

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 14. № 1

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2022**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2022. — Т. 14. — № 1. — 150 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, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ7

- Смоленцев С. В., Исаков Д. В., Солодовниченко М. Б.* Проблема прогнозирования траекторий движения судов в акватории7
- Дерябин В. В.* Модель движения судна для счисления пути 17
- Ююкин И. В.* Сплайновое синтезирование картографированного эталона информативности поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации 25
- Ершов А. А., Буклис П. И., Развозов С. Ю.* Обоснование и расчет «штормовых зигзагов» при плавании танкеров 40
- Андреева Е. В., Тезиков А. Л.* Формализация показателя стесненности акватории Северного морского пути 55
- Ксенофонтов Н. М., Сугак О. В.* Исследование возможности образования усталостных повреждений на зубчатых колесах открытой передачи электропривода сегментных ворот шлюзов канала имени Москвы 63
- Кузнецов А. Л., Щербакова-Слюсаренко В. Н., Семенов А. Д.* Тенденции развития и устойчивость глобальной контейнерной транспортно-логистической системы 75
- Изотов О. А.* Анализ контейнерного грузораспределения отправки сборных партий из морского порта 87

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 93

- Кузнецов Р. В.* Аналитический обзор отечественного и зарубежного опыта разработки и проектирования судовых реверс-редукторных передач 93
- Живлюк Г. Е., Петров А. П.* Применение топливных элементов в энергообеспечении водного транспорта 104
- Мосейко Е. С., Ольховик Е. О.* Оценка надежности судовых механических систем для арктического судоходства 120

Том 14. № 1

2022

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. Гуца

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. Пошивай

Заместитель
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

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

**Члены
редколлегии:**

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

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ
И СИСТЕМЫ..... 129**

Доровской В. А., Зинченко Е. Г., Чернобай К. С. Математическая модель случайных процессов систем автоматического регулирования в структуре СЭУ..... 129

Труднев С. Ю., Марченко А. А. Разработка компьютерной модели источника постоянного напряжения на основе емкостного накопителя 140

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 7

- Smolentsev S. V., Isakov D. V., Solodovnichenko M. B.* The problem of forecasting vessels trajectories in the water area..... 7
- Deryabin V. V.* A model of vessel motion for dead reckoning 17
- Yuyukin I. V.* Spline synthesis of the charted reference of the field informativity in mission of correlation-extreme navigation 25
- Ershov A. A., Buklis P. I., Razvozov S. Yu.* Justification and calculation of “storm zigzags” when tankers sailing..... 40
- Andreeva E. V., Tezikov A. L.* Formalization of the constraint indicator of the Northern Sea Route water area..... 55
- Ksenofontov N. M., Sugak O. V.* Studying the possibility of fatigue damages formation on the gearwheels of open gear of the electric drive of the tainter gates of the Moscow canal navigation locks 63
- Kuznetsov A. L., Shcherbakova-Slyusarenko V. N., Semenov A. D.* The tendencies of the global container transport system development and sustainability 75
- Izotov O. A.* Analysis of container cargo-distribution for combined consignments shipment from the seaport..... 87

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 93

- Kuznetsov R. V.* Analytical review of domestic and foreign experience in the development and design of ship reverse gears..... 93
- Zhivljuk G. E., Petrov A. P.* The use of fuel cells in the energy supply of water transport..... 104
- Moseyko E. S., Olhovich E. O.* Assessment of ship mechanical systems reliability for arctic shipping..... 120

Volume 14. № 1

2022

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..... 129

Dorovskoy V.A., Zinchenko E.G., Chernobai K.S. Mathematical model
of random processes of automatic control systems..... 129
Trudnev S.Yu., Marchenko A.A. Development of a computer model
of a DC voltage source based on a capacitive storage device..... 140

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-7-16

THE PROBLEM OF FORECASTING VESSELS TRAJECTORIES IN THE WATER AREA

S. V. Smolentsev, D. V. Isakov, M. B. Solodovnichenko

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

The problem of assessing the navigation situation in the water area is investigated in the paper. An important aspect of this problem is the making of correct predictions of all vessels movement in the water area. The prediction of the trajectory of vessel movement can be made using the route of this vessel and its mathematical model. The parameters of the mathematical model of a particular ship and its maneuvering characteristics can be obtained from the database according to the parameters of the ship type and dimensions. But to build the correct trajectory of the vessel's movement, it is necessary to know its route. If the vessel does not transmit its route by means of AIS system, then determining the route becomes a problem. In the absence of information about the vessel route, it is proposed to build it using indirect information. Based on the information about the water area from ECDIS, a navigation graph, representing all kinds of paths along which a vessel can move through this water area safely and legitimately, is built. Then, on the resulting graph for each specific vessel, a set of possible paths from its current position in the water area can be obtained. Each of the paths is assigned a weight (probability) of the ship movement along this path. In the future, these weights are recalculated and the paths with the maximum weight are used. In accordance with the proposed algorithm for each path, a route can be constructed as a sequence of waypoints. This route can be used to predict the trajectory of vessel movement in the water area. The approach proposed in the paper can be implemented in the system of ensuring the safety of navigation both on an unmanned vessel and in the vessel tracking management system.

Keywords: prediction of the vessel movement, route of the vessel, navigation graph, assessment of the navigation situation.

For citation:

Smolentsev, Sergey V., Dmitry V. Isakov, and Mikhail V. Solodovnichenko. "The problem of forecasting vessels trajectories in the water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-7-16.

УДК 656.61.052

ПРОБЛЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ В АКВАТОРИИ

С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков, М. Б. Солодовниченко

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

В статье исследована проблема оценки навигационной ситуации в акватории. Важным аспектом этой проблемы является построение корректных прогнозов движения всех судов в акватории. Отмечается, что прогноз траектории движения судна может быть построен с использованием маршрута этого судна и его математической модели. Параметры математической модели конкретного судна и его маневренные характеристики могут быть получены из базы данных по параметрам: тип судна — размерения, но для построения корректной траектории движения судна необходимо знать его маршрут. Если судно не передает свой маршрут средствами системы АИС, то его определение представляет значительную

сложность. В случае отсутствия информации о маршруте судна его предлагается строить с использованием косвенной информации. На основе информации об акватории из ЭКДИС строится навигационный граф, представляющий всевозможные пути, по которым судно может двигаться по данной акватории безопасно, не нарушая местные правила плавания. Затем на полученном графе для каждого конкретного судна может быть получено множество возможных путей из его текущего положения в акватории, каждому из которых назначается вес (вероятность) движения судна именно по этому маршруту. В дальнейшем эти веса пересчитываются и используются пути с максимальным значением. В соответствии с предложенным в работе алгоритмом для каждого пути может быть построен маршрут в виде последовательности точек. Этот маршрут и может быть использован для построения прогноза траектории движения судна в акватории. Предложенный в статье подход может быть реализован в системе обеспечения безопасности мореплавания как на безэкипажном судне, так и в системе СУДС.

Ключевые слова: прогноз движения судна, маршрут судна, навигационный граф, оценка навигационной ситуации.

Для цитирования:

Смоленцев С. В. Проблема прогнозирования траекторий движения судов в акватории / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков, М. Б. Солодовниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-7-16.

Введение (Introduction)

Одной из основных задач при обеспечении безопасности мореплавания безэкипажных судов (БЭС) является оценка текущей навигационной обстановки, решение которой особенно актуально в районах интенсивного судоходства, узкостях и закрытых акваториях. Действия БЭС по маневрированию должны соответствовать требованиям «Международных правил предупреждения столкновения судов в море, 1972 г.» (далее — МППСС-72) [1]. Решению этих проблем посвящено множество работ, в частности проблема безопасного расхождения судов на основе МППСС-72 рассматривалась в работах [2]–[5]. Вопросы формализации МППСС-72 исследованы также в статье [6], в которой изучена проблема прогнозирования траекторий движения судов в заданной акватории. В качестве судна рассматривается судно-цель, проходящее по данной акватории.

В процессе решения задачи оценки степени опасности навигационной ситуации и принятия решения по маневрированию с целью расхождения используются прогнозы траекторий движения судов в акватории. Кроме того, решение, которое принимается системой расхождения безэкипажного судна (БЭС), представляет собой новую траекторию движения судна, которая должна обеспечить его безопасное движение относительно навигационных опасностей и других судов в акватории. Для этого необходимо использовать надежные прогнозы траекторий движения всех судов в акватории. Траектория движения каждого конкретного судна может быть построена с использованием математической модели динамики судна, например, предложенной в работах [7], [8], а также следующих данных:

- параметров модели динамики данного судна;
- информации о гидро-, метео- и навигационных условиях;
- маршрута данного судна.

Параметры модели динамики каждого конкретного судна зависят от типа судна и его размеров. Они могут быть получены из базы данных (БД) моделей судов по данным, передаваемым судами по АИС (тип, размерения). Кроме того, параметры модели для реального судна зависят от его текущего состояния: загрузки, степени обрастания корпуса, крена, дифферента и др.

Информация о навигационных условиях, оказывающих влияние на движение судна (в частности глубинах), может быть получена от ЭКДИС. Информация о гидрометеоусловиях в акватории может быть получена от сети метеостанций, которые, как правило, располагаются на объектах береговых или плавучих СНО.

Планируемый маршрут движения судна в акватории может передаваться средствами АИС, однако в настоящее время данная функция практически не используется.

В случае наличия всей указанной ранее информации и адекватных математических моделей задача прогноза траекторий движения судов в акватории решается достаточно просто. При этом точность прогноза в значительной степени зависит от точности параметров модели динамики судна и адекватного учета гидрометеороусловий в акватории. Однако недостаток информации может привести к невозможности решения задачи прогнозирования траекторий движения судов. В частности, без информации о маршрутах движения судов даже при наличии всей остальной информации корректный прогноз их траекторий на значительный период времени невозможен. Далее рассматривается проблема прогнозирования траектории движения судна в случае, если оно не передает информацию о своем маршруте. В данном случае недостаток подобной информации необходимо компенсировать информацией из других источников.

В работах [9]–[12] для построения маршрутов судов в акватории предлагается использовать ретроспективные данные, полученные от системы АИС. Такой подход возможен в системах управления движением судов (СУДС), которые могут на основе данных от системы АИС, полученных за определенный период времени, строить модель трафика в зоне своей ответственности. Однако для БЭС, которые могут находиться в различных акваториях, необходимо учитывать текущую обстановку и суда, находящиеся в данный момент времени в районе плавания.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим косвенный метод построения маршрута судна, позволяющий строить маршруты судов на основе косвенных данных с использованием интеллектуального подхода. При этом маршруты судов прогнозируются в соответствии с действиями судоводителя в данной акватории. Отсутствие прямой информации о планируемом маршруте, которую можно было бы получить от судна, компенсируется следующей информацией из других источников:

- предположения о маршруте (пункт назначения по данным АИС);
- информация о районе плавания (от ЭКДИС).

Будем считать, что судно не перемещается хаотично в акватории, а следует по своему маршруту, неизвестному системе.

