC control with modified SVM technique. The classical DFTC methods have tremendous applications in AC machines superior effectiveness drives. The classical DFTC method have significant advantages over traditional field-oriented control. These advantages include minimized harmonic content in output voltage, fast response dynamic, a simple algorithm, robust method, easy to apply, low cost, and so on [32]. These multiple features and characteristics made this method the most widely used in the field of controlling electrical machines, and in particular in the field of electric power generation. This method depends on directly controlling the electromagnetic torque of the machine without using the inner rings and PWM technique. This method uses a switching table and two hysteresis controllers to control the electromagnetic torque and flux. In [41, 42], seven-level DFTC control was proposed to control the permanent magnet synchronous motor (PMSM) and the induction motor (IM), respectively. In [43], DFTC control with synergetic control was proposed to regulate the torque of the double star induction motor (DSIM). The simulation results show the superiority of the proposed technique. In [44], four-level DFTC control was proposed to control the IM drives. A Five-level DFTC method was proposed in [45], this proposed technique was used to control the IM. In [46], 24-sectors DFTC control was proposed to control the IM drives. In [47], four-level DFTC control was proposed to control the PMSM drives. In [48], a modified DFTC technique was proposed based on traditional SVM, where four PI controllers were used to control the torque and flux of DSIM drives.

In this section, we use the DFTC control scheme with modified SVM (MSVM) and PI controllers to regulate the electromagnetic torque and rotor flux of DFIG-based wind turbines. This designed DFTC control is shown in Figure 2. Through Figure 2, we find that this DFTC technique is a very simple, robust method, easy, and it can be easily applied to other machines compared to field-oriented control (FOC).

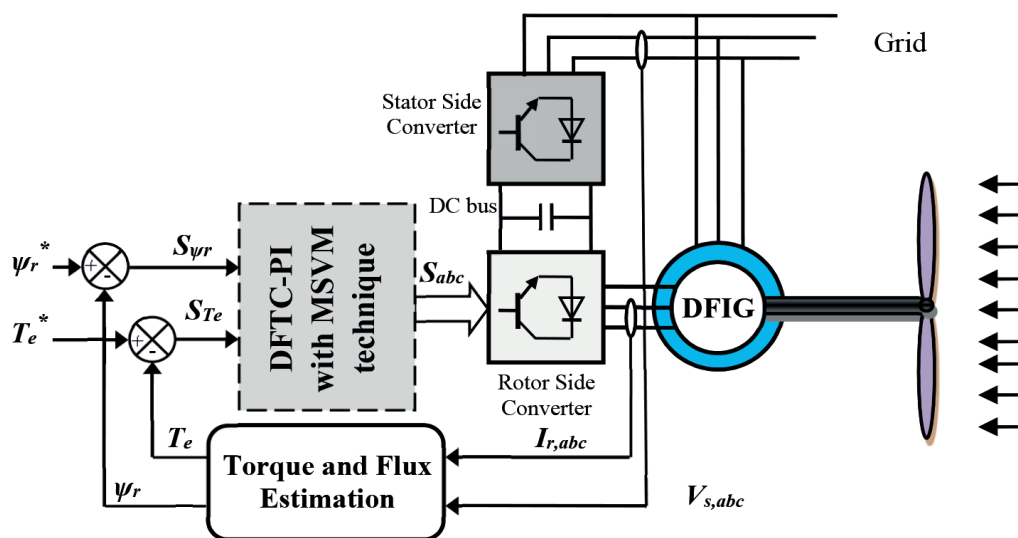


Figure 2. Block diagram of the DFIG with DFTC–MSVM

This method needs to estimation the rotor flux and electromagnetic torque of DFIG. To estimate the rotor flux and electromagnetic torque, we need to measure both voltage and stator current. On the other hand, the estimate of the stator flux is based on the parameter of the stator resistance.

The phase and amplitude of the stator flux are estimated by the relation equations (11) to (12):

$$\begin{cases} \Psi_{s\beta} = \int_0^t (-R_s \cdot I_{s\beta} + V_{s\beta}) dt; \\ \Psi_{s\alpha} = \int_0^t (-R_s \cdot I_{s\alpha} + V_{s\alpha}) dt. \end{cases} \quad (11)$$

Equation (12) represents the magnitude of stator flux:

$$\Psi_s = \sqrt{\Psi_{s\alpha}^2 + \Psi_{s\beta}^2}; \quad (12)$$

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{\Psi_{s\beta}}{\Psi_{s\alpha}}\right), \quad (13)$$

where θ_s — is the phase of stator flux.

The estimation of the electromagnetic torque is based on the rotor current and stator flux. Equation (14) represents how to estimation the electromagnetic torque from rotor current and stator flux.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{M}{L_s} n_p (-\Psi_{ds} I_{qr} + \Psi_{qs} I_{dr}). \quad (14)$$

Despite the advantages of this designed DFTC method in this section, it has several disadvantages similar to the classical method. This method does not eliminate the electromagnetic torque and rotor flux undulations of the DFIG (see [32]). Also, the THD level remains somewhat high.

In order to reduce electromagnetic torque and rotor flux undulations, we propose in the next part a new nonlinear method. This new method relies on the combination of two different methods in principle, to obtain a more robust nonlinear method. And thus reduce electromagnetic torque and rotor flux undulations of DFIG-based wind turbines.

Fractional order second-order continuous sliding mode. In this section, a new nonlinear control was proposed. This the proposed method is named fractional-order second-order continuous sliding mode (FOSOCSM) control. This proposed method is based on fractional calculus and the SOCSM approach. It can be said that the new nonlinear method, is only an improvement in the performance and effectiveness of the SOCSM controller. We used the fractional calculus feature to improve and develop the performance of the SOCSM controller. The proposed FOSOCSM controller is a very simple structure, more robust, easy to adjust, and easy to implement. On the other hand, the FOSOCSM controller reducing more the chattering phenomenon compared to the traditional SOCSM controller. This new nonlinear method offers better and better performance than the classic SOCSM method, and this is what we will explain in the rest of the article. Equation (15) represents the proposed FOSOCSM controller. By K_1 and K_2 the stability of the FOSOCSM controller can be controlled. On the other hand, λ represents fractional calculus. It can take positive or negative values, depending on the system used.

$$w = (-K_1 |S|^{q_1} \text{sign}(S) - k_2 \cdot \text{sign}|S|^{1/2} + \int \alpha \cdot \text{sign}(S) dt)^\lambda. \quad (15)$$

Where K_1 and K_2 — is the constant gains.

DFTC with FOSOCSM controllers. The FOSOCSM-DFTC control structure used in this work significantly minimizes the electromagnetic torque and rotor flux undulations of DFIG-based wind turbines. This proposed control method is a modification of the proposed method in [32] to reduce electromagnetic torque and rotor flux ripples. The proposed DFTC control technique is verified through MATLAB software. Results are compared with traditional SOCSM and PI controllers to prove the feasibility of the proposed FOSOCSM controllers. The proposed FOSOCSM-DFTC method, which is designed to control rotor flux and electromagnetic torque of the DFIG-based wind turbines is shown in Figure 3. Through Figure 3, we notice that this method is simple and uncomplicated and has almost kept the same shape as the proposed method in [32], and the difference lies in the use of the proposed FOSOCSM controller and modified SVM technique in this paper. On the other hand, in this proposed method we used the same block to estimate the electromagnetic torque and rotor flux used in the case of the traditional DFTC method with PI controllers.

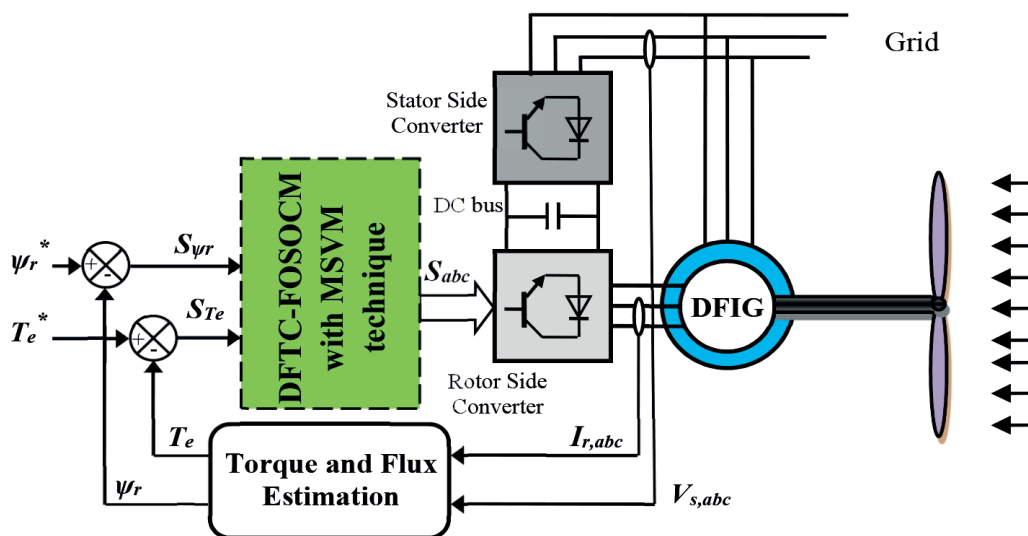


Figure 3. Block diagram of the DFIG with DFTC-FOSOCMSM

Electromagnetic torque and rotor flux FOSOCMSM controllers are used to influence respectively on the two rotor voltage components as in (16) and (17).

$$V_{dr}^* = (-l_1 |S_{\psi_r}|^{\alpha_1} \text{sign}(S_{\psi_r}) - k_1 \cdot \text{sign}|S_{\psi_r}|^{1/2} + \int \alpha \cdot \text{sign}(S_{\psi_r}) dt)^{\lambda}; \quad (16)$$

$$V_{qr}^* = (-l_2 |S_{T_e}|^{\alpha_2} \text{sign}(S_{T_e}) - k_2 \cdot \text{sign}|S_{T_e}|^{1/2} + \int \alpha \cdot \text{sign}(S_{T_e}) dt)^{\lambda}, \quad (17)$$

where the electromagnetic torque error $S_{T_e} = T_e^* - T_e$ and the rotor flux magnitude error $S_{\psi_r} = \psi_r^* - \psi_r$ are the sliding variables, and the constant gains k_1 and k_2 must check the stability conditions, λ is the fractional order ($0 < \lambda < 1$).

Results and Discussion

In this section, numerical simulations are carried out with a 1,5 MW DFIG attached to a 398 V/50 Hz grid, by using the environment of MATLAB software. The proposed control techniques are simulated and compared regarding stator current harmonics distortion, rotor flux ripple, reference tracking, electromagnetic torque ripples, and robustness against DFIG parameter variations.

The DFIG used in our work has the following parameters: $P_n = 1,5$ MW, $p = 2$, $R_s = 0,012 \Omega$, 50 Hz, 380/696 V, $R_r = 0,021 \Omega$, $L_s = 0,0137$ H, $J = 1000$ kg·m², $f_r = 0,0024$ Nm/s, $L_r = 0,0136$ H and $L_m = 0,0135$ H [32], [33].