Основные предположения о маршруте судна:

- маршрут *безопасный*, т. е. не пересекает границ навигационных опасностей, запретных зон и ограничивающей изобаты;
- маршрут *легитимный*, т. е. не нарушает международных правил (в частности, правил МППСС-72) и местных правил плавания;
- маршрут *осмысленный*, т. е. проходит через акваторию между узлами входа / выхода;
- маршрут *оптимальный*, т. е. длина его минимальна.

Таким образом, маршрут может быть задан множеством точек, из которых начальная и конечная принадлежат узлам входа / выхода в акваторию. Причем последовательность отрезков, соединяющих эти точки, не пересекает границ навигационных опасностей и проходит через зоны, предназначенные для плавания в соответствующем направлении. Такой маршрут будем называть *стандартным*. Подобные маршруты привязываются к типу судна и его водоизмещению (размерениям).

Следует понимать, что в акватории кроме стандартных маршрутов, удовлетворяющих приведенным ранее предположениям, могут существовать нарушающие их маршруты, по которым могут курсировать некоторые специализированные суда (например, лоцманские, бункеровщики, буксиры, паромы, земснаряды, трубоукладчики, суда, занятые ловом рыбы, и т. п.). Необходимо, чтобы система могла различать суда, к которым можно применять стандартные маршруты, а к каким нет. Для этого можно использовать тип судна и его водоизмещение (размерения), передаваемые судами по АИС.

Ключевой информацией, используемой для построения маршрутов, является *навигационная информация о районе плавания*, которую можно получить из ЭКДИС, в частности:

- узлы входа / выхода в акваторию;
- якорные стоянки;
- ограничивающая изобата;
- навигационные опасности;
- системы разделения движения (СРД);
- зоны, ограниченные или запретные для плавания;
- рекомендованные маршруты.

На основе данной информации в акватории могут быть выделены «коридоры», безопасно связывающие все узлы входа / выхода в данный район, районы входа / выхода в полосы СРД и якорные стоянки. В них будут входить полосы движения СРД и полосы вокруг рекомендованных маршрутов. Эти «коридоры» могут быть однонаправленными и двуполосными. Таким образом, в данной акватории на основе выделенных «коридоров» может быть построен связный направленный граф, представляющий собой всевозможные пути, по которым судно может двигаться по данной акватории безопасно и легитимно. Назовем такой граф *навигационным*.

Для одной акватории может быть построен набор навигационных графов для различных типов и размерений судов, поскольку для некоторых из них возможно наличие специальных маршрутов. Наличие некоторых «коридоров» и их ширина, а также маршрут могут зависеть от осадки судна. Далее будет рассмотрен один навигационный граф акватории для заданного типа судна и осадки. Все полученные результаты справедливы также для набора таких графов.

Результаты (Results)

Важным понятием в предлагаемой методике являются узлы входа в акваторию и выхода из нее. Это отрезки границы рассматриваемой акватории, через которые суда могут входить в эту акваторию и выходить из нее (рис. 1). Кроме того, в качестве узла входа / выхода можно рассматривать границу якорной стоянки. Как отмечалось ранее, любой стандартный маршрут должен быть осмысленным, т. е. начинаться и заканчиваться в одном из узлов входа/выхода в акваторию.

Для каждой пары вход / выход на навигационном графе может быть найдено оптимальное решение (задача нахождения оптимального пути на направленном графе), представляющее собой связанную последовательность «коридоров», проходящих от заданного входа к заданному выходу, минимизирующую их суммарную длину. Таким образом, для каждой акватории может быть получен навигационный граф, на основе которого построено множество оптимальных путей, связывающих любую пару узлов входа / выхода (рис. 2). Алгоритм построения множества оптимальных путей следующий:

1. Из ЭКДИС получают навигационную информацию о районе плавания.
2. На основе полученной информации строятся коридоры, связывающие узлы входа / выхода и узлы стыковки различных навигационных областей в районе плавания.
3. Строится навигационный граф, связывающий все коридоры в районе плавания. Каждое ребро графа может быть или однонаправленным, или двуполосным и иметь вес, равный протяженности соответствующего коридора.
4. На графе находят оптимальные пути, связывающие узлы входа / выхода друг с другом и минимизирующие суммарную протяженность коридоров, соответствующих данному пути.

При входе судна в акваторию для прогноза его траектории необходимо назначить этому судну некоторый путь, на основе которого можно получить непосредственно маршрут судна.

Алгоритм назначения пути судна:

1. По известным параметрам судна (типу, размерениям) из БД выбирается соответствующий навигационный граф.
2. Поскольку судно входит в акваторию через один из узлов входа / выхода, из навигационного графа выбирают множество возможных путей из этого узла во все остальные узлы входа / выхода (рис. 3).

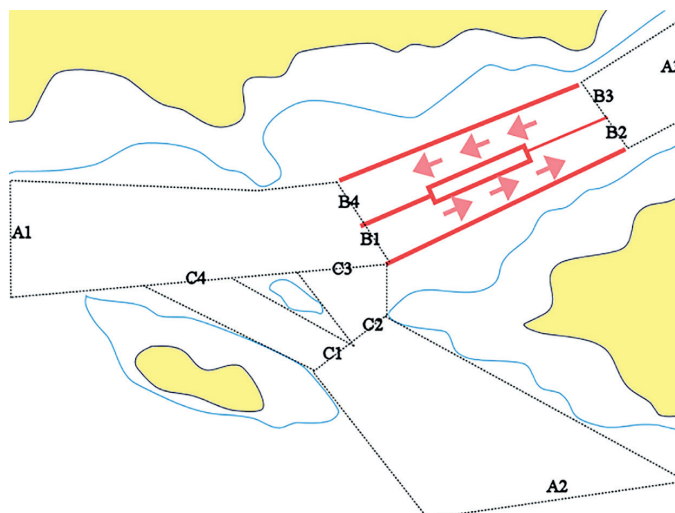


Рис. 1. Пример акватории с выделенными коридорами:
A1, A2, A3 — узлы входа / выхода,
B1–B4, C1–C4 — узлы-стыки коридоров

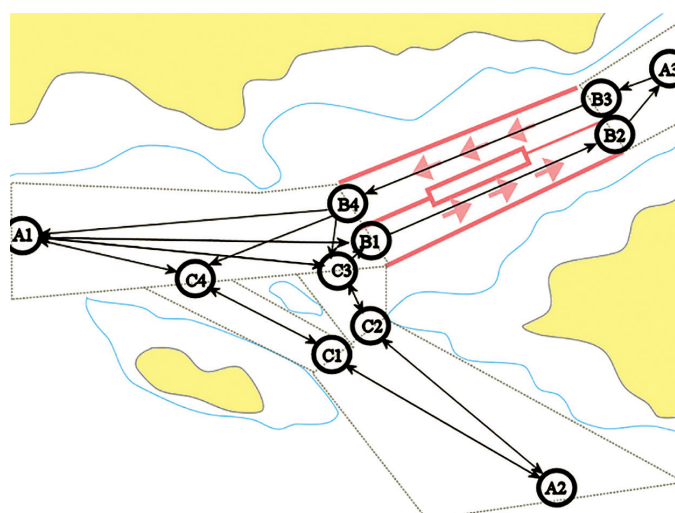


Рис. 2. Пример множества оптимальных путей на навигационном графе:

$A1 \rightarrow C4 \rightarrow C1 \rightarrow A2$
 $A1 \rightarrow B1 \rightarrow B2 \rightarrow A3$
 $A2 \rightarrow C1 \rightarrow C4 \rightarrow A1$
 $A2 \rightarrow C2 \rightarrow C3 \rightarrow B1 \rightarrow B2 \rightarrow A3$
 $A3 \rightarrow B3 \rightarrow B4 \rightarrow A1$
 $A3 \rightarrow B3 \rightarrow B4 \rightarrow C3 \rightarrow C2 \rightarrow A2$

3. Множество выбранных путей являются множеством гипотез о движении данного судна в пределах акватории. Этим гипотезам назначаются некоторые веса (например, вероятности). Первоначально веса назначаются в зависимости от параметров движения судна при входе в акваторию (направление движения судна). Например, для рис. 3, а в случае, если судно движется в направлении стыка C1, вес маршрута $A2 \rightarrow C1 \rightarrow C4 \rightarrow A1$ будет выше, чем вес маршрута $A2 \rightarrow C2 \rightarrow C3 \rightarrow B1 \rightarrow B2 \rightarrow A3$. Кроме того, начальное назначение весов маршрутов может зависеть от дополнительной информации. Например, если известно, что узел A3 ведет в порт, в котором отсутствует нефтеналивной терминал, то для судов типа «танкер» этот маршрут будет иметь меньший вес, чем веса альтернативных маршрутов. Либо, если, по данным АИС, порт назначения судна известен, то путь, ведущий в этом направлении, будет иметь максимальный вес.

4. При дальнейшем движении судна в акватории его траектория сравнивается с гипотезами и пересчитываются их веса. Например, для рис. 3, б при вхождении судна через узел $A3$ и движении между узлами $A3-B3-B4$ веса двух оптимальных путей: $A3 \rightarrow B3 \rightarrow B4 \rightarrow A1$; $A3 \rightarrow B3 \rightarrow B4 \rightarrow C3 \rightarrow C2 \rightarrow A2$, будут одинаковы (в случае отсутствия дополнительной информации). Вес возможного пути $A3 \rightarrow B3 \rightarrow B4 \rightarrow C4 \rightarrow C1 \rightarrow A2$ будет меньше (как неоптимального пути). Направление движения судна после стыка $B4$ позволяет пересчитать веса и выделить наиболее вероятный путь движения этого судна.

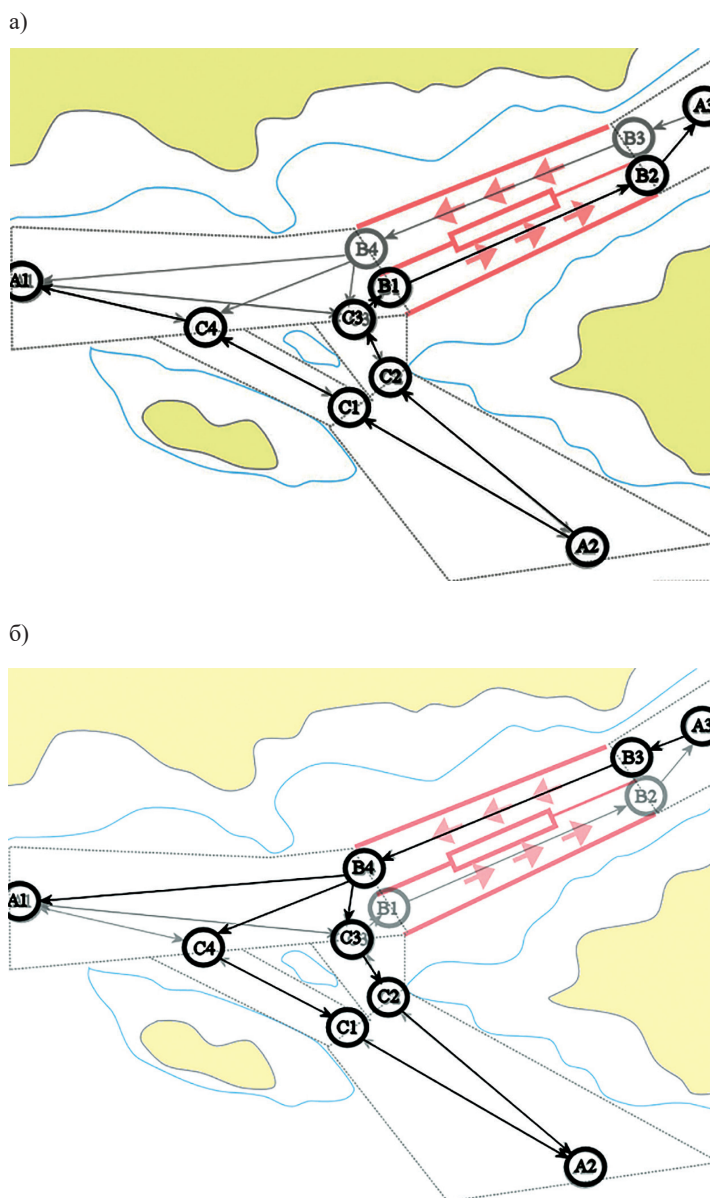


Рис. 3. Примеры возможных путей из узла $A2$ (а) и узла $A3$ (б)

Обсуждение (Discussion)

Прогноз пути судна, полученный с использованием методики, рассмотренной ранее, представляет собой путь на навигационном графе, которому соответствует связная последовательность коридоров в акватории. Для прогнозирования траектории движения судна необходимо построить маршрут судна — последовательность точек, соединенных отрезками, проходящими по этим коридорам. Узлы, соединяющие сходящиеся отрезки пути, представляют собой стыки коридоров между собой (рис. 4). Для получения собственно маршрута необходимо выбрать на этих отрезках точки, представляющие в совокупности маршрут судна.

Коридоры представляют собой области акватории, внутри которых судно может двигаться безопасно и легитимно. Форма коридора обычно представляет собой четырехугольник. Линии соединения коридоров между собой будем называть *стыками*. Осевой линией коридора будем называть прямую, проходящую через центры стыков с соседними коридорами.

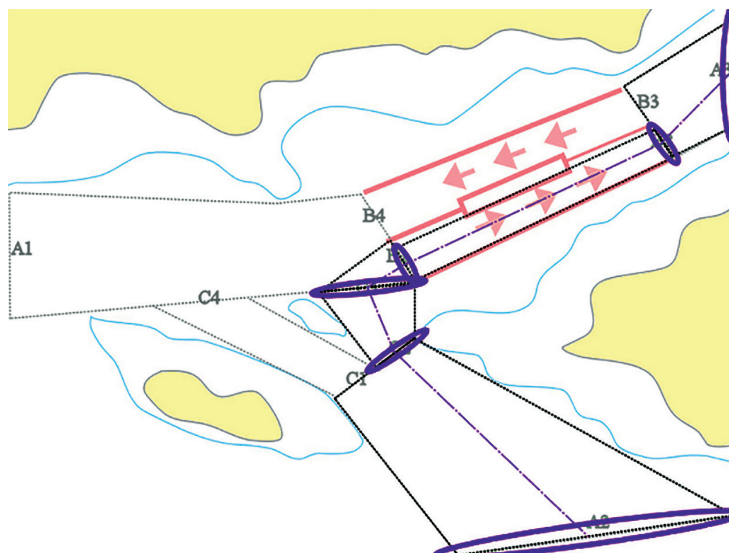


Рис. 4. Коридоры, стыки между ними, узлы входа / выхода и осевые линии коридоров

Для получения множества точек, представляющих маршрут судна, примем следующие предположения о движении судна внутри коридоров:

1. Внутри одного «коридора» движение судна происходит между его стыками с другими «коридорами» или узлом входа / выхода (для терминального «коридора») по прямой.
2. Если «коридор» двусторонний, то движение происходит правее его осевой линии.
3. Если «коридор» односторонний, то движение происходит ближе к его осевой линии.
4. Если для движения по следующему «коридору» необходимо повернуть на угол более 30° , то в случае, если это поворот вправо, маршрутная точка на стыке с ним смещается к правой границе стыка, в случае поворота влево, если оба «коридора» односторонние, маршрутная точка смещается к левой границе стыка, а если хоть один из них двусторонний — к осевой линии первого коридора справа.
5. Если «коридор» вдоль осевой линии имеет значительную протяженность (более четырех расстояний в поперечном направлении), то движение происходит преимущественно вдоль осевой линии.

6. Движение судна происходит таким образом, чтобы минимизировать количество поворотов.

На рис. 5 показан пример построения маршрута как множества маршрутных точек на основе следующей информации: начального положения судна и выбранного для него в соответствии с изложенным ранее подходом пути (последовательности движения внутри «коридоров»):

– точка 1 получена с использованием пп. 1 как пересечение известной линии движения судна со стыком C2;

- точка 2 получена с использованием пп. 2 и 4;
- точка 3 получена с использованием пп. 3 и 6;
- точка 4 получена с использованием пп. 3 и 5;
- точка 5 получена с использованием пп. 2 и 6.

Следует отметить, что поскольку маршрут судна является оценкой, основанной на неполной информации с использованием приведенных предположений, то он, конечно, не будет совпадать с неизвестным системе реальным маршрутом судна. Поэтому чем больше период прогноза

маршрута, тем менее точной является эта оценка. Таким образом, корректнее строить прогноз маршрута не как последовательность точек, определяющую ломаную линию, а как последовательность отрезков, задающую ширину полосы, в пределах которой может находиться прогнозируемый маршрут (рис. 6).

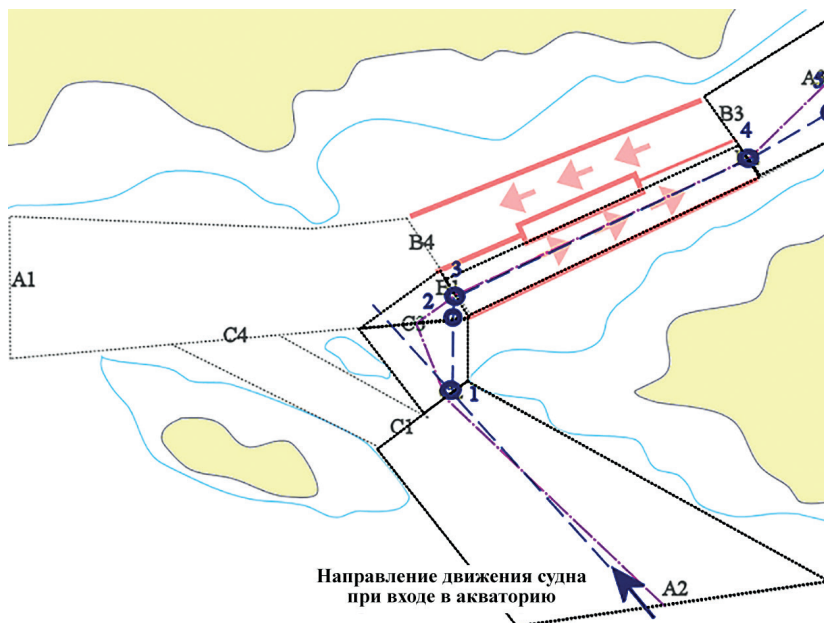


Рис. 5. Пример построения множества маршрутных точек

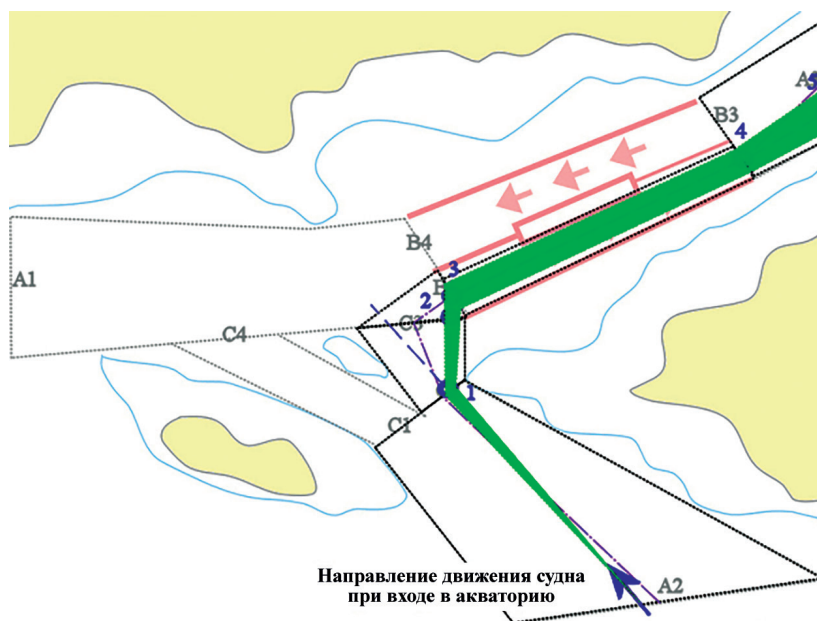


Рис. 6. Оценка маршрута как полосы возможного движения судна

Для решения задачи оценки безопасности необходимо использовать прогноз траектории движения судна как некоторой линии. В этом случае система должна принимать решения, выполненные следующим образом:

1. Строить оценку маршрута судна в соответствии с ранее приведенными принципами как последовательность отрезков, задающих полосу с переменной шириной.
2. Строить прогноз траектории движения судна для средней линии этого маршрута.

3. При оценке опасности данной траектории к значению дистанции опасного сближения добавлять половину ширины полосы прогноза маршрута в соответствующем месте. Тем самым будут учтены возможные отклонения реального маршрута от его прогноза.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный в данной работе подход позволяет строить маршрут судна-цели для использования его при построении прогноза движения этого судна.
2. Прогнозы движения всех судов в акватории необходимы для корректной оценки складывающейся навигационной ситуации.
3. Оценка маршрута судна-цели косвенным методом актуальна, поскольку несмотря на то, что в системе АИС предусмотрена функция передачи судами своих маршрутов, они этого не делают.
4. Предложенный подход может использоваться как в системах безопасного расхождения судов на безэкипажных судах, так и в системах управления СУДС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72). — 5-е изд. — М.: Моркнига, 2011. — 142 с.
2. *Johansen T. A.* Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment / T. A. Johansen, T. Perez, A. Cristofaro // IEEE transactions on intelligent transportation systems. — 2016. — Vol. 17. — Is. 12. — Pp. 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780.
3. *Woerner K. L.* Collision avoidance road test for colregs-constrained autonomous vehicles / K. L. Woerner, M. R. Benjamin, M. Novitzky, J. J. Leonard // OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. — IEEE, 2016. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761413.
4. *Смоленцев С. В.* Формализация задачи расхождения судов в море на основе теории мультиагентной системы / С. В. Смоленцев // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 2 (64). — С. 19–24.
5. *Каретников В. В.* К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории / В. В. Каретников, С. В. Козик, А. А. Буганец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.
6. *Цымбал Н. Н.* Формализация МППСС-72 в части координации взаимодействия судов при расхождении / Н. Н. Цымбал, Р. Ю. Бужбецкий // Судовождение. — 2006. — № 12. — С. 124–129.
7. *Смоленцев С. В.* Моделирование движения судна на основе упрощенной кинематической модели / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1111–1121. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1111-1121.
8. *Смоленцев С. В.* Простая аналитическая модель движения судна / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.
9. *Гриняк В. М.* Планирование маршрутов судов на основе кластеризации ретроспективных данных трафика акватории / В. М. Гриняк // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 61–78. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2021-2/061-078.
10. *Гриняк В. М.* Оценка опасности трафика морской акватории по данным автоматической идентификационной системы / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, В. И. Люлько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 681–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690.
11. *Naus K.* Drafting route plan templates for ships on the basis of AIS historical data / K. Naus // The Journal of Navigation. — 2020. — Vol. 73. — Is. 3. — Pp. 726–745. DOI: 10.1017/S0373463319000948.
12. *Wang L.* Use of AIS data for performance evaluation of ship traffic with speed control / L. Wang, Y. Li, Z. Wan, Z. Yang, T. Wang, K. Guan, L. Fu // Ocean Engineering. — 2020. — Vol. 204. — Pp. 107259. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107259.