First test. This test represents the reference tracking test. This test aims to study the behavior of the proposed methods of control by taking the generated speed as constant and equal to the nominal value. As well as knowing which method provides the best results and reduces electromagnetic torque and rotor flux ripples together. The results obtained are shown in Figures 4–6. Figure 4a represents the stator current signal of the machine. From this figure, the shape of the stator current is sinusoidal, and on the other hand, its value is related to the reference value of the electromagnetic torque and the system itself. Figure 4, b and 4, c represents the rotor flux and electromagnetic torque of the designed DFTC methods, respectively. We note through these figures that the electromagnetic torque and rotor flux tracks almost perfectly their references values for all the proposed methods. By looking at Figures 5, a, 5, b and 5, c, we notice that the DFTC-FOSOSMC method reduces more ripples in stator current, electromagnetic torque, and rotor flux compared with DFTC-SOSMC and DFTC-PI methods. On the other hand, Figures 6, a, 6, b and 6, c show the THD value of stator current (I_{as}) for both DFTC techniques. It can be observed that the THD value is minimized for DFTC-FOSOCMSM (0,14 %) when compared to DFTC-PI (0,73 %) and DFTC-SOCMSM (0,23 %).

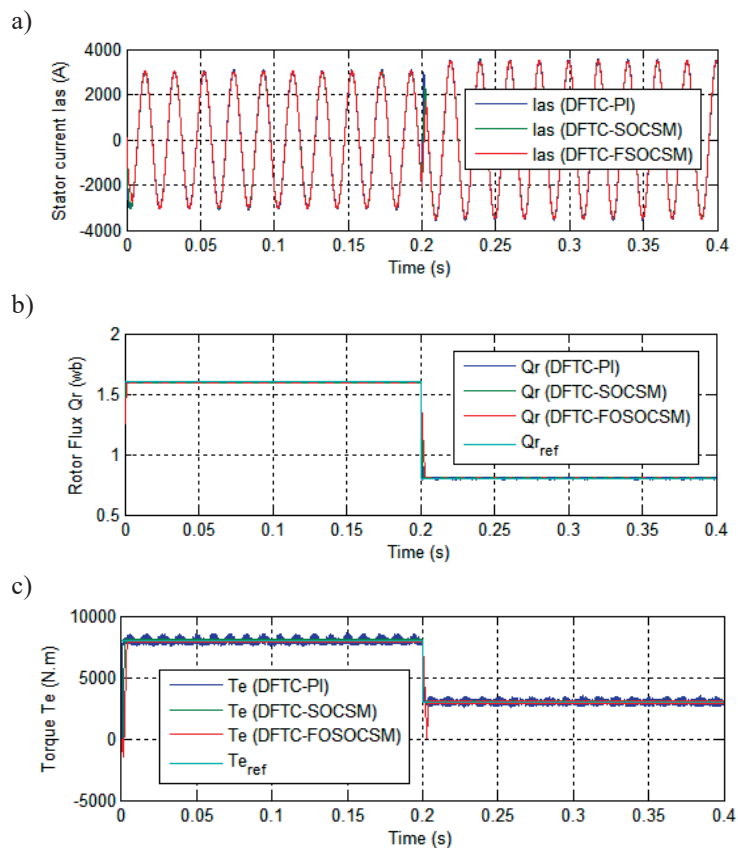


Figure 4. The results obtained:

a — Current I_{as} ; *b* — Rotor flux; *c* — Electromagnetic torque T_e

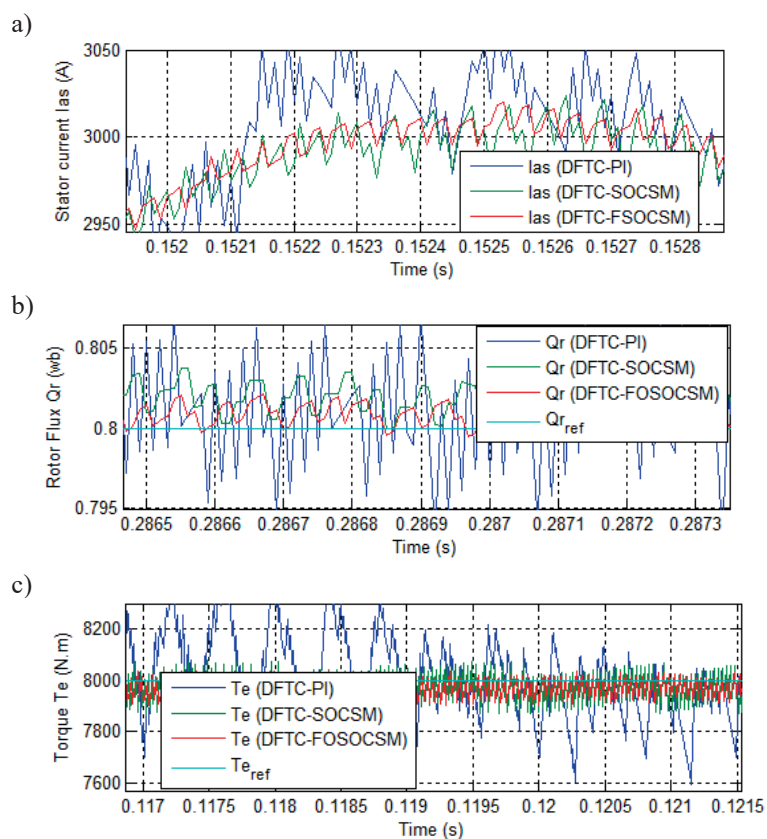
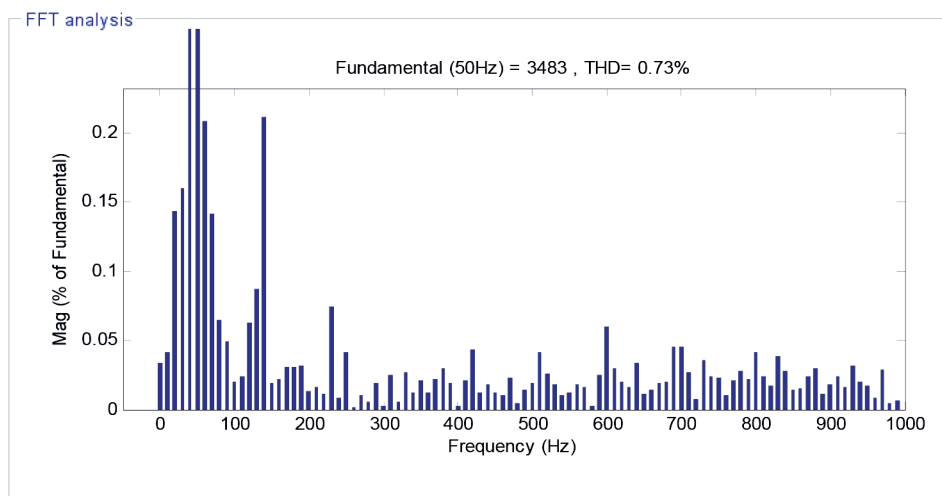


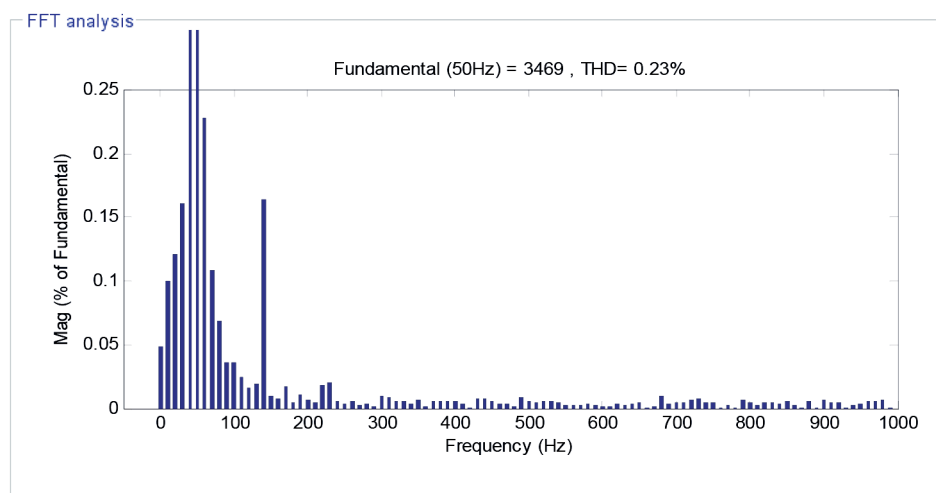
Figure 5. The results obtained: *a* — Zoom (Current I_{as});

b — Zoom (Rotor flux); *c* — Zoom (Electromagnetic torque T_e)

a)



b)



c)

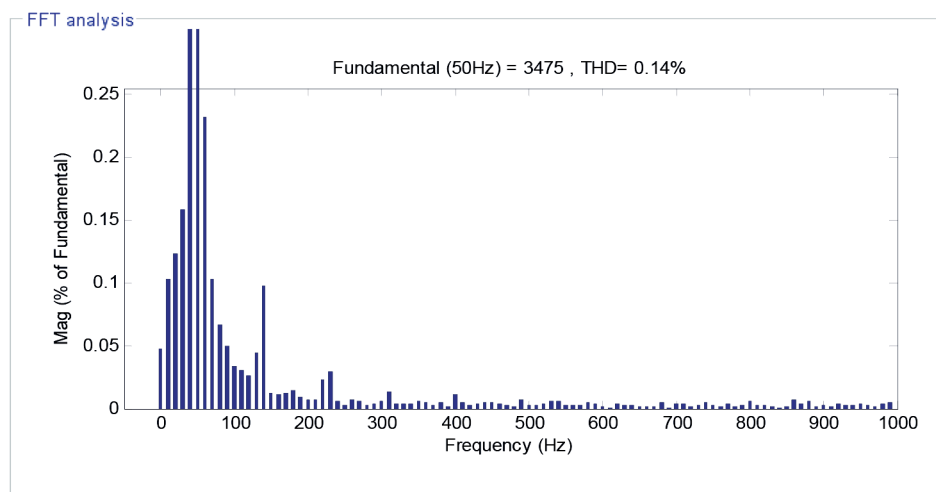


Figure 6. (THD) values obtained: a — THD (DFTC-PI);
b — THD (DFTC-SOCSM); c — THD (DFTC-FOSOCMSM)

Second test. The principal objective of this test is to examine the influence of a machine parameters variation on the rotor flux, stator current, and electromagnetic torque and behavior for designed DFTC techniques. The simulation results are shown in Figures 7 to 9. These figures show that the electromagnetic torque and rotor flux follow the references with high accuracy for all the proposed methods (see Figure 7, *b* and 7, *c*). However, the stator current remains sinusoidal (see Figure 7, *a*) and is related to the system and the reference value of the electromagnetic torque and rotor flux. On the other hand, we notice by looking at Figures 8a, 8b and 8c that the DFTC-FOSOCMS method significantly reduced the ripples of stator current, electromagnetic torque, and rotor flux compared to both DFTC-PI and DFTC-SOCMS methods.

Figures 9, *a–c* show the THD value of stator current (I_{as}) for three proposed DFTC methods. It can be observed that the THD value is reduced for DFTC-FOSOCMS (0.18 %) when compared to DFTC-PI (0,85 %) and DFTC-SOCMS (0,27 %). This result is attractive for wind turbine applications to guarantee the quality and stability of the generated power when the machine parameters are changing. Thus, it can be said that the proposed FOSOCMS controller provided better performance than both PI and SOCMS, and this is what we observed through two tests, as well as the THD ratio and the value of electromagnetic torque and rotor flux ripples.

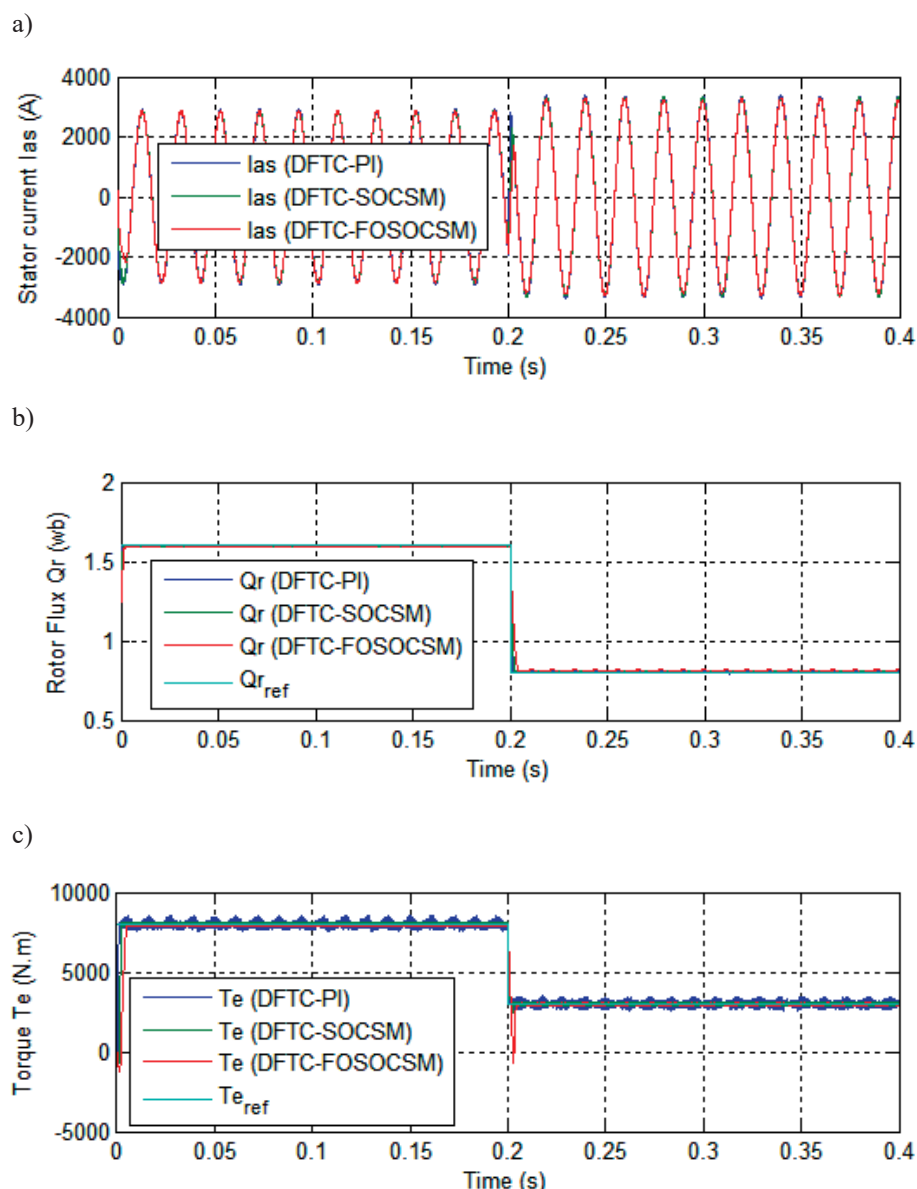
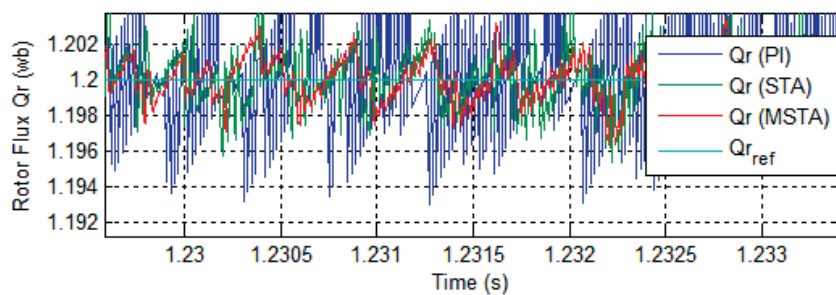


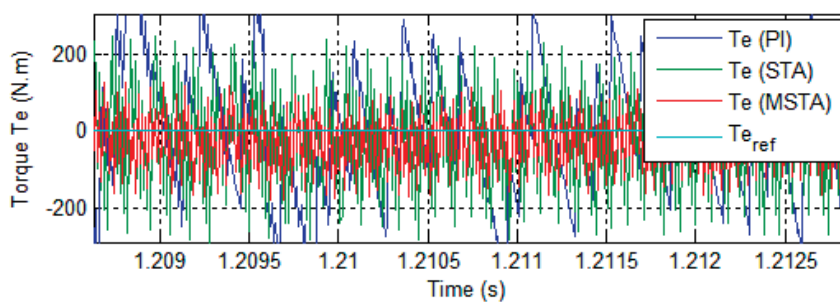
Figure 7. The results obtained:

a — Current I_{as} ; *b* — Rotor flux; *c* — Electromagnetic torque T_e

a)



b)



c)

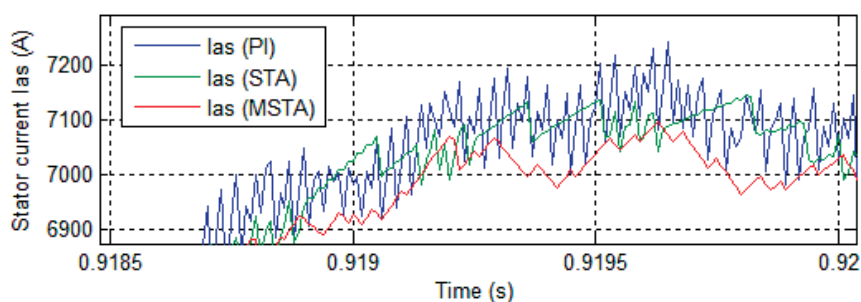
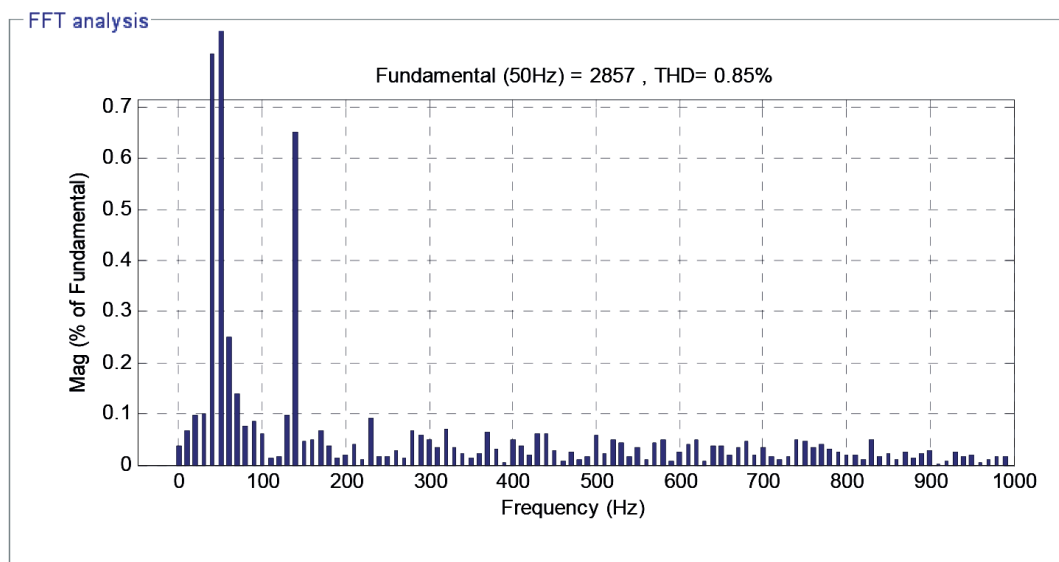
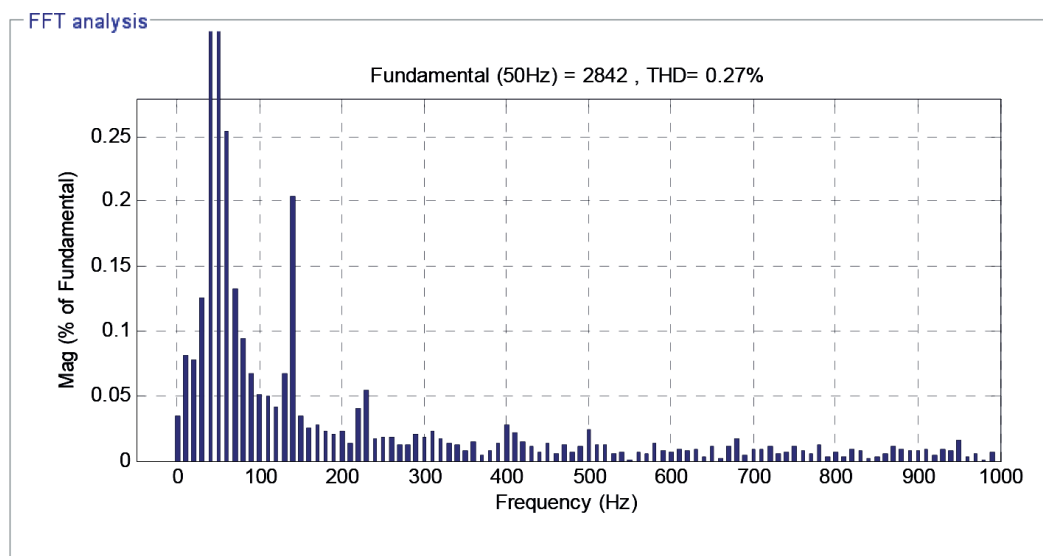


Figure 8. The results obtained: a — Zoom (Current I_{as});
b — Zoom (Rotor flux); c — Zoom (Electromagnetic torque T_e)

a)



b)



c)

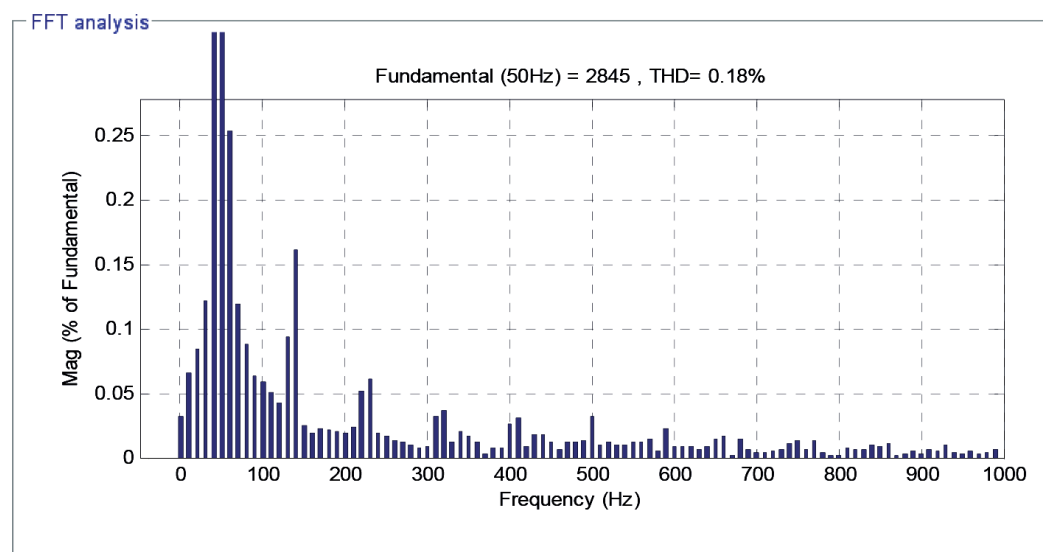


Figure 9. (THD) values obtained:
a — THD (DFTC-PI); b — THD (DFTC-SOCMSM); c — THD (DFTC-FOSOCMSM)

A comparative study between the methods proposed in this work is necessary and imperative to identify the strengths and weaknesses of each method. Table 1 represents a comparative study between the various proposed methods. It is clear that the proposed DFTC-FOSOCMSM technique is more robust than the DFTC-PI and DFTC-SOCMSM methods. The proposed method provided better results in both dynamic responses, THD, rise time, overshoot, settling time compared to DFTC-PI and DFTC-SOCMSM methods. On the other hand, the proposed method gave a very good quality of the output current of the generator, as well as less flux and torque fluctuations.