REFERENCES

1. *International Rules of Preventing Collision at Sea: COLREGS*. 5 ed. M.: Morkniga, 2011.
2. Johansen, Tor Arne, Tristan Perez, and Andrea Cristofaro. "Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment." *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 17.12 (2016): 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780.
3. Woerner, Kyle L., Michael R. Benjamin, Michael Novitzky, and John J. Leonard. "Collision avoidance road test for colregs-constrained autonomous vehicles." *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*. IEEE, 2016. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761413.
4. Smolentsev, S. V. "Formalization of the ships' collision avoidance at sea on the basis of MAS theory." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(64) (2011): 19–24.
5. Karetnikov, Vladimir V., Sergey V. Kozik, and Artem A. Butsanets. "Risks assessment of applying unmanned means of water transport in the water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.
6. Tsymbal, N. N., and R. Yu. Buzhetskii. "Formalizatsiya MPPSS-72 v chasti koordinatsii vzaimodeistviya sudov pri rashkhozhenii." *Sudovozhdenie* 12 (2006): 124–129.
7. Smolentsev, Sergey V., and Dmitry V. Isakov. "Simulation of ship movement based on a simplified kinematic model." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1111–1121. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1111-1121.
8. Smolentsev, Sergey V., and Dmitry V. Isakov. "A simple analytical model of ship movement." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.
9. Grinyak, V.M. "Vessel route planning based on traffic historical data clustering." *Vestnik VGUES* 13.2 (2021): 61–78. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2021-2/061-078.
10. Grinyak, Victor M., Alexander S. Devyatisilnyi, and Victor I. Lulko. "Use of automatic identification system data for estimation of marine traffic safety." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 681–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690.
11. Naus, Krzysztof. "Drafting route plan templates for ships on the basis of AIS historical data." *The Journal of Navigation* 73.3 (2020): 726–745. DOI: 10.1017/S0373463319000948.
12. Likun Wang, Yang Li, Zheng Wan, Zaili Yang, Tong Wang, Keping Guan, and Lei Fu. "Use of AIS data for performance evaluation of ship traffic with speed control." *Ocean Engineering* 204 (2020): 107259. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107259.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смоленцев Сергей Викторович — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru
Исаков Дмитрий Владимирович — доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru
Солодовниченко Михаил Борисович — кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: solodovnichenkomb@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smolentsev, Sergey V. — Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru
Isakov, Dmitry V. — associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru
Solodovnichenko, Mikhail V. — PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: solodovnichenkomb@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2021 г.
Received: December 10, 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-17-24

A MODEL OF VESSEL MOTION FOR DEAD RECKONING

V. V. Deryabin

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

A 4-DOF vessel motion model for dead reckoning purposes is developed. The model is based on a system of nonlinear equations of vessel motion in calm water derived for the SI75 container ship. The model additionally contains wind and wave influences. Wind is assumed to be constant for the velocity and direction. Waves are modelled as wind waves and irregular and assumed to be long-crested. Their direction equals wind direction. Only second-order wave disturbances (wave drift) are taken into account. They are determined on the basis of coefficients calculated by means of hydrodynamic software for ideal fluid. The model is programmed in the Scilab. Parameters of turning ability are determined and compared then with normative values governed by the IMO. A symmetric property test is proposed to validate the adequacy of the model. This algorithm supposes that sequences of rudder deflection, initial heading and true wind direction values are initially formed. The true wind direction and initial heading values may be of the same or reciprocal direction, or create an angle of 90 degrees. Inserted cycles for the elements of the above sequences are carried out, and matrices of end-of-time coordinates for each maneuver are calculated. Some of the matrices are transformed, and symmetric property conditions are formulated in a matrix form. The influence of time step value on a model output is studied. The maximum value of the distance between appropriate points of the trajectories during a maneuver is a criterion of their difference.

Keywords: vessel track dead reckoning, vessel motion model, differential equations, symmetric property test, Scilab.

For citation:

Deryabin, Victor V. "A model of vessel motion for dead reckoning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 17–24. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-17-24.

УДК 656.61.052:527.61

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ДЛЯ СЧИСЛЕНИЯ ПУТИ

В. В. Дерябин

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

Разработана модель движения судна с четырьмя степенями свободы, позволяющая решить задачу определения координат судна в режиме счисления пути. Модель, основанная на нелинейных уравнениях движения судна в условиях тихой воды, составленных для контейнеровоза SI75, дополнительно учитывает воздействия со стороны ветра и волнения. Ветер моделируется постоянным по скорости и направлению, волнение — как ветровое и нерегулярное с длинными гребнями, направление которого совпадает с направлением ветра. Учитываются только составляющие волновых воздействий второго порядка (волновой дрейф), определяемые на основе данных в виде коэффициентов, полученных с использованием гидродинамических программ для идеальной жидкости. Модель реализована в среде разработки Scilab. Для проверки адекватности ее работы определялись характеристики поворотливости, которые затем сравнивались с нормативными значениями, установленными ИМО. Предложен тест симметричности модели движения, позволяющий судить о ее адекватности. Алгоритм тестирования симметричности предполагает формирование последовательностей значений угла перекладки руля, начального курса судна и направления истинного ветра. Направление ветра и начальный курс могут либо совпадать, либо быть противоположно направленными, либо образовывать угол 90°. По элементам указанных последовательностей организуются вложенные циклы, на каждой итерации которых формируются матрицы координат судна на момент окончания маневра. Над некоторыми матрицами выполняются преобразования и формулируются условия в матричной форме, соответствующие симметричности маневров. Исследована зависимость результата

работы модели от временного шага дискретизации. Критерием различия расчетных траекторий является наибольшее значение модуля невязки между ними в течение периода плавания.

Ключевые слова: счисление пути судна, модель движения судна, дифференциальные уравнения, тест симметричности, Scilab.

Для цитирования:

Дерябин В. В. Модель движения судна для счисления пути / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 17–24. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-17-24.

Введение (Introduction)

В процессе разработки новых алгоритмов счисления, основанных, например, на использовании теории нейронных сетей [1]–[3] или нечетких множеств, всегда возникает задача моделирования движения судна для получения необходимого набора учебных данных, а также для проверки работоспособности предлагаемых алгоритмов. Для задач обучения нейронных сетей и гибридных нейро-нечетких систем необходима модель, которая, с одной стороны, работает достаточно быстро для того, чтобы получить необходимое количество учебных образцов в пределах разумного периода времени, а с другой стороны, наряду с быстродействием модель также должна обладать удовлетворительным уровнем адекватности и учитывать основные закономерности движения судна.

Развитие вычислительной техники в последние десятилетия определило формирование методов вычислительной гидродинамики (CFD — Computational Fluid Dynamics) в области решения задач моделирования движения судна. Одной из популярных задач CFD является решение уравнений Навье — Стокса для различных условий плавания, включающих граничные условия и модели турбулентности. Решение задач CFD выполняется при помощи специальных программ (например, FLOW-3D, SHIPFLOW, NUMECA, OpenFOAM и др.). Основным недостатком CFD-технологий является чрезмерная требовательность к вычислительным ресурсам, что делает их малоприменимыми для получения больших наборов учебных данных, характеризующих длительное плавание судна в различных условиях. Более быстрые решения получаются с использованием численных методов, основанных на теории идеальной жидкости, использующей понятие *потенциала скорости*. Среди программных продуктов, реализующих данные алгоритмы, известны WAMIT, ShipX (Veres), SEAWAY и др. Тем не менее такие расчеты также требуют значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет их применение для решения задач формирования необходимого набора учебных данных.

Одним из вариантов решения проблемы ресурсоемких вычислений для каждого момента времени является использование амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик качки судна, которые определяются заранее на основе расчетов гидродинамических программ. Такой подход предлагается, например, в работах [4]–[6]. При этом построенные на основе таких характеристик модели, как правило, учитывают либо слишком много, либо слишком мало степеней свободы и факторов, поэтому модели счисления для формирования больших наборов данных, готовой к использованию, как таковой нет. Существует также отечественные исследования, посвященные разработке математической модели движения судна в условиях волнения (см., например, [7], [8]), но они также не в полной мере соответствуют заявленным требованиям.

В рамках настоящего исследования выполнен синтез математической модели движения маневрирующего судна в условиях ветра и волнения, которая соответствует задаче получения больших объемов учебных данных в приемлемый период времени вычислений при сохранении достаточного уровня адекватности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Уравнения движения судна. В качестве основы была выбрана нелинейная модель контейнеровоза S175, включающая систему уравнений [9]:

$$\begin{aligned}(m + m_x) \frac{dV_x}{dt} - (m + m_y) V_y r &= X; \\ (m + m_y) \frac{dV_y}{dt} + (m + m_x) V_x r + m_y \alpha_y \dot{r} - m_y l_y \ddot{\theta} &= Y; \\ (I_z + I_{zz}) \dot{r} + m_y \alpha_y \dot{V}_y &= N - Y x_G; \\ (I_x + I_{xx}) \ddot{\theta} - m_y l_y \dot{V}_y - m_x l_x V_x r + mgh\theta &= K,\end{aligned}\tag{1}$$

где X, Y, N, K — соответствующие силы и моменты; V_x, V_y — продольная и поперечная составляющие относительной скорости судна; r — угловая скорость поворота вокруг вертикальной оси; m — масса судна; m_x, m_y — присоединенные массы; I_x, I_z — моменты инерции вокруг продольной и вертикальной осей соответственно; I_{xx}, I_{zz} — присоединенные моменты инерции; x_G — абсцисса центра масс судна; α_y — абсцисса присоединенной массы m_x ; l_x — аппликата присоединенной массы m_x ; l_y — аппликата присоединенной массы m_y ; θ — угол крена; h — метацентрическая высота, g — ускорение свободного падения.