Finally, a comparative study of the obtained value of THD of the stator current with some publications. This is in order to know the efficacy of the proposed method with other works and methods that exist on the ground. Table 2 represents the comparison between the proposed method and some published works. Through this table, we find that the DFTC-FOSOCMSM method gives a much better value than several

methods implemented in various scientific works, and this is because of the use of the proposed FOSOCSCM controller. Accordingly, it can be concluded that the DFTC method with the proposed FOSOCSCM controller is very robust compared to some controls.

Table 1

Compare the results obtained from the designed methods with the DFTC-PI

Criteria	Techniques		
	DFTC-PI	DFTC-SOCSMC	DFTC-FOSOCSCM
Dynamic response (s)	Medium	Fast	Fast
THD (%)	0,73	0,23	0,14
Reduce torque and flux ripples	Acceptable	Good	Excellent
Simplicity of calculations	Simple	Complicated	Complicated
Settling time (ms)	High	Medium	Medium
Overshoot (%)	Remarkable $\approx 22\%$	Remarkable $\approx 10\%$	Neglected near $\approx 1,5\%$
Torque and flux tracking	Good	Very good	Excellent
Simplicity of converter and filter design	Simple	Simple	Simple
Sensitivity to parameter change	High	Medium	Medium
Rise Time (s)	High	Medium	Medium
Torque: ripple (N.m)	Around 700	Around 260	Around 130
Improvement of transient performance	Good	Very good	Excellent
Quality of stator current	Acceptable	Very good	Excellent
Rotor flux: ripple (wb)	Around 0,015	Around 0,005	Around 0,001

Table 2

Compare THD current with other control strategies

Techniques		THD, %
Ref. [32]	Classical DTC	2,57
	SOCSM-DTC	0,98
Ref. [49]		1,14
Ref. [50]	FOC	3,7
Ref. [51]	DPC	2,56
Ref. [17]		1,15
Proposed methods	DFTC-PI	0,73
	DFTC-SOCSM	0,23
	DFTC-FOSOCSCM	0,14

Conclusion

This work presents a new DFTC technique for DFIG based on fractional-order second-order continuous sliding mode controllers. The proposed DFTC technique is robust and a modified SVM strategy is used. The rotor/stator current is nearly sinusoidal and there is a significant minimization in rotor flux and electromagnetic torque undulations. The same DFTC technique is explored to control DFIG under unbalanced grid voltage conditions. A direct and quadrature rotor voltage based on fractional-order second-order continuous sliding mode controllers is proposed. Without using the rotating reference frame and sequential decomposition, the

proposed DFTC method with fractional-order second-order continuous sliding mode controllers minimizes the undulations in the rotor flux and electromagnetic torque. The proposed DFTC-FOSOCMS strategy has improved the robustness of the DFTC technique, increasing its characteristics in transient and dynamic conditions in terms of efficiency, overshoot, rapidity, rise time, and stability. Simulation results show the performances of the designed nonlinear controller.

Indeed, this designed DFTC strategy deserves attention because they solve the drawbacks of high undulations of the electromagnetic torque and flux for wind power systems. On the other hand, this research work in this paper is limited given that the wind speed is constant. In order to further enhance the robustness of the DFIG-SRWP system under previous concerns in future papers this is through interactions between DFIGs with different strategies, such as neural algorithm, fractional-order PI, genetic algorithm, neuro-fuzzy control, and type 2 fuzzy logic control.

So, summarizing, the main findings of this research are as follows:

- a simple nonlinear controller was designed.
- minimizes the electromagnetic torque and rotor flux ripples.
- minimization of the THD of stator current by 80,82 %, 39,13 % of both DFTC-PI and DFTC-SOCMS, respectively.
- a new DFTC technique was presented and confirmed with numerical simulation.

The work can be extended with neuro-FOSOCMS controller (NFOSOCMS) or terminal FOSOCMS to obtain more minimum electromagnetic torque ripple, zero settling time, and zero steady-state error. Direct vector control-based FOSOCMS methods can also be taken up as an extension of this work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heydari E. Fuzzy-Genetic Algorithm-Based Direct Power Control Strategy for DFIG / E. Heydari, M. Rafiee, M. Pichan // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. — 2018. — Vol. 14. — Is. 4. — Pp. 353–361. DOI: 10.22068/IJEEE.14.4.353.
2. Hooshyar A. Three-Phase Fault Direction Identification for Distribution Systems With DFIG-Based Wind DG / A. Hooshyar, M. A. Azzouz, E. F. El-Saadany // IEEE Transactions on Sustainable Energy. — 2014. — Vol. 5. — Is. 3. — Pp. 747–756. DOI: 10.1109/TSTE.2014.2298466.
3. Ma J. Analysis on application of a current-source based DFIG wind generator model / J. Ma, D. Zhao, L. Yao, M. Qian, K. Yamashita, L. Zhu // CSEE Journal of Power and Energy Systems. — 2018. — Vol. 4. — Is. 3. — Pp. 352–361. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2018.00060.
4. Prasad R. M. Rotor Position-Sensorless Algorithms for Direct Power Control of Rotor-Tied DFIG / R. M. Prasad, M. A. Mulla // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2021. — Vol. 36. — Is. 6. — Pp. 6213–6217. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3040705.
5. Arnalte S. Direct Torque Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Turbines / S. Arnalte, J. C. Burgos, J. L. Rodríguez-Amenedo // Electric Power Components and Systems. — 2002. — Vol. 30. — Is. 2. — Pp. 199–216. DOI: 10.1080/153250002753427851.
6. Prasad R. M. A Novel Position-Sensorless Algorithm for Field-Oriented Control of DFIG with Reduced Current Sensors / R. M. Prasad, M. A. Mulla // IEEE Transactions on Sustainable Energy. — 2018. — Vol. 10. — Is. 3. — Pp. 1098–1108. DOI: 10.1109/TSTE.2018.2860993.
7. Sharmila V. Fuzzy Sampled-Data Control for DFIG-Based Wind Turbine with Stochastic Actuator Failures / V. Sharmila, R. Rakkiyappan, Y. H. Joo // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. — 2021. — Vol. 51. — Is. 4. — Pp. 2199–2211. DOI: 10.1109/TSMC.2019.2946873.
8. Martinez M. I. Sliding-Mode Control for DFIG Rotor and Grid-Side Converters Under Unbalanced and Harmonically Distorted Grid Voltage / M. I. Martinez, G. Tapia, A. Susperregui, H. Camblong // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2012. — Vol. 27. — Is. 2. — Pp. 328–339. DOI: 10.1109/TEC.2011.2181996.
9. Shah A. P. Direct Power Control of DFIG using Super-Twisting Algorithm based on Second-Order Sliding Mode Control / A. P. Shah, A. J. Mehta // 14th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS). — IEEE, 2016. — Pp. 136–141. DOI: 10.1109/VSS.2016.7506905.
10. Mohammadi J. A Combined Vector and Direct Power Control for DFIG-Based Wind Turbines / J. Mohammadi, S. Vaez-Zadeh, S. Afsharnia, E. Daryabeigi // IEEE Transactions on Sustainable Energy. — 2014. — Vol. 5. — Is. 3. — Pp. 767–775. DOI: 10.1109/TSTE.2014.2301675.

11. *Beltran B.* Second-Order Sliding Mode Control of a Doubly Fed Induction Generator Driven Wind Turbine / B. Beltran, M. E. H. Benbouzid, T. Ahmed-Ali // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2012. — Vol. 27. — Is. 2. — Pp. 261–269. DOI: 10.1109/TEC.2011.2181515.
12. *Djeriri Y.* Artificial neural network based direct torque control of doubly fed induction generator / Y. Djeriri, A. Meroufel, A. Massoum // Journal of Electrical Engineering. — 2014. — Vol. 14. — Is. 2. — Pp. 71–79.
13. *Djeriri Y.* Lyapunov-Based Robust Power Controllers for a Doubly Fed Induction Generator / Y. Djeriri // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. — 2020. — Vol. 16. — No.4. — Pp. 551–558. DOI: 10.22068/IJEEE.16.4.551.
14. *Boubzizi S.* Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system / S. Boubzizi, H. Abid, A. El hajjaji, M. Chaabane // Protection and Control of Modern Power Systems. — 2018. — Vol. 3. — Article number: 21. DOI: 10.1186/s41601-018-0096-y.
15. *Evangelista C.* Active and Reactive Power Control for Wind Turbine Based on a MIMO 2-Sliding Mode Algorithm with Variable Gains / C. Evangelista, F. Valenciaga, P. Puleston // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2013. — Vol. 28. — Is. 3. — Pp. 682–689. DOI: 10.1109/TEC.2013.2272244.
16. *Chen S. Z.* Integral Sliding-Mode Direct Torque Control of Doubly-Fed Induction Generators Under Unbalanced Grid Voltage / S. Z. Chen, N. C. Cheung, K. C. Wong, J. Wu // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2010. — Vol. 25. — Is. 2. — Pp. 356–368. DOI: 10.1109/TEC.2009.2036249.
17. *Kashkooli M. R. A.* Improved Direct Torque Control for a DFIG under Symmetrical Voltage Dip with Transient Flux Damping / M. R. A. Kashkooli, S. M. Madani, T. A. Lipo // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2020. — Vol. 67. — Is. 1. — Pp. 28–37. DOI: 10.1109/TIE.2019.2893856.
18. *Sun D.* A Sliding-Mode Direct Power Control Strategy for DFIG Under Both Balanced and Unbalanced Grid Conditions Using Extended Active Power / D. Sun, X. Wang, H. Nian, Z. Q. Zhu // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2018. — Vol. 33. — Is. 2. — Pp. 1313–1322. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2686980.
19. *Khajeh A.* GA-Based Optimal LQR Controller to Improve LVRT Capability of DFIG Wind Turbines / A. Khajeh, R. Ghazi // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. — 2013. — Vol. 9. — No. 3. — Pp. 167–176.
20. *Wong K. C.* Direct Torque Control of a Doubly-fed Induction Generator with Space Vector Modulation / K. C. Wong, S. L. Ho, K. W. E. Cheng // Electric Power Components and Systems. — 2008. — Vol. 36. — Is. 12. — Pp. 1337–1350. DOI: 10.1080/15325000802258331.
21. *Sahri Y.* Direct Torque Control of DFIG Driven by Wind Turbine System Connected to the Grid / Y. Sahri, S. Tamalouzt, S. L. Belaid // 2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA). — IEEE, 2018. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICWEAA.2018.8605083.
22. *Pura P.* Direct torque control of a doubly fed induction generator working with unbalanced power grid / P. Pura, G. Iwanski // International Transactions on Electrical Energy Systems. — 2019. — Vol. 29. — Is. 4. DOI: 10.1002/etep.2815.
23. *El Ouanjli N.* Direct torque control of doubly fed induction motor using three-level NPC inverter / N. El Ouanjli, A. Derouich, A. El Ghzizal, M. Taoussi, Y. El Mourabit, K. Mezioui, B. Bossoufi // Protection and control of Modern Power Systems. — 2019. — Vol. 4. — Article number: 17. DOI: 10.1186/s41601-019-0131-7.
24. *Mondal S.* Improved Direct Torque and Reactive Power Control of a Matrix-Converter-Fed Grid-Connected Doubly Fed Induction Generator / S. Mondal, D. Kastha // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2015. — Vol. 62. — Is. 12. — Pp. 7590–7598. DOI: 10.1109/TIE.2015.2459056.
25. *Mossa M. A.* Effective Model Predictive Voltage Control for a Sensorless Doubly Fed Induction Generator / M. A. Mossa, T. D. Do, A. S. Al-Sumaiti, N. V. Quynh, A. A. Z. Diab // IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. — 2021. — Vol. 44. — Is. 1. — Pp. 50–64. DOI: 10.1109/ICJECE.2020.3018495.
26. *Chen T. C.* Model reference robust speed control for induction-motor drive with time delay based on neural network / T. C. Chen, T. T. Sheu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans. — 2001. — Vol. 31. — Is. 6. — Pp. 746–753. DOI: 10.1109/3468.983432.
27. *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.
28. *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.

29. *Bounadja E.* Direct Torque Control of Saturated Doubly-Fed Induction Generator using High Order Sliding Mode Controllers / E. Bounadja, A. Djahbar, M. O. Mahmoudi, M. Matallah // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). — 2016. — Vol. 7. — No. 7. — Pp. 55–61.
30. *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.
31. *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.
32. *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.
33. *Zou Z.* Integrated Protection of DFIG-Based Wind Turbine with a Resistive-Type SFCL Under Symmetrical and Asymmetrical Faults / Z. Zou, X. Y. Xiao, Y. F. Liu, Y. Zhang, Y. H. Wang // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2016. — Vol. 26. — Is. 7. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2016.2574352.
34. *Wu C.* Rotor Current Oriented Control Method of DFIG-DC System Without Stator Side Sensors / C. Wu, P. Cheng, H. Nian, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2020. — Vol. 67. — Is. 11. — Pp. 9958–9962. DOI: 10.1109/TIE.2019.2956415.
35. *Boudjema Z.* DSPACE implementation of a neural SVPWM technique for a two-level voltage source inverter / Z. Boudjema, H. Benbouhenni, A. Bouhani, F. Chabni // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. — 2021. — Vol. 17. — Is. 3. — Pp. 1793–1793. DOI: 10.22068/IJEEE.17.3.1793.
36. *Singh A.* Simulation of simplified SVM technique for three phase five-level cascaded H-bridge inverter / A. Singh, R. N. Mahanty // 2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC). — IEEE, 2017. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICOMICON.2017.8279061.
37. *Benbouhenni H.* Direct vector control of a DFIG supplied by an intelligent SVM inverter for wind turbine system / H. Benbouhenni, Z. Boudjema, A. Belaidi // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. — 2019. — Vol. 15. — Is. 1. — Pp. 45–55. DOI: 10.22068/IJEEE.15.1.45.
38. *Benbouhenni H.* Neuro-second order sliding mode control of a DFIG supplied by a two-level NSVM inverter for wind turbine system / H. Benbouhenni, Z. Boudjema, A. Belaidi // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. — 2018. — Vol. 14. — Is. 4. — Pp. 362–373. DOI: 10.22068/IJEEE.14.4.362.
39. *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.
40. *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.
41. *Benbouhenni H.* Seven-level NPC inverter-based neuronal direct torque control of the PMSM drives with regulation speed using neural PI controller / H. Benbouhenni // International Journal of Intelligent Information Systems. — 2019. — Vol. 8. — Is. 5. — Pp. 85–96. DOI: 10.11648/j.ijis.20190805.11.
42. *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.
43. *Belouahchi F.* Design of a new direct torque control using synergetic theory for double star induction motor / F. Belouahchi, E. Merabet // Journal Européen des Systèmes Automatisés. — 2020. — Vol. 53. — No. 6. — Pp. 903–914. DOI: 10.18280/jesa.530616.
44. *Vinod B. R.* Direct Torque Control Scheme for a Four-Level-Inverter Fed Open-End-Winding Induction Motor / Vinod B. R., Shiny G. // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2019. — Vol. 34. — Is. 4. — Pp. 2209–2217. DOI: 10.1109/TEC.2019.2941890.
45. *Geyer T.* Model Predictive Direct Torque Control of a Five-Level ANPC Converter Drive System / T. Geyer, S. Mastellone // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2012. — Vol. 48. — Is. 5. — Pp. 1565–1575. DOI: 10.1109/TIA.2012.2210174.
46. *Benbouhenni H.* 24 sectors DTC control of IM drive using ANFIS controller for minimize torque ripple / H. Benbouhenni // International Journal of Energy and Environment. — 2018. — Vol. 12. — Pp. 24–29.

47. Benbouhenni H. Four-level direct torque control of permanent magnet synchronous motor based on neural networks with regulation speed using neural PI controller / H. Benbouhenni // *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*. — 2019. — Vol. 8. — Is. 4. — Pp. 1–10.
48. Reghioui H. Enhancement of space vector modulation based-direct torque control using fuzzy PI controller for doubly star induction motor / H. Reghioui, S. Belhamdi, A. Abdelkarim, H. Lallouani // *Advances in Modelling and Analysis C*. — 2019. — Vol. 74. — No. 2–4. — Pp. 27–34. DOI: 10.18280/ama_c.742-404.
49. 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.
50. 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.
51. 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. Heydari, E., M. Rafiee, and M. Pichan. “Fuzzy-Genetic Algorithm-Based Direct Power Control Strategy for DFIG.” *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 14.4 (2018): 353–361. DOI: 10.22068/IJEEE.14.4.353.
2. Hooshyar, Ali, Maher Abdelkhalek Azzouz, and Ehab F. El-Saadany. “Three-Phase Fault Direction Identification for Distribution Systems With DFIG-Based Wind DG.” *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 5.3 (2014): 747–756. DOI: 10.1109/TSTE.2014.2298466.
3. Ma, Jin, Dawei Zhao, Liangzhong Yao, Minhui Qian, Koji Yamashita, and Lingzhi Zhu. “Analysis on application of a current-source based DFIG wind generator model.” *CSEE Journal of Power and Energy Systems* 4.3 (2018): 352–361. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2018.00060.
4. Prasad, Rajeshkumar M., and Mahmadasraf A. Mulla. “Rotor Position-Sensorless Algorithms for Direct Power Control of Rotor-Tied DFIG.” *IEEE Transactions on Power Electronics* 36.6 (2021): 6213–6217. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3040705.
5. Arnalte, S., J. C. Burgos and J. L. Rodríguez-Amenedo. “Direct Torque Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Turbines.” *Electric Power Components and Systems* 30.2 (2002): 199–216. DOI: 10.1080/153250002753427851.
6. Prasad, Rajeshkumar M., and Mahmadasraf A. Mulla. “A Novel Position-Sensorless Algorithm for Field-Oriented Control of DFIG with Reduced Current Sensors.” *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 10.3 (2019): 1098–1108. DOI: 10.1109/TSTE.2018.2860993.
7. Sharmila, V., R. Rakkiyappan and Young Hoon Joo. “Fuzzy Sampled-Data Control for DFIG-Based Wind Turbine with Stochastic Actuator Failures.” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 51.4 (2021): 2199–2211. DOI: 10.1109/TSMC.2019.2946873.
8. Martinez, M. Itsaso, Gerardo Tapia, Ana Susperregui, and Haritza Camblong “Sliding-Mode Control for DFIG Rotor- and Grid-Side Converters Under Unbalanced and Harmonically Distorted Grid Voltage.” *IEEE Transactions on Energy Conversion* 27.2 (2012): 328–339. DOI: 10.1109/TEC.2011.2181996.
9. Shah, Ankita P., and Axaykumar J. Mehta “Direct Power Control of DFIG using Super-Twisting Algorithm based on Second-Order Sliding Mode Control.” *14th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS)*. IEEE, 2016. 136–141. DOI: 10.1109/VSS.2016.7506905.
10. Mohammadi, Jafar, Sadegh Vaez-Zadeh, Saeed Afsharnia, and Ehsan Daryabeig. “A Combined Vector and Direct Power Control for DFIG-Based Wind Turbines.” *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 5.3 (2014): 767–775. DOI: 10.1109/TSTE.2014.2301675.
11. Beltran, Brice, Mohamed El Hachemi Benbouzid, and Tarek Ahmed-Ali. “Second-Order Sliding Mode Control of a Doubly Fed Induction Generator Driven Wind Turbine.” *IEEE Transactions on Energy Conversion* 27.2 (2012): 261–269. DOI: 10.1109/TEC.2011.2181515.
12. Djeriri, Youcef, Abdelkadeff Meroufel, and Ahmed Massoum. “Artificial neural network based direct torque control of doubly fed induction generator.” *Journal of Electrical Engineering* 14.2 (2014): 71–79.
13. Djeriri, Youcef. “Lyapunov-Based Robust Power Controllers for a Doubly Fed Induction Generator.” *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering* 16.4 (2020): 551–558. DOI: 10.22068/IJEEE.16.4.551.

14. Boubzizi, Saïd, Hamed Abid, Ahmed El hajjaji, and Mohamed Chaabane. "Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system." *Protection and Control of Modern Power Systems* 3 (2018). DOI: 10.1186/s41601-018-0096-y.
15. Evangelista, Carolina, Fernando Valenciaga, and Paul Puleston. "Active and Reactive Power Control for Wind Turbine Based on a MIMO 2-Sliding Mode Algorithm with Variable Gains." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 28.3 (2013): 682–689. DOI: 10.1109/TEC.2013.2272244.
16. Chen, Si Zhe, Norbert C. Cheung, Ka Chung Wong, and Jie Wu. "Integral Sliding-Mode Direct Torque Control of Doubly-Fed Induction Generators Under Unbalanced Grid Voltage." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 25.2 (2010): 356–368. DOI: 10.1109/TEC.2009.2036249.
17. Kashkoli, M. R. Agha, Seyed M. Madani, and Thomas A. Lipo. "Improved Direct Torque Control for a DFIG under Symmetrical Voltage Dip with Transient Flux Damping." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67.1 (2020): 28–37. DOI: 10.1109/TIE.2019.2893856.
18. Sun, Dan, Xiaohe Wang, Heng Nian, and Z. Q. Zhu. "A Sliding-Mode Direct Power Control Strategy for DFIG Under Both Balanced and Unbalanced Grid Conditions Using Extended Active Power." *IEEE Transactions on Power Electronics* 33.2 (2018): 1313–1322. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2686980.
19. Khajeh, Ahmad, and Reza Ghazi. "GA-Based Optimal LQR Controller to Improve LVRT Capability of DFIG Wind Turbines." *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering* 9.3 (2013): 167–176.
20. Wong, K. C., S. L. Ho, and K.W.E. Cheng. "Direct Torque Control of a Doubly-fed Induction Generator with Space Vector Modulation." *Electric Power Components and Systems* 36.12 (2008): 1337–1350. DOI: 10.1080/15325000802258331.
21. Sahri, Younes, Salah Tamalouzt and Sofia Lalouni Belaid. "Direct Torque Control of DFIG Driven by Wind Turbine System Connected to the Grid." *2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA)*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ICWEAA.2018.8605083.
22. Pura, Piotr, and Grzegorz Iwanski. "Direct torque control of a doubly fed induction generator working with unbalanced power grid." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 29.4 (2019). DOI: 10.1002/etep.2815.
23. El Ouanjli, Najib, Aziz Derouich, Abdelaziz El Ghzizal, Mohammed Taoussi, Youness El Mourabit, Khalid Mezioui, and Badre Bossoufi. "Direct torque control of doubly fed induction motor using three-level NPC inverter." *Protection and control of Modern Power Systems* 4 (2019). DOI: 10.1186/s41601-019-0131-7.
24. Mondal, Suman, and Debaprasad Kastha. "Improved Direct Torque and Reactive Power Control of a Matrix-Converter-Fed Grid-Connected Doubly Fed Induction Generator." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62.12 (2015): 7590–7598. DOI: 10.1109/TIE.2015.2459056.
25. Mossa, Mahmoud A., Ton Duc Do, Ameena Saad Al-Sumaiti, Nguyen Vu Quynh, and Ahmed A. Zaki Diab. "Effective Model Predictive Voltage Control for a Sensorless Doubly Fed Induction Generator." *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering* 44.1 (2021): 50–64. DOI: 10.1109/ICJECE.2020.3018495.
26. Chen, Tien-Chi, and Tsong-Terng Sheu. "Model reference robust speed control for induction-motor drive with time delay based on neural network." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans* 31.6 (2001): 746–753. DOI: 10.1109/3468.983432.
27. Ayir, 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.
28. 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.
29. Bounadja, Elhadj, Abdelkader Djahbar, Mohand Oulhadj Mahmoud, and Mohamed Matallah. "Direct Torque Control of Saturated Doubly-Fed Induction Generator using High Order Sliding Mode Controllers." *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)* 7.7 (2016): 55–61.
30. 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.
31. 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.
32. 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.