Силы и моменты в уравнениях (1) включают в общем случае все воздействия, за исключением гидродинамических сил инерционной природы, которые фигурируют в левых частях уравнений. Кинематические уравнения используются для движения судна в плоскости, касательной к поверхности эллипсоида или геоида при условии адекватной аппроксимации его поверхности (см., например, [10]).

Силовые воздействия со стороны ветра были включены в силы X, Y и момент N в соответствии с работой [11]. Силовые воздействия со стороны волнения учитывались только для сил второго порядка (сил волнового дрейфа) в соответствии формулой [5]:

$$\tau_2^{\text{dof}} = \sum_{k=1}^{N_\omega} \rho g |F_2^{\text{dof}}(\omega_k, \beta)| 2S(\omega_k) \Delta\omega,\tag{2}$$

где $S = S(\omega_k)$ — спектральная плотность нерегулярного волнения; ω — кажущаяся круговая частота волнения; β — курсовой угол волнения; ρ — плотность морской воды; N_ω — количество частот, в которых вычисляются дискретные значения спектральной плотности $S(\omega_k)$; dof = 1, 2, 6 — индексы степени свободы (продольные, поперечные силы и момент вокруг вертикальной оси); $|F_2^{\text{dof}}(\omega_k, \beta)|$ — амплитуда передаточной функции сил волнового дрейфа, определяемая на основе расчетов программ численной гидродинамики.

Используемая модель нерегулярного волнения с прямыми гребнями волн (Long-Crested Waves), возможно, в большей степени соответствует относительно постоянным значениям сил волнового дрейфа, чем модель с короткими гребнями волн (Short-Crested Waves), так как по формуле (2) определяются, как правило, усредненные воздействия. Более того, модель с короткими гребнями требует больше времени для расчетов, так как для каждого значения частоты ω_k добавляется еще внутренняя сумма по случайным курсовым углам, отличающимся от генерального курсового угла.

В качестве спектра волнения используется спектр Пирсона – Московича:

$$S(\omega) = 0,0081 g^2 \omega^{-5} \exp \left[-0,74 (\omega V_{tr} / g)^{-4} \right],\tag{3}$$

где V_{tr} — скорость истинного ветра на высоте 19,5 м.

Связь между значительной высотой волнения $h_{1/3}$ и V_{tr} устанавливается по известной формуле

$$h_{1/3} = (2,06 / g^2) V_{tr}^2,\tag{4}$$

основанной на экспериментальных данных.

Программная реализация модели движения судна. За основу была взята MSS-toolbox, разработанная для реализации в MATLAB (Т. I. Fossen and T. Perez (2004). Marine Systems Simulator (MSS) URL: <https://github.com/cybergalactic/MSS>). Инструмент включает набор *m*-скриптов, файлов SIMULINK, а также документацию по их использованию. В рамках текущего исследования

использовались следующие файлы MSS-toolbox: container.m, blendermann94.m, S175.mat (включает амплитуды передаточной функции для определения сил волнового дрейфа). Файлы, содержащие *m*-код, были преобразованы в код, запускаемый в среде моделирования Scilab (v. 6.1.1), используемой в дальнейшем. Самостоятельно были разработаны функции, вычисляющие силы волнового дрейфа и значения спектра волнения по формуле (3).

Выход функции blendermann94.m дает значения сил в системе единиц СИ, а выражения для сил в функции container.m составлены в безразмерном виде. В связи с этим полученные силовые воздействия со стороны ветра были поделены на величину $0,5\rho U^2 L^2$, где $U^2 = V_x^2 + V_y^2$ — квадрат модуля относительной скорости судна в горизонтальной плоскости; L — длина судна. Момент ветровых воздействий вокруг вертикальной оси был поделен на величину $0,5\rho U^2 L^3$. Аналогичные процедуры были выполнены в отношении воздействий со стороны волнения.

Амплитуды волнового дрейфа $|F_2^{\text{dof}}(\omega_k, \beta)|$ представлены в виде поля структуры vessel.driftrc.amp, а соответствующие им частоты — в виде vessel.driftrc.w. При использовании амплитуд vessel.driftrc.amp следует учитывать, что они уже умножены на величину ρg , т. е. при реализации соотношений (2) операцию умножения на ρg выполнять не нужно. Иными словами, $\rho g \equiv 1$ в соотношениях (2).

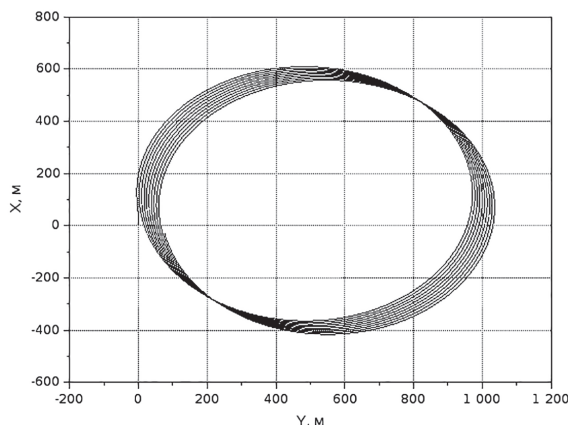
В качестве алгоритма численного интегрирования был использован метод Рунге – Кутты четвертого порядка точности. Временная дискретность модели составляет 0,1 с.

Проверка адекватности модели. Для проверки адекватности синтезированной модели были предприняты следующие действия.

Во-первых, рассматривался маневр набора скорости от нуля с частотой вращения винта 118,64 об/мин. Скорость истинного ветра равна нулю. Начальный курс 0. Наибольшее значение скорости составило 23,94 уз, а по данным [9], число Фруда при заданных оборотах должно составлять 0,3, т. е. 24,16 уз. При этом остальные две составляющие скорости равны нулю в течение всего времени плавания (один час). Незначительное различие вызвано, по-видимому, учетом влияния ветра в модели.

Во-вторых, рассматривался маневр циркуляции судна с метацентрической высотой 0,3; 0,5 и 3 м. Начальная скорость соответствует максимальной при оборотах 118,64 об/мин на тихой воде. Угол перекаладки руля составляет 15° на правый борт. По результатам визуальной оценки траектории кривых циркуляции совпадают с приведенными в [9] с точностью ± 100 м.

В-третьих, были определены некоторые маневренные характеристики судов в соответствии с Резолюцией ИМО MSC.137(76). В качестве тестовой скорости была выбрана скорость, которую развивает судно при частоте вращения винта, равной 118,64 об/мин. При циркуляции с переложением на правый борт рулем (35°) были получены следующие значения: выдвиг — 2,6 длины корпуса; тактический диаметр — 3,4 длины корпуса, что соответствует требованиям данной резолюции. Также был проведен тест начальной поворотливости. При перекаладке руля на 10° судно прошло 1,0 длину корпуса за время до отклонения от первоначального курса на 10° , что также соответствует требованиям ИМО. Таким образом, модель удовлетворяет международным требованиям в плане поворотливости.



Влияние волнения на траекторию движения судна

В-четвертых, была проведена качественная оценка работы блока волнения. На основе приведенного на рисунке (с. 20) сравнения траекторий движения судна в течение часа с отключенным и работающим блоком расчета волновых воздействий (ветровые воздействия не учитываются, направление бега волн с Севера на Юг) можно сделать вывод о том, что влияние сил второго порядка не противоречит реальному положению дел (судно сносит по направлению бега волн).

Результаты (Results)

Был проведен тест симметричности в условиях влияния ветра и волнения, алгоритм проведения которого заключается в следующем:

1. Задаются последовательности значений угла перекладки руля $\{\Delta\}_{i=3} = \{-35 \quad 0 \quad +35^\circ\}$, начальных курсов $\{K\}_{j=4} = \{0 \quad 90 \quad 180 \quad 270^\circ\}$, направлений истинного ветра $\{K_{tr}\}_{k=4} = \{0 \quad 90 \quad 180 \quad 270^\circ\}$, а также время плавания на циркуляции $T_{\max}$.

2. По элементам указанных в пп. 1 трех последовательностей организуются вложенные циклы, на каждой итерации которых заполняются следующие матрицы: $X_+(i, j)$ — матрица абсцисс центра тяжести судна на последний момент времени плавания $T_{\max}$ при циркуляции на правый борт; $Y_+(i, j)$ — матрица ординат судна на последний момент времени при циркуляции на правый борт; $X_-(i, j), Y_-(i, j)$ — аналогичные матрицы для случая циркуляции в сторону левого борта; $X_0(i, j), Y_0(i, j)$ — матрицы для случая руля в диаметральной плоскости. Например, $Y_-(i, j) = 100$ м означает, что на момент времени $T_{\max}$ в процессе циркуляции на левый борт судно находилось на расстоянии, равном 100 м справа от оси абсцисс.

3. Определяются вспомогательные матрицы $\tilde{X}_+$ и $\tilde{X}_-$. Элементы матрицы $\tilde{X}_+$ задаются следующим образом:

$$\begin{aligned}\tilde{X}_+(2,1) &= X_+(1,4); \tilde{X}_+(1,4) = -X_+(2,1); \\ \tilde{X}_+(2,2) &= X_+(1,1); \tilde{X}_+(1,1) = -X_+(2,2); \\ &\dots \\ \tilde{X}_+(2,4) &= X_+(1,3); \tilde{X}_+(1,3) = -X_+(2,4); \\ \tilde{X}_+(4,1) &= X_+(3,4); \tilde{X}_+(3,4) = -X_+(4,1); \\ \tilde{X}_+(4,2) &= X_+(3,1); \tilde{X}_+(3,1) = -X_+(4,2); \\ &\dots \\ \tilde{X}_+(4,4) &= X_+(3,3); \tilde{X}_+(3,3) = -X_+(4,4).\end{aligned}$$

Аналогично задаются элементы матрицы $\tilde{X}_-$.

4. Определяются наибольшие значения модулей элементов матриц $\tilde{X}_+ - Y_+$, $\tilde{X}_0 - Y_0$ и $\tilde{X}_- - Y_-$, которые в идеальном случае равны нулю. Отклонение от нуля является характеристикой несимметричности, выраженной в единицах длины на момент времени окончания циркуляции $T_{\max}$.

Тест несимметричности был проведен для $T_{\max} = 1$ ч плавания. Скорость истинного ветра составляла 15 м/с, значительная высота волнения определялась в соответствии с выражением (4). Наибольшие модули элементов матриц, указанных в пп. 3, составили ноль (округление координат до 0,1 м), что свидетельствует о том, что симметричность модели обеспечена. Матрица X_+ в качестве примера представлена в форме табл. 1. При проведении теста набор случайных частот используется один и тот же, в противном случае заведомо не будет обеспечена симметричность.

Таблица 1

Матрица X_+ (абсциссы, м)

Начальный курс, °	Направление ветра, °			
	0	90	180	270
0	-518,7	154,3	693,1	21,6
90	-606,7	66,8	605,9	-67,4
180	-693,1	-21,6	518,7	-154,3
270	-605,9	67,4	606,7	-66,8

Таким образом, исходя из сохранения симметричности, существует определенная степень уверенности в адекватности разработанной модели. Модель зависит от множества параметров, важнейшим из которых является временной шаг модели. Очевидно, что указанный параметр оказывает влияние как на точность, так и на быстродействие программы, реализующей алгоритм модели.