33. Zou, Zhi-Ce, Xian-Yong Xiao, Yuan-Fan Liu, Yi Zhang, and Yu-Hong Wang. "Integrated Protection of DFIG-Based Wind Turbine with a Resistive-Type SFCL Under Symmetrical and Asymmetrical Faults." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 26.7 (2016): 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2016.2574352.
34. Wu, Chao, Peng Cheng, Heng Nian, and Frede Blaabjerg. "Rotor Current Oriented Control Method of DFIG-DC System Without Stator Side Sensors." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67.11 (2020): 9958–9962. DOI: 10.1109/TIE.2019.2956415.
35. Boudjema, Zinelaabidine, Habib Benboughenni, A. Bouhani, and F. Chabni. "DSPACE implementation of a neural SVPWM technique for a two-level voltage source inverter." *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering* 17.3 (2021): 1793–1793. DOI: 10.22068/IJEEE.17.3.1793.
36. Singh, Anita, and Rabindra Nath Mahanty. "Simulation of simplified SVM technique for three phase five-level cascaded H-bridge inverter." *2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)*. IEEE, 2017. 1–6. DOI: 10.1109/ICOMICON.2017.8279061.
37. Benboughennih, Habib, Zinelaabidine Boudjema, and Abdelkader Belaidi. "Direct vector control of a DFIG supplied by an intelligent SVM inverter for wind turbine system." *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 15.1 (2019): 45–55. DOI: 10.22068/IJEEE.15.1.45.
38. Benboughennih, Habib, Zinelaabidine Boudjema, and Abdelkader Belaidi. "Neuro-second order sliding mode control of a DFIG supplied by a two-level NSVM inverter for wind turbine system." *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 14.4 (2018): 362–373. DOI: 10.22068/IJEEE.14.4.362.
39. Mehedi, Fayçal, Habib Benboughenni, 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.
40. Mehedi, Fayçal, Adil Yahdou, Abdelkadir Belhadj Djilali, and Habib Benboughenni. "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.
41. Benboughenni, Habib. "Seven-level NPC inverter-based neuronal direct torque control of the PMSM drives with regulation speed using neural PI controller." *International Journal of Intelligent Information Systems* 8.5 (2019): 85–96. DOI: 10.11648/j.ijis.20190805.11.
42. Benboughenni, 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.
43. Belouahchi, Farid, and Elkheir Merabet. "Design of a new direct torque control using synergetic theory for double star induction motor." *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 53.6 (2020): 903–914. DOI: 10.18280/jesa.530616.
44. Vinod, B.R., and G. Shiny. "Direct Torque Control Scheme for a Four-Level-Inverter Fed Open-End-Winding Induction Motor." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 34.4 (2019): 2209–2217. DOI: 10.1109/TEC.2019.2941890.
45. Geyer, Tobias, and Silvia Mastellone. "Model Predictive Direct Torque Control of a Five-Level ANPC Converter Drive System." *IEEE Transactions on Industry Applications* 48.5 (2012): 1565–1575. DOI: 10.1109/TIA.2012.2210174.
46. Benboughenni, Habib. "24 sectors DTC control of IM drive using ANFIS controller for minimize torque ripple." *International Journal of Energy and Environment* 12 (2018): 24–29.
47. Benboughenni, Habib. "Four-level direct torque control of permanent magnet synchronous motor based on neural networks with regulation speed using neural PI controller." *Majlesi Journal of Mechatronic Systems* 8.4 (2019): 1–10.
48. Reghioui, Hassen, Saad Belhamdi, Ammar Abdelkarim, and Hellali Lallouani. "Enhancement of space vector modulation based-direct torque control using fuzzy PI controller for doubly star induction motor." *Advances in Modelling and Analysis C* 47.2–4 (2019): 27–34. DOI: 10.18280/ama_c.742–404.
49. 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.
50. 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.
51. 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 Джбарах —

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 22 июля 2021 г.

Received: July 22, 2021.

APPLICATION OF RELAY PROTECTION SYSTEMS IN SHIP POWER COMPLEXES

A. S. Bordyug

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

The use of relay protection of electrical power objects on ships is associated with the widespread use of the elemental base of computer technology. A relay protection system based on computer technology is a set of interacting computing facilities for processing information coming from a protected object to recognize its state. Important issues in the construction of such systems are the choice of information processing tools at individual stages of transformation and the organization of their interaction. In the general case, information processing in the relay protection system can be implemented using analog, digital (programmable) and hybrid computing devices. Analog computing devices have low versatility and require additional design developments when changing the information processing algorithm. Their most important advantage is to ensure high speed of the computational process. Digital computing devices are distinguished by high accuracy, versatility and can be used to implement various information processing algorithms within the limits of their technical capabilities. Hybrid computing devices contain analog and digital computing facilities, interacting on the basis of a single algorithm. Therefore, their speed, accuracy and versatility are determined by the degree of combination of these means. Applying the relay protection systems in ship electric power complexes, where relays can be used as independent products, is proposed in the paper. The possibility of using programmable logic controllers for organizing control and communication between system elements when using at each level of separate computing subsystems with parallel program execution is considered.

Keywords: hybrid computing devices, relay protection, electric power complex, multi-controller computing systems, autonomous protection.

For citation:

Bordyug, Aleksandr S. "Application of relay protection systems in ship power complexes." Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 13.6 (2021): 908–915. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-908-915.

УДК 681.5

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

А. С. Бордюг

ФГБОУ ВО «КГМТУ», г. Керчь, Российская Федерация

Предметом предлагаемого исследования являются вопросы применения на судах релейной защиты электроэнергетических объектов, связанные с широким использованием элементной базы вычислительной техники. Рассмотренная система релейной защиты на базе вычислительной техники представляет собой совокупность взаимодействующих вычислительных средств переработки информации, поступающей от защищаемого объекта для распознавания его состояния. Важными вопросами построения таких систем являются выбор средств обработки информации на отдельных этапах преобразования и организация их взаимодействия. В общем случае процесс переработки информации в системе релейной защиты может быть реализован с помощью аналоговых, цифровых (программируемых) и гибридных вычислительных устройств. Аналоговые вычислительные устройства имеют низкую универсальность и требуют дополнительных конструкторских разработок при изменении алгоритма обработки информации. Важнейшее их достоинство состоит в обеспечении высокого быстродействия вычислительного процесса. Цифровые вычислительные устройства отличаются высокой точностью, универсальностью и могут быть использованы для реализации различных алгоритмов обработки информации в пределах своих технических возможностей. Гибридные вычислительные устройства содержат аналоговые и цифровые вычислительные средства, взаимодействующие на основе единого алгоритма. Поэтому их быстродействие, точность и универсальность

определяются степенью совмещения указанных средств. В данной статье предлагается применение систем релейной защиты в судовых электроэнергетических комплексах, в которых реле могут использоваться как самостоятельные изделия. Рассмотрена возможность применения программируемых логических контроллеров для организации управления и связи между элементами систем при использовании на каждом уровне отдельных вычислительных подсистем с параллельным выполнением программ. Каждая из гибридных вычислительных подсистем релейной защиты включает единую аппаратную и многоконтроллерную цифровую программируемую части. При этом ЦПЧ, помимо распределенной памяти микроконтроллера, может дополнительно содержать общую память программ. Это положение относится и к ЦВП. При реализации простых защит функции ЦПЧ и ЦВП может выполнять общая многоконтроллерная вычислительная система. В рассмотренной системе РЗ отдельные директивные каналы могут выполнять функции сложной автономной защиты либо комплексной защиты объекта. Система с приведенной структурной организацией в целом пригодна для реализации функций комплексных защит нескольких объектов, а также централизованной защиты. Следует отметить, что из рассмотренных вариантов организации систем РЗ могут быть синтезированы структуры, содержащие промежуточные решения.

Ключевые слова: гибридные вычислительные устройства, релейная защита, электроэнергетический комплекс, многоконтроллерные вычислительные системы, автономная защита.

Для цитирования:

Бордюг А. С. Применение систем релейной защиты в судовых электроэнергетических комплексах / А. С. Бордюг // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 908–915. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-908-915.

Введение (Introduction)

Применение гибридных вычислительных устройств (ГВУ) в технике релейной защиты (РЗ) создает предпосылки для оптимального сочетания аналоговых и цифровых методов обработки входных величин, а также обеспечивает новые возможности для повышения качества алгоритмов функционирования защитных устройств [1], [2]. В системе релейной защиты РЗ на основе средств вычислительной техники (ВТ), как в любой информационно-измерительной системе, выполняются измерение, передача, преобразование и обработка входных величин для распознавания состояния защищаемого объекта.

Целью данного исследования является разработка гибридных вычислительных устройств для повышения электроэнергетического комплекса судна. Объект исследования — судовая электростанция. Новизной данной работы является применение современных программируемых логических контроллеров вместо устаревших электронно-вычислительных машин. Весь процесс переработки информации в системе РЗ можно разделить на два этапа:

- 1-й этап — первичная или предварительная обработка входных величин;
- 2-й этап — основная обработка информационных параметров контролируемых величин.

Методы и материалы (Methods and Materials)

На этапе первичной или предварительной обработки производится передача от объекта защиты, измерение и преобразование входных величин, формирование на их основе вспомогательных величин, являющихся функциями входных, а также определяются информационные параметры контролируемых величин. В общем случае для информационных величин, являющихся функциями входных, а также в случае определения информационных параметров контролируемых величин могут быть использованы такие физические параметры, как амплитуды, фазовые сдвиги, временные интервалы и т. п. Этап основной обработки включает логико-математическое преобразование информационных параметров контролируемых величин и распознавание на этой основе состояния защищаемого объекта.

Следует отметить, что приведенное ранее разделение процесса переработки информации в определенной степени условно, так как не всегда можно однозначно выделить из выполняемых операций относящиеся к первичной или предварительной обработке. Вместе с тем приведенное разделение информационных процессов может рассматриваться в качестве основы для выбора состава технических средств и организации систем РЗ на элементной базе ВТ.

Поскольку на этапе первичной или предварительной обработки входных величин производится в основном линейное преобразование сигналов, включающее выполнение вычислительных операций, для реализации функций данного этапа предпочтительным является использование гибридных вычислительных устройств (ГВУ). Для выполнения функций второго этапа, где преобладает логико-математическое преобразование информации, целесообразно применение цифровых вычислительных устройств (ЦВУ).

С учетом характера входных величин, контролируемых системой РЗ, предпочтительными являются ГВУ одностороннего действия [3], поскольку в них осуществляется последовательная обработка входных величин вначале в непрерывной форме посредством аналоговых функциональных элементов, а затем в дискретной — с помощью цифровых программируемых средств. ГВУ с указанной организацией обработки входных величин в общем случае включает аналоговую и цифровую программируемую (АПЧ и ЦПЧ) части, соединенные посредством устройства связи, обеспечивающего обмен информацией между аналоговой частью (АЧ) и цифровой программной частью ЦПЧ. В состав устройства связи могут входить как аналого-цифровые преобразователи, так и аналого-дискретные.

В алгоритмах функционирования программируемой части ГВУ в качестве исходной информации могут использоваться цифровые отсчеты как интегральных, так и мгновенных значений электрических величин, формируемых на выходе АЧ. Поэтому в зависимости от формы представления информации на входе ЦПЧ можно выделить следующие типы ГВУ [4]:

- с цифровой обработкой отсчетов средневыпрямленных (действующих) значений сигналов;
- с цифровой обработкой длительностей время-импульсных сигналов;
- с цифровой обработкой отсчетов мгновенных значений сигналов.

Общие принципы построения выделенных типов ГВУ поясняет рис. 1. ГВУ первого типа (рис. 1, а) в результате аналоговой обработки входных величин на выходе АЧ с помощью ИБ формируются средневыпрямленные (действующие) значения электрических величин. Простейший ИБ состоит из последовательно соединенных формирователя модуля и фильтра нижних частот. Перспективным является построение ИБ на основе цифровых интеграторов [2]. Отличительной особенностью ГВУ данного типа является отсутствие жестких ограничений на величину шага дискретизации выходных сигналов ИБ, которые могут быть использованы для выполнения помехоустойчивых каналов защиты с небольшим быстродействием.

В ГВУ второго типа (рис. 1, б) результат аналоговой обработки входных величин представляется на выходе БАДП совокупностью время-импульсных сигналов, формируемых по моментам переходов сигналов $e_1, \dots, e_n$ на выходе БАО через нулевой и заданные опорные уровни. При этом информационные параметры контролируемых величин определяются в результате цифровой обработки длительностей сформированных время-импульсных сигналов и уровней опорных сигналов. Достоинством ГВУ данного типа является возможность определения информационных параметров контролируемых величин в широком диапазоне изменения входных токов и напряжений без изменения параметров БАО и ФОС с учетом текущего значения частоты. На их основе могут быть выполнены каналы защиты с быстродействием, составляющим один-два периода промышленной частоты.

В ГВУ третьего типа (рис. 1, в) на выходе АЧ формируются аналоговые сигналы, которые в результате аналого-цифрового преобразования представляются на входе ЦПЧ цифровыми отсчетами мгновенных значений. Данные ГВУ наиболее универсальны и позволяют выполнить каналы защит различных назначений на основе одних и тех же блоков АЧ. Они могут быть использованы для построения каналов защиты с быстродействием на уровне одного периода промышленной частоты. Приведенные структуры ГВУ во многом условны и отражают лишь последовательность переработки информации. Четкое выделение функциональных блоков не всегда возможно, поскольку одни и те же элементы могут выполнять несколько функций.

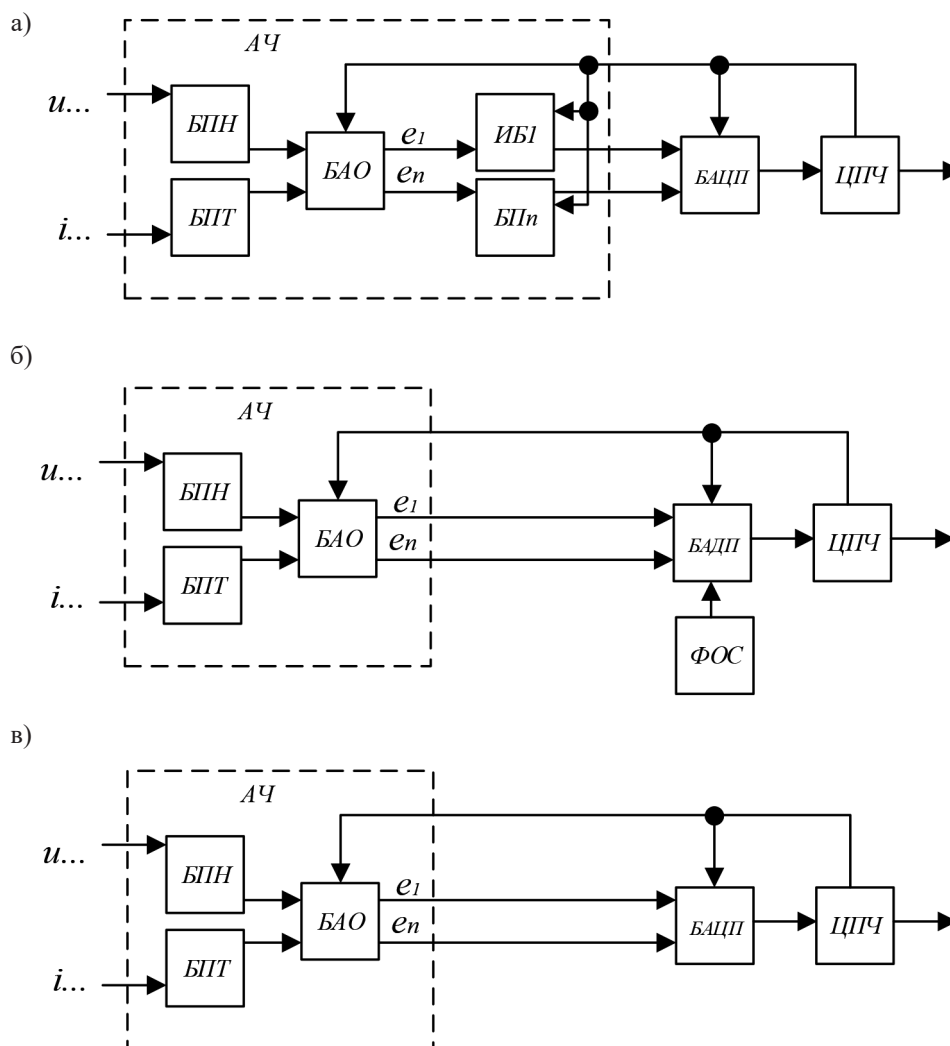


Рис. 1. Принципы построения гибридных вычислительных устройств:

а — с цифровой обработкой отсчетов средневыпрямленных (действующих) значений сигналов;

б — с цифровой обработкой длительностей время-импульсных сигналов;

в — с цифровой обработкой отсчетов мгновенных значений сигналов

Условные обозначения:

$u, \dots, i, \dots$ — входные сигналы; БПН и БПТ — блоки преобразователей напряжения и тока соответственно;

БАО — блок аналоговой обработки сигналов; ИБ — измерительный блок;

БАЦП и БАДП — блоки аналого-цифрового и аналого-дискретного преобразований соответственно;

ФОС — формирователь опорных сигналов; ЦПЧ — цифровая программируемая часть

Основная особенность выделенных типов ГВУ состоит в том, что они строятся на базе решающих элементов с разделенными аналоговыми и цифровыми признаками. Достоинством такого подхода является возможность использования и развития накопленного опыта реализации аналоговых микросистемных устройств РЗ при одновременном рациональном использовании цифровых средств ВТ. Наличие в ГВУ цифрового управления позволяет расширить функциональные возможности АЧ за счет выполнения отдельных ее блоков с дискретно изменяемыми параметрами.

Результаты (Results)

Рассмотренные ГВУ могут использоваться при построении отдельных реле как самостоятельных изделий. Простейший директивный канал защиты, вырабатывающий команду на отключение защищаемого объекта, представляет собой векторную структуру, образованную ГВУ и ЦВУ. При этом ГВУ и ЦВУ взаимодействуют на основе единого алгоритма переработки информации. Группа

директивных каналов может быть снабжена дополнительным ВУ используется с развитой периферией для реализации функций обслуживания системы РЗ [1]. В качестве такого ВУ используется программируемый логический контроллер (ПЛК) с набором внешних устройств, включающих клавиатуру, дисплей, дополнительные модули ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов.

ПЛК позволит производить включение системы РЗ в работу и вывод ее из действия, задание и изменение параметров срабатывания защит. На основе ПЛК возможно создание эффективной системы регистрации информации о работе РЗ с анализом ее действия, который предполагает регистрацию информации на определенном отрезке времени в нормальном и аварийном режимах с последующей ее обработкой после срабатывания защиты. По своим функциональным возможностям ПЛК является мощным средством тестирования и контроля систем РЗ. С помощью ПЛК может быть организован периодический тестовый контроль системы РЗ для выявления устойчивых отказов. Кроме устойчивых отказов в системе РЗ на базе средств ВТ возможны сбои. Это может приводить не только к отказам срабатывания, но к излишним и ложным срабатываниям. Для снижения параметра потока ложных срабатываний целесообразно организовать параллельный счет, возможно, по упрощенному алгоритму. При значительном расхождении результатов основного и контролируемого алгоритмов действие директивного канала защиты может быть заблокировано. Следует отметить, что при таком исполнении система РЗ будет иметь достаточную надежность и полный сервис.

На основе ранее изложенного можно рассмотреть значительное многообразие вариантов структурной организации систем РЗ на базе средств ВТ. Наиболее характерные из них представлены на рис. 2. Система релейной защиты, приведенная на рис. 2, а, состоит из нескольких автономных директивных каналов, каждый из которых, в свою очередь, включает ГВУ и ЦВУ, соединенные прямой связью. В качестве программируемой части ГВУ и ЦВУ предпочтительно использование ПЛК, конструктивно выполненных в виде БИМ, включающей микропроцессор, память программ и память данных, а также программируемые интерфейсные схемы для организации внешних связей.

В простейшем случае программируемая часть ГВУ, а также ЦВУ могут состоять из нескольких независимо функционирующих БИМ. Использование ПЛК для построения директивного канала защиты обеспечивает достижение высоких показателей его эффективности. Благодаря прямым связям между ГВУ и ЦВУ, а также распределенной памяти программ отдельных ПЛК такие каналы обладают высокой производительностью и приспособлены для решения узкого круга задач РЗ.