Исследуем зависимость точности модели от Δt . В качестве тестовой ситуации рассмотрим циркуляцию с углом перекладки руля $+15^\circ$ в условиях северного ветра скоростью 15 м/с при начальной скорости судна 22,6 уз. Запустим модель несколько раз для $T_{\max} = 1$ ч с различными значениями Δt (табл. 2).

Таблица 2

Невязки между траекториями при различном шаге модели Δt

Δt , с	0,01	0,05	0,1	0,2	0,5	1
0,01	0	8,8	18,8	38,5	109,2	226,7

Обсуждение (Discussion)

Разработанная модель движения судна может использоваться для получения координат судна, осуществляющего плавание в режиме счисления. Причем счисление понимается в широком смысле: это не только учет дрейфа судна, но и прогнозирование продольной и угловой скорости судна, так называемое *аварийное счисление*, актуальное при выходе из строя лага и / или гирокомпаса. Модель учитывает силы, действующие на судно со стороны ветра и волнения. При этом учитываются только силы второго порядка, т. е. силы волнового дрейфа, а высокочастотные составляющие первого порядка (силы Крылова – Фруда и дифракционные силы) не учитываются, что логично, так как при таком подходе отсутствует необходимость использования фильтрации волнового рыскания судна.

Для проверки адекватности был выполнен ряд мероприятий, включающих расчет некоторых маневренных характеристик и сравнение их с нормативными значениями ИМО, а также тест симметричности. Полученные результаты которых свидетельствуют об адекватности модели. Тест симметричности использует матричную интерпретацию, что удобно при организации тестирования в таких средах моделирования, как MATLAB, Scilab и др. Также для проверки адекватности использовались результаты, полученные ранее другими авторами.

На основе результатов расчетов при работе модели с различным значением временного шага можно сделать вывод о том, что указанная величина является критичной для реализации модели движения судна. С одной стороны, большие значения шага позволяют ускорить моделирование, обеспечивая возможностью получения больших объемов данных за сравнительно малый период времени вычислений, а с другой, значения шага дискретизации должны быть также достаточно малы, чтобы обеспечить необходимое качество моделирования в смысле адекватности. Результаты, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что шаг 0,1 с является вполне пригодным для использования в модели с точки зрения компромисса между адекватностью и объемом вычислений.

Заключение (Conclusion)

Предложена модель движения судна с четырьмя степенями свободы. При ее разработке ставилось условие, в соответствии с которым она должна не быть требовательной к вычислительным ресурсам, но в то же время обеспечивать необходимый уровень адекватности. Модель учитывает влияние сил со стороны ветра и волнения. Силы волнения учитываются только в смысле составляющих второго порядка (волновой дрейф), высокочастотные компоненты первого порядка не учитываются, что допускается для задачи моделирования счисления пути судна. Последнее понимается в более широком смысле (не только расчет скорости дрейфа), когда возникает необходимость определения продольной составляющей относительной скорости и угловой скорости поворота (аварийные режимы). Модель реализована в среде разработки Scilab на основе некоторых функций и файлов из MSS-toolbox.

Для проверки адекватности модели проводились тесты соответствия требованиям ИМО в плане поворотливости. Был предложен тест проверки модели на симметричность, включающий

условия соответствия на основе теории матриц. Такая формализация удобна для использования в средах моделирования наподобие MATLAB, Scilab и др. Было проведено исследование зависимости результата работы алгоритма модели от временного шага дискретизации. На основе сравнения траекторий для рассмотренных значений шага можно сделать вывод, что дискретность 0,1 с является приемлемой для моделирования, так как отличия полученного результата от результатов, соответствующих меньшей дискретности, незначительны.

Перспективой дальнейших исследований является совершенствование модели в плане повышения адекватности и уменьшение реализующей ее вычислительной сложности алгоритма. Полезным может быть также совершенствование моделирования гидрометеорологической обстановки, учитывающей не только нерегулярность волнения, но и характер поведения ветра и наличие волн зыби. Возможно, также будет целесообразным использование кинематических уравнений движения судна на поверхности эллипсоида вместо уравнений на плоскости. Отдельного внимания заслуживают исследования сходимости алгоритмов численного интегрирования, входящие в состав модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дерябин В. В. Обобщенная нейросетевая модель счисления пути судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 423–435. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-423-435.
2. Deryabin V. V. Neural Networks Based Prediction Model for Vessel Track Control / V. V. Deryabin // Automatic Control and Computer Sciences. — 2019. — Vol. 53. — Is. 6. — Pp. 502–510. DOI: 10.3103/S0146411619060038.
3. Skulstad R. Dead Reckoning of Dynamically Positioned Ships: Using an Efficient Recurrent Neural Network / R. Skulstad, G. Li, T. I. Fossen, B. Vik, H. Zhang // IEEE Robotics & Automation Magazine. — 2019. — Vol. 26. — Is. 3. — Pp. 39–51. DOI: 10.1109/MRA.2019.2918125.
4. Bielicki S. Prediction of ship motions in irregular waves based on response amplitude operators evaluated experimentally in noise waves / S. Bielicki // Polish Maritime Research. — 2021. — Vol. 28. — Is. 1. — Pp. 16–27. DOI: 10.2478/pomr-2021-0002.
5. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control / T. I. Fossen. — 2nd edition. — Hoboken, NJ: Wiley, 2021. — 736 p.
6. Skandali D. Calibration of response amplitude operators based on measurements of vessel motions and directional wave spectra / D. Skandali, E. Lourens, R. H. M. Ogink // Marine Structures. — 2020. — Vol. 72. — Pp. 102774. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102774.
7. Таранов А. Е. Численное моделирование динамики судна в задачах управляемости и качки / А. Е. Таранов, А. Э. Блищик // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 2 (384). — С. 29–38. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-29-38.
8. Ваганов А. Б. Динамика маневрирующего судна в условиях волнения моря / А. Б. Ваганов, И. Д. Краснокутский // Транспортные системы. — 2018. — № 1 (7). — С. 25–38. DOI: 10.46960/62045_2018_1_25.
9. Son K. On the coupled motion of steering and rolling of a high speed container ship / K. Son, K. Nomoto // Journal of the Society of Naval Architects of Japan. — 1981. — Vol. 1981. — Is. 150. — Pp. 232–244. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1981.150_232.
10. 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.
11. Blendermann W. Parameter identification of wind loads on ships / W. Blendermann // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 1994. — Vol. 51. — Is. 3. — Pp. 339–351.

REFERENCES

1. Deryabin, Victor V. "A generalized model of a vessel dead reckoning based on neural networks." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 423–435. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-423-435.

2. Deryabin, Victor Vladimirovich. "Neural Networks Based Prediction Model for Vessel Track Control." *Automatic Control and Computer Sciences* 53.6 (2019): 502–510. DOI: 10.3103/S0146411619060038.
3. Skulstad, Robert, Guoyuan Li, Thor I. Fossen, Bjornar Vik, and Houxiang Zhang. "Dead reckoning of dynamically positioned ships: Using an efficient recurrent neural network." *IEEE Robotics & Automation Magazine* 26.3 (2019): 39–51. DOI: 10.1109/MRA.2019.2918125.
4. Bielicki, Sebastian. "Prediction of ship motions in irregular waves based on response amplitude operators evaluated experimentally in noise waves." *Polish Maritime Research* 28.1 (2021): 16–27. DOI: 10.2478/pomr-2021-0002.
5. Fossen, Thor I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. 2nd edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2021.
6. Skandali, D., E. Lourens, and R.H.M. Ogink. "Calibration of response amplitude operators based on measurements of vessel motions and directional wave spectra." *Marine Structures* 72 (2020): 102774. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102774.
7. Taranov, Andrey Ye., and Artem E. Blishchik. "Numerical simulation of ship dynamics in terms of maneuverability and motions." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 2(384) (2018): 29–38. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-29-38.
8. Vaganov, A.B., and I. D. Krasnokutskii. "Dinamika manevriruyushchego sudna v usloviyakh volneniya moray." *Transportnye sistemy* 1(7) (2018): 25–38. DOI: 10.46960/62045_2018_1_25.
9. Son, Kyoungcho, and Kensaku Nomoto. "On the coupled motion of steering and rolling of a high speed container ship." *Journal of the Society of Naval Architects of Japan* 1981.150 (1981): 232–244. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1981.150_232.
10. Yuyukin, Igor V. "Geoid approximation by spline functions methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.2 (2020): 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.
11. Blendermann, Werner. "Parameter identification of wind loads on ships." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 51.3 (1994): 339–351.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дерябин Виктор Владимирович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Deryabin, Victor V. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2021 г.
Received: December 6, 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39

SPLINE SYNTHESIS OF THE CHARTED REFERENCE OF THE FIELD INFORMATIVITY IN MISSION OF CORRELATION-EXTREME NAVIGATION

I. V. Yuyukin

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

The paper focuses on the understanding of informativity as a measure that determines the effectiveness of using the geophysical field to obtain a position fixing. The factology of map-aided navigation is revealed as a sequence of instantaneous comparison of navigation measurements with the standard of informativity of field stored in the memory of the on-board computer. Correlation-extreme navigation is synchronized with the parallel task of organizing an informative path as the best optimal trajectory of movement in three-dimensional space when following a marine mobile object in a given direction, taking into account restrictive obstacles. An explanation of the understanding of innovative navigation as a “binding” of measurements to a standard based on the search for the global extremum of the functional of correlational comparison of the measured fragment with the informativity of the geophysical field chart is given. The navigation process is interpreted into an extreme task of route planning as a tactical spline method of the roadmap in a conflict environment, taking into account the factor of avoiding navigational hazards. The assumption on developing the technology of correlation-extreme navigation using the methods of spline functions as a realization of the practical navigability of a perspective concept in the full scope of the progressive capabilities of an autonomous project is made. In the development of the idea of correlation-extreme navigation, a three-dimensional synthesis of a geophysical field fragment based on reproduced digital values from an isolines contour chart is implemented to create a hybrid B-spline approximation of a possible reference standard of informativity. The disadvantages of traditional methods of processing navigation information in the project of correlation-extreme navigation are analyzed. It is noted that the spline algorithm is mathematically devoid of the «curse of dimensionality» phenomenon as the main difficulty in achieving the speed of computational implementations of alternative methods of nonlinear filtering. The hypothesis of the possibility of using the proposed approach as a mathematical support for the future automated navigation system with artificial intelligence within the framework of the unmanned navigation concept in accordance with the e-Navigation project is put forward.

Keywords: informativity, map-aided navigation, informative path, optimal trajectory, the spline method of the roadmap, navigability, «the curse of dimensionality».

For citation:

Yuyukin, Igor V. “Spline synthesis of the charted reference of the field informativity in mission of correlation-extreme navigation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.