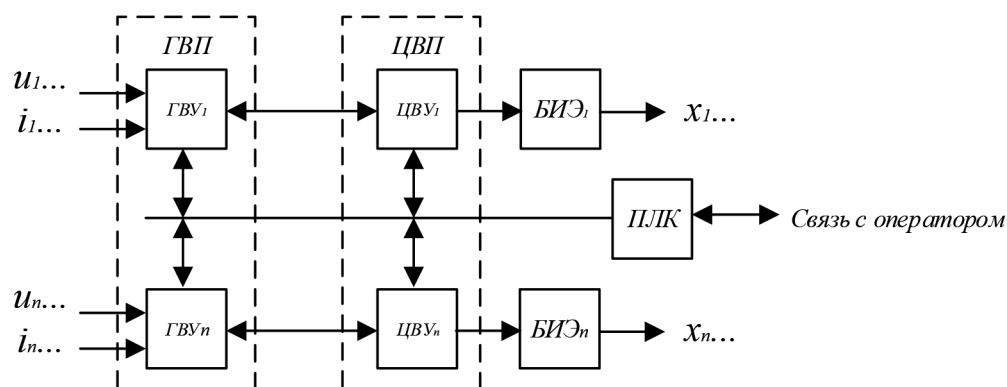
Необходимость организации синхронного обмена данными между ГВУ и ЦВУ в рассматриваемой структуре может явиться причиной потери быстродействия директивного канала либо привести к необходимости упрощения алгоритма функционирования защиты. Определенные возможности для устранения этих недостатков дает организация связи между ГВУ и ЦВУ с помощью общей памяти данных (ОПД). При этом ЦВУ работает в асинхронном режиме по отношению к ГВУ и на ЦВУ не накладывается жестких ограничений по времени реализации своих функций.

Следует отметить, что в ряде случаев при реализации алгоритмов простых защит программируемая часть ГВУ и ЦВУ может представлять единое конструктивно законченное вычислительное устройство. Связь ПЛК с ВУ автономных каналов защит может быть выполнена посредством общей магистрали, по которой осуществляется обмен информацией между ВУ каналов и ПЛК, а также передаются управляющие команды. При отказе ПЛК директивные каналы защиты сохраняют работоспособность.

К недостаткам рассмотренной структурной организации системы РЗ относится трудность реализации сложных алгоритмов автономных защит из-за ограниченных возможностей ПЛК, а также возможная избыточность ПЛК при реализации комплексной защиты объекта. Оптимальная организация переработки информации в системе РЗ может быть обеспечена при использовании на каждом уровне отдельных вычислительных подсистем с параллельным выполнением программ. Структурная организация системы РЗ с учетом указанных замечаний представлена на рис. 2, б. В этой системе высокопроизводительные директивные каналы защиты выполнены состоящими из двух подсистем: ГВП и ЦВП, с последовательной асинхронной связью между ними посредством ОПД. Каждая вычислительная подсистема по общей магистрали имеет связь с ПЛК.

В качестве ЦВП и программируемой части ГВП предпочтительно использование многоконтроллерных вычислительных систем (МВС), выгодно отличающихся как от многомашинных систем на основе микро-ЭВМ, так и от многопроцессорных на основе микропроцессорных комплектов БИС [6]. МВС имеют минимальную избыточность, требуют небольших дополнительных конструкторских разработок и аппаратных затрат при их построении. Кроме того, программное обеспечение МВС включает в себя готовое программное обеспечение стандартных ПЛК. В связи с этим МВС являются альтернативной элементной базой при построении систем РЗ, обеспечивающей достижение компромисса между многомашинными и многопроцессорными системами защиты [5]–[8].

а)



б)

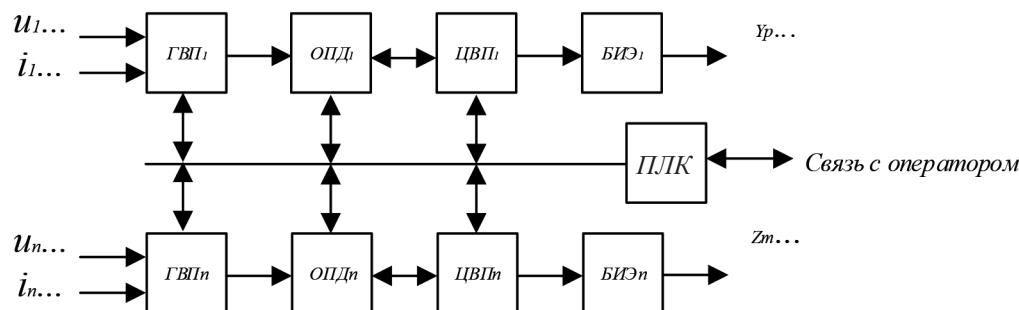


Рис. 2. Принципы организации систем релейной защиты:

а — с автономным директивным каналом; б — с параллельным выполнением программ

Условные обозначения:

$u_1, \dots, i_1, \dots, u_n, \dots, i_n, \dots$ — входные сигналы; ГВУ и ЦВУ — гибридное и цифровое ВУ соответственно;

ГВЦ и ЦВП — гибридная и цифровая вычислительная подсистема;

БИЭ — блок исполнительных элементов;

x_1, x_n, y_p, z_m — совокупность дискретных управляющих команд и информационных сигналов

Каждая из ГВП системы РЗ включает единую АЧ и многоконтроллерную ЦПЧ. При этом ЦПЧ, помимо распределенной памяти МК, может дополнительно содержать общую память программ. Это положение относится и к ЦВП. При реализации простых защит функции ЦПЧ и ЦВП может выполнять общая МВС. В рассмотренной системе РЗ отдельные директивные каналы могут выполнять функции сложной автономной защиты либо комплексной защиты объекта [9], [10]. Система с приведенной структурной организацией в целом является пригодной для реализации функций комплексных защит нескольких объектов, а также централизованной защиты. Следует отметить, что из рассмотренных вариантов организации систем РЗ могут быть синтезированы структуры, содержащие промежуточные решения.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В системах РЗ на элементной базе вычислительной техники целесообразна организация распределенной обработки информации при совместном использовании аналоговых функциональных элементов и цифровых программируемых средств.
2. Перспективными являются системы РЗ, состоящие из нескольких директивных каналов, каждый из которых выполнен в виде многоконтроллерных ГВП и ЦВП с последовательной асинхронной связью между ними посредством ОПД.
3. Директивные каналы защиты целесообразно дополнить ПЛК с развитой периферией, обеспечивающей обслуживание системы РЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордюг А. С. Применение циклического тестирования аппаратного обеспечения морских систем управления / А. С. Бордюг // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2020. — Т. 16. — № 3. — С. 77–82. DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-77-82.
2. Михайлов В. В. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты / В. В. Михайлов, Е. В. Кирьевский, Е. М. Ульяницкий и др.; Под ред. В. П. Морозкина. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 240 с.
3. Беки Д. А. Теория и применения гибридных вычислительных систем / Д. А. Беки, У. Д. Карплюс. — М.: Мир, 1970. — 484 с.
4. Chernyi S. G. The Reliability Assessment of Functioning of Autonomous Power System of Drilling Rigs / S. G. Chernyi, A. S. Bordug, L. N. Kozachenko, P. A. Erofeev, V. A. Zhukov // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). — IEEE, 2020. — Pp. 259–263. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039117.
5. Реймер В. В. Перспективы развития релейной защиты / В. В. Реймер, Ю. И. Косарева // Совершенствование инженерно-технического обеспечения технологических процессов в АПК: материалы междунар. науч.-практич. конф.; Отв. ред. Ю. А. Ушаков. — Оренбург: Оренбургский гос. аграрный ун-т, 2015. — С. 222–223.
6. Chernyi S. G. Models and Information Technologies of Clustering and Location of Group Expert Assessments in Terms of Uncertainty / S. G. Chernyi, A. A. Zhelezniak, I. K. Ovcharenko, I. S. Goryachev, P. A. Daragan // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). — IEEE, 2020. — Pp. 264–267. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039400.
7. Никитенко Я. А. Методы повышения достоверности контроля диагностических характеристик оборудования / Я. А. Никитенко, А. А. Железняк // Актуальные аспекты и приоритетные направления развития транспортной отрасли: материалы молодежного научного форума студентов и аспирантов транспортных вузов с международным участием. — М.: Изд-во «Перо», 2019. — С. 210–214.
8. Бордюг А. С. Моделирование интегрированных преобразователей энергии в судовых многогенераторных системах / А. С. Бордюг // Морские технологии: проблемы и решения — 2020: сб. тр. по материалам II нац. науч.-практ. конф. преп. и асп.; Под общ. ред. Е. П. Масюткина. — Керчь: Керченский гос. морской технол. ун-т, 2020. — С. 47–51.
9. Бордюг А. С. Применение технологии распределенного оптического контроля в судовых электроэнергетических системах / А. С. Бордюг // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 2. — С. 75–81. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-75-81.
10. Sokolov S. Use of Social Engineering Methods in Transport: Methods, Protection, Facts, Consequences / S. Sokolov, A. Nyrkov, S. Chernyi, N. Nazarov // Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020. — Springer, Singapore, 2021. — Pp. 57–66. DOI: 10.1007/978-981-33-6208-6_7.

REFERENCES

1. Bordyug, Aleksandr. “Application of cyclic testing of marine control hardware.” *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* 16.3 (2020): 77–82. DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-77-82.
2. Mikhailov, V.V., et al. *Mikroprotsessornye gibkie sistemy releinoi zashchity*. Edited by V. P. Morozkin. M.: Energoatomizdat, 1988.

3. Beki, D.A., and U. D. Karplyus. *Teoriya i primeneniya gibridnykh vychislitel'nykh sistem*. M.: Mir, 1970.
4. Chernyi, Sergei G., Aleksandr S. Bordug, Lubov N. Kozachenko, Pavel A. Erofeev, and Vladimir A. Zhukov. "The Reliability Assessment of Functioning of Autonomous Power System of Drilling Rigs." *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2020. 259–263. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039117.
5. Reimer, V. V., and Yu. I. Kosareva. "Perspektivy razvitiya releinoi zashchity." *Sovershenstvovanie inzhenerno-tekhnicheskogo obespecheniya tekhnologicheskikh protsessov v APK: mater. mezhdunar. nauch.-praktich. konf.* Orenburg: Orenburgskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2015. 222–223.
6. Chernyi, Sergei G., Aleksandr A. Zhelezniak, Igor K. Ovcharenko, Ivan S. Goryachev, and Pavel A. Daragan. "Models and Information Technologies of Clustering and Location of Group Expert Assessments in Terms of Uncertainty." *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2020. 264–267. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039400.
7. Nikitenko, Ya. A., and A. A. Zheleznyak. "Metody povysheniya dostovernosti kontrolya diagnosticheskikh kharakteristik oborudovaniya." *Aktual'nye aspekty i prioritetye napravleniya razvitiya transportnoi otrasli. Materialy molodezhnogo nauchnogo foruma studentov i aspirantov transportnykh vuzov s mezhdunarodnym uchastiem*. M.: Izdatel'stvo "Pero", 2019. 210–214.
8. Bordug, A. S. "Modelirovanie integrirovannykh preobrazovatelei energii v sudovykh mnogogeneratornykh sistemakh." *Morskie tekhnologii: problemy i resheniya — 2020. Sbornik trudov po materialam II Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii prepodavatelei i aspirantov «Morskie tekhnologii: problemy i resheniya–2020»*. Edited by E. P. Masyutkin. Kerch': FGBOU VO «Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet», 2020. 47–51.
9. Bordug, Alexander Sergeevich. "Application of distributed optical control technology in ship power systems." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies 2* (2021): 75–81. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-75-81.
10. Sokolov, Sergei, Anatoly Nyrkov, Sergei Chernyi, and Nikita Nazarov. "Use of Social Engineering Methods in Transport: Methods, Protection, Facts, Consequences." *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020*. Springer, Singapore, 2021. 57–66. DOI: 10.1007/978-981-33-6208-6_7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бордюг Александр Сергеевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «КГМТУ»
298309, Российская Федерация, г. Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: alexander.bordug@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Bordug, Aleksandr S. —
PhD
Kerch State Maritime Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: alexander.bordug@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 19 октября 2021 г.
Received: October 19, 2021.*

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 13. № 6

2021 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.12.21. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 19. Тираж 500 экз. Заказ № 463/21

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7