УДК 656.61.052 656

СПЛАЙНОВОЕ СИНТЕЗИРОВАНИЕ КАРТОГРАФИРОВАННОГО ЭТАЛОНА ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОЛЯ В ЗАДАЧЕ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

И. В. Ююкин

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

В работе акцентировано внимание на понимании информативности как меры, определяющей эффективность использования геофизического поля для получения обсервации. Раскрыта фактология навигации с коррекцией по карте как последовательность мгновенных сопоставлений навигационных измерений с эталоном информативности поля, хранящемся в памяти бортового компьютера. Корреляционно-экстремальная навигация синхронизирована с параллельной задачей организации информативного маршрута как наилучшей оптимальной траектории движения в трехмерном пространстве при следовании морского

подвижного объекта в заданном направлении с учетом ограничительных препятствий. Дано объяснение понимания инновационной навигации как «привязки» измерений к эталону на основе поиска глобального экстремума функционала корреляционного сравнения измеренного фрагмента с информативностью карты геофизического поля. Процесс судовождения интерпретирован в экстремальную задачу планирования маршрута как тактического сплайн-метода дорожной карты в конфликтной среде при учете фактора уклонения от навигационных опасностей. Сделано предположение о развитии технологии корреляционно-экстремальной навигации с применением методов сплайн-функций как реализации практической пригодности к навигации перспективной концепции в полном объеме прогрессивных возможностей автономного проекта. В развитие идеи корреляционно-экстремальной навигации реализовано трехмерное синтезирование фрагмента геофизического поля на основе репродуцированных цифровых значений с контурной карты изолиний для создания гибридным методом В-сплайновой аппроксимации возможного опорного эталона информативности. Проанализированы недостатки традиционных методов обработки навигационной информации в проекте корреляционно-экстремальной навигации. Отмечается, что сплайновый алгоритм по математической конфигурации лишен феномена «проклятия размерности» как основной трудности достижения быстродействия вычислительных реализаций альтернативных методов нелинейной фильтрации. Выдвинута гипотеза возможности использования предлагаемого подхода в качестве математического обеспечения будущей автоматизированной системы судовождения с искусственным интеллектом в рамках концепции безэкипажного судоходства в соответствии с проектом e-Navigation.

Ключевые слова: информативность, навигация с коррекцией по карте, информативный маршрут, оптимальная траектория, сплайн-метод дорожной карты, пригодность к навигации, «проклятие размерности».

Для цитирования:

Ююкин И. В. Сплайновое синтезирование картографированного эталона информативности поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.

Введение (Introduction)

Инновационный подход корреляционно-экстремальной навигации основан на мгновенном сопоставлении полученных измерений навигационного поля с априорной информацией о нем, хранящейся в оперативной памяти бортового компьютера. Фактически модифицированный процесс навигации движущегося объекта реализуется как многократно повторяющаяся задача так называемой «привязки» измерительного фрагмента к эталону картографированного поля или поиска схожего профиля поля, зафиксированного бортовой аппаратурой в процессе движения, с геометрически замкнутой географической областью. Задача корреляционно-экстремальной навигации, в конечном счете, сводится к совмещению двух изображений при автоматическом определении максимальной степени близости текущего измерительного изображения к опорному эталону навигационного поля [1]. Под информативностью понимается мера, определяющая эффективность использования изотропного поля для вычисления координат местоположения транспортного средства [2]. Характеристики информативности поля могут служить в качестве показателей, определяющих возможность использования данных измерений физических параметров для решения навигационной задачи на основе использования метода корреляционно-экстремальной навигации [3].

Применение картографированной информативности в целях навигации реализуется при наличии на борту носителя эталонной карты зоны коррекции геофизического поля. Бортовой измеритель сканирует фрагмент поля в виде последовательности отсчетов физических данных с постоянным шагом вдоль траектории. Непосредственная задача метода коррекции состоит в том, чтобы путем «привязки» измеренного фрагмента поля к эталонной карте уточнить географические координаты. «Привязка» измерений производится методом поиска максимального или минимального экстремума некоторого функционала сравнения измеренного фрагмента с эталоном, полученным из информативности карты геофизического поля для подтверждения гипотез об искомых навигационных параметрах.

Информативность может быть определена для отдельной точки, плоской кривой или траектории и некоторой площади характерной поверхности стохастической природы. Эффективным

образом информативность поля, характеризующегося неоднородностью по разным направлениям, может быть представлена в виде карты. Картографирование позволяет выделить области поля, пригодные для целей навигации с дальнейшим их использованием для выбора информативного маршрута транспортного средства [4]. Понятие *информативности поля* не позволяет, например, использовать в целях навигации однородную морскую поверхность, препятствующей осуществлению «привязки» по координатам любого подвижного объекта. Задачу анализа информативности поля можно свести к поиску областей с «веером» различных направлений градиентов, чтобы результирующая матрица, формируемая при градиентном подходе, была обратимой и хорошо обусловленной [5].

Следовательно, параллельно с процессом навигации по геофизическому полю осуществляется сопутствующая задача организации информативного маршрута как наилучшей оптимальной траектории движения в трехмерном пространстве при стратегическом следовании объекта в заданном направлении с учетом ограничительных препятствий [6], [7]. Трактовка оптимальности траектории д-ра физ.-мат. наук, проф., акад. РАН В. И. Бердышева как уклонение от областей влияния и теневых секторов нахождения недружественного наблюдателя при следовании движущегося объекта по запланированному пути аналогичным образом согласуется с проработкой перехода судна при обязательности условия устранения принципиальной возможности прохождения зон мелководья или районов военных учений, определяемого судоводителем при подъеме морской карты.

Выбор информативной траектории напрямую связан с анализом навигационной информативности. При этом линия оптимального пути с позиций *теории аппроксимации* должна быть «гладкой» кривой класса C^2 , что означает двойную успешность функциональной дифференцируемости [8]–[10]. Эффективный способ устранения осцилляций синтезированной изолинии заключается в построении составной кривой, в которой кусочные полиномы низкой степени последовательно применяются для интерполяции групп характерных точек. Полученная в результате кусочно-полиномиальная функция в идеальном варианте будет непрерывной, но в общем случае может иметь разрывы производных в точках соединения последовательных сплайновых сегментов.

Идея корреляционно-экстремальной навигации на примере потенциального поля с одновременным поиском и построением безопасной интерактивной траектории навигации по информативному маршруту наглядно представлена на рис. 1 [11].

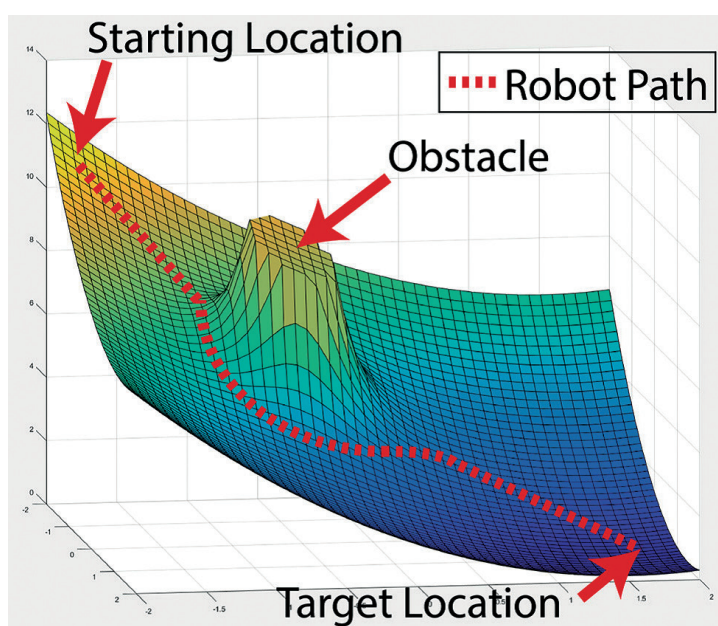


Рис. 1. Процесс корреляционно-экстремальной навигации с синхронным поиском интерактивной траектории движения объекта

Основой для построения «гладкого» пути может быть не ломаная, а «коридор», который выбирают так, что в нем отсутствуют препятствия [12]. Характеристика оптимальной по «гладкости» траектории фокусируется на обязательном прохождении движущегося объекта внутри заданного «коридора» по наилучшему маршруту в удалении от недружественных наблюдателей [13]. Аналогично в ЭКНИС формируется электронный маршрут перехода в коридоре безопасности от столкновений с навигационными препятствиями и тактическими границами дистанции бокового отклонения как величины допустимого смещения судна в перпендикулярном направлении от проложенной линии пути. В качестве маршрутного «коридора» может быть эффективно использована кусочно-гладкая «оболочка» на основе конфигураций кубических сглаживающих B -сплайнов [14], [10], [15].

Для морского потребителя значимость представляют не технические точностные характеристики следящей системы, а реальная геометрия взаимного соотношения местоположения и навигационных опасностей по маршруту следования судна для гарантированного прохождения препятствий в заданном маршрутном «коридоре» при полном соответствии с концепцией *хорошей морской практики*. Экстремальные задачи планирования маршрута движущегося объекта в конфликтной среде при учете фактора геометрической наблюдаемости логичным образом преобразуются в задачу судовождения как определение безопасной тактики движения судна при переходе морем в ситуации уклонения от навигационных опасностей.

Принципиально в целях навигации могут быть использованы информационные поля различной физической природы: магнитное или гравитационное поле Земли, поля оптического, радиолокационного или радиотеплового яркостных контрастов естественных покровов и искусственных ландшафтов, поле высот, поле характеристик пространственного положения объектов подстилающей поверхности, радионавигационное поле спутниковых систем навигации, рельефометрическое поле [16], [17].

Под корреляционно-экстремальной доктриной понимаются системы обработки информации как реализации целевой функции, предназначенной для определения координат движения. Для формирования экстремума традиционно используется корреляционное свойство достижения максимума при нулевом значении аргументов. Практическое применение исследуемого помехоустойчивого подхода автоматически создает проблему эффективного синтеза математической модели геофизического поля как базовой основы обеспечения корреляционно-экстремальной навигации.

Картографирование эталона информативности поля на основе кусочной аппроксимации автоматически обеспечивает экономную организацию цифровой базы модельных данных эталона поля. Оптимальные результаты могут быть достигнуты с помощью кубических B -сплайнов, обеспечивающих благодаря конструктивной особенности базисной структуры «функций-крыш» четырехкратное сжатие массивов данных по сравнению с традиционными методами [18].

Необходимо учитывать, что метод обработки навигационной информации на основе сплайн-функций не гарантирует автоматическую надежность спутниковых обсерваций в условиях преднамеренных помех, спуфинга и локальной недоступности спутниковых сигналов [1], [16]. Кардинальное решение указанной проблемы возможно только за счет использования средств судовождения, основанных на иных принципах работы [19]. Представляется целесообразным для эффективного решения данной задачи использовать новые возможности автономной корреляционно-экстремальной навигации с целью обеспечения максимальной точности определения местоположения подвижного объекта в любых обстоятельствах неопределенности спутниковых систем [20].

Применение изолинейного плавания позволяет автоматически решить проблему использования множественности референц-эллипсоидов при системном отсутствии практической необходимости работы с классической морской картой [21]. Таким образом, автономная навигация по геофизическим полям является перспективным направлением альтернативы спутниковой навигации. В практической реализации синтеза картографического эталона информативности поля корреляционно-экстремальной навигации сформулированы следующие задачи:

1. Аналитический обзор проблематики сопутствующей задачи корреляционно-экстремальной навигации по формированию оптимальной траектории сплайн-пути мобильного объекта.
2. Математическая адаптация к задаче корреляционно-экстремальной навигации алгоритма *двумерной B-сплайновой аппроксимации* с целью моделирования эталона информативности поля любой природы.
3. Применение эмпирического критерия по методу наименьших квадратов для учета рассогласования синтезируемой топографии с дискретной измерительной информацией датчиков поля при их сопоставлении.
4. Трехмерное виртуальное представление цифровой модели геофизического поля на основе базисных финитных сплайнов.
5. Разработка прикладной паскаль-программы применительно к задаче компьютерной визуализации эталонной информативности.
6. Рассмотрение теоретической возможности практического применения теории сплайн-функций к приближению новейших структур информационного поля для организации автономного изолинейного плавания, внедрение которых в навигацию будущего связано с прогрессивным развитием технических средств судовождения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Оптимальная точность корреляционно-экстремальной навигационной системы (КЭНС) в условиях современности составляет 100 м [22]. Задача наилучшей аппроксимации карты поля с точки зрения финальной точности позиционирования движущегося объекта играет первостепенную роль в новом способе навигации. Эффективным аппроксиматором необходимо признать широкий класс сплайн-функций, обеспечивающих потерю точности корреляционного сопоставления эталонного и полученного в результате инструментальных измерений представления геофизического поля на 15–20 % меньше по сравнению с альтернативными математическими методами [23], [24]. Применимость сплайновой технологии к исследуемой проблеме апробирует способ морской навигации по геофизическим полям с масштабированным восстановлением априорных виртуальных карт на основе двумерного метода *B-сплайновой аппроксимации* для эталонного сравнения с фрагментарными бортовыми измерениями.

Оптимизация геометрии поверхностей *B-сплайнов* выражается в возможности локальной сопоставимости с любой сложной областью навигационного поля путем формирования пространственного изгиба без искажений, растяжения или разрыва. Дважды дифференцируемые кусочно бикубические финитные поверхности являются одинарно изогнутыми. Это означает, что *Гауссова кривизна* в каждой точке равна нулю [25]. Плавность «склейки» полиномиальных патчей выступает в качестве минимизатора регулярной комбинаторики, что является предпочтительным вариантом в проекте архитектурного дизайна картографированного эталона информативности корреляционно-экстремальной навигации.

Требование точности приближения *B-сплайновой* изоповерхности к сложному профилю геофизического поля действует как регулятор для реализации задачи оптимизации, формулируемой с помощью кусочных полиномиальных энергий упругого сжатия в физическом понимании. Предлагаемый метод *B-сплайновой аппроксимации* задает меньшие экстремумы кривизны поверхности при ее аналогичной дифференциальной непрерывности, что концептуально обеспечивает сглаживающий эффект [26]. Сбалансированное сочетание изогеометрических ограничений при оптимальной расстановке фиксированных узловых точек позволяет избежать ожидаемых вырожденных результатов.

Двумерный базисный сплайн как минимум один раз является непрерывно дифференцируемым по каждой из переменных с обеспечением гладкой «склейки» соседних каркасных ячеек между собой до непрерывности производной, на единицу меньшей, чем степень сплайна. Если взять всевозможные произведения финитных сплайнов по координатным осям $B_{i,k}(\varphi)$ и $B_{j,m}(\lambda)$, то двумерный *B-сплайн* класса гладкости $C^{k-1,m-1}$ может быть скомплексирован как однозначное представление в виде

$$S(\varphi, \lambda) = \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi) B_{j,m}(\lambda_r) C_{i,j}, \quad (1)$$

где k, m — степени B -сплайна по координатным осям широты φ и долготы λ соответственно;
 g, h — максимальное количество узлов на сеточных интервалах широты j и долготы i ;
 $B_{i,k}(\varphi), B_{j,m}(\lambda)$ — «шапочные» функции базисного сплайна;
 $C_{i,j}$ — матрица подлежащих математическому определению скалярных сплайновых коэффициентов.

В силу универсальности сплайн-функций исследуемый математический аппарат синтеза картографического эталона информативности геофизического поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации апробирован аналогичными приложениями для решения различных важных навигационных задач: компьютерной визуализацией подводного рельефа судоходного прол. Чатем в морской зоне Аляски, восстановления района аномальной силы тяжести в Японском море, реализации сплайновой альтернативы множественности использования референц-эллипсоидов в судовождении и аппроксимации фрагмента геоидной изоповерхности [21], [27], [28].

В стратегии корреляционно-экстремальной навигации особую актуальность приобретают проблемы разработки методов дорожной карты на основе методов сплайн-функций как планирования тактики движения мобильного объекта [29]–[31]. Многокритериальный поиск безопасного сплайн-пути может быть определен эффективным образом на основе алгоритма кубических B -сплайнов, позволяющего избежать избыточной сложности кусочных аппроксимаций и одновременно в полном объеме сконфигурировать глобальное планирование маршрута следования [32].

Использование базисной конгломерации позволяет добиться «гладкого» изменения кривизны линии маршрута при пяти сеточных точках на каждом кусочном полиноме третьей степени. На рис. 2 наглядно продемонстрировано единичное представление компактного носителя из пяти опорных точек для кубического B -сплайна [33].

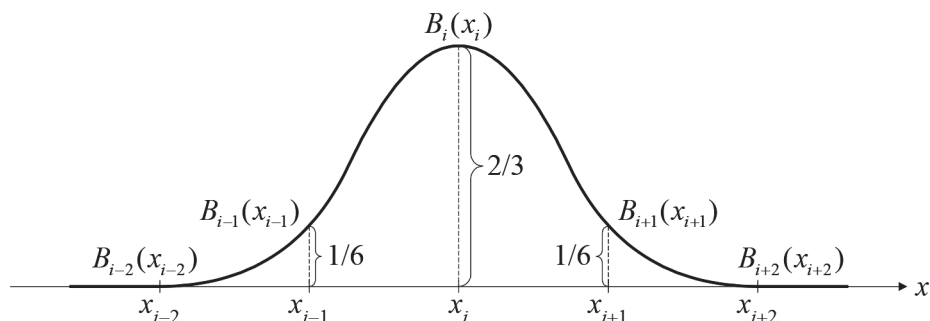


Рис. 2. Пятикратный узловый полигон кубического B -сплайна

При синтезировании сложных изолиний и изоповерхностей может возникнуть необходимость локальной модификации аппроксиматора для точного решения поставленной задачи. Базисные финитные функции позволяют выполнить трансформацию многозвенной структуры. Кубический B -сплайн может быть повторно выражен в виде разложения на набор *многочленов Бернштейна* на каждом пятикратном узловом полигоне сеточных контрольных точек альтернативным способом [34]. Пять опорных точек, характеризующих кубический B -сплайн, алгоритмически минимизированы до числа базовых точек данного интерполянта, что непосредственно упрощает процесс оптимизации интерполяции [35].

Геометрическое преимущество изолинии, построенной при помощи B -сплайнов третьей степени, заключается в том, что изменение одной из характеристических точек линии равного значения навигационного параметра вызывает изменение только четырех последовательных сегментов кривой, что означает возможность корректировки общей формы без изменения всей изолинии. При этом необходимо учитывать, что базисный сплайн представляет собой вторичную абстракцию

по отношению к оригинальной изолинии [36]. Ассоциированный финитный сплайн, синтезирующий по пяти дискретным данным в каждом элементе сплайнного набора искусственную кусочную конструкцию, не является непосредственно фактическим фрагментом интерполируемой кривой, но при этом он формирует максимально близкую к реальности навигационную изолинию. Именно *B*-сплайн обеспечивает последовательное соединение фрагментарных носителей без резких функциональных изменений и разрывов, что формирует «склеенную» сплайн-траекторию в гомотопическом пространстве запланированного пути [37].

Согласованность смоделированных и измеренных значений профиля геофизического поля можно определить при помощи практического критерия оптимизации:

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

где S — эмпирический параметр сглаживания особенностей геофизического поля.

Интуитивное определение пользователем в интерактивном режиме числовой реализации S из выражения (2) является эмпирическим компромиссом между точностью синтеза геометрии информационного поля и правдоподобием трехмерной визуализации геофизического поля.

В результате вычислений решение системы алгебраических уравнений реализуется на основе модифицированного метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности [38].

Развитие технологии корреляционно-экстремальной навигации по геофизическому полю с применением методов сплайн-функций реализует практическую востребованность инновационной концепции в полном объеме перспективных возможностей автономного проекта.

Результаты (Results)

Суть рассматриваемого подхода можно пояснить на примере корреляционно-экстремальной навигации необитаемого подводного аппарата при использовании в качестве эталона характеристик информативности аномального поля силы тяжести в виде рельефной карты, служащей для сравнения с данными гравиметрических измерений с борта роботизированного устройства в целях автономного определения местоположения [39].

На рис. 3 приведен фрагмент контурной карты изолиний геофизического поля, который в трехмерной компьютерной визуализации может быть использован аналогично ситуации с подводным роботом в виде эталона информативности в КЭНС [2]. Существующая изменчивость геофизического поля обследуемого района характеризуется наличием двух выраженных аномальных участков в виде возвышенности (бирюзово-желтые концентрические изолинии) и ложбины (сине-фиолетовые концентрические изолинии).

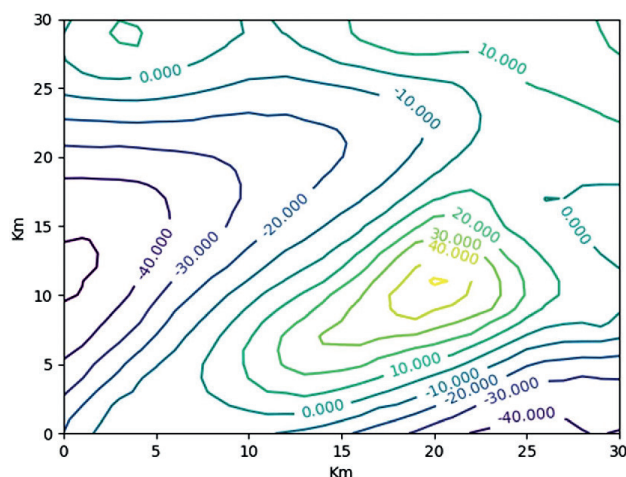


Рис. 3. Фрагмент контурной карты изолиний геофизического поля

Цифровая модель фрагмента размерностью 30×30 км для карты изолиний геофизического поля была использована с целью моделирования объемного профиля рельефа *методом двумерной В-сплайновой аппроксимации* при фиксировании тринадцати сеточных точек по широте и тринадцати точек по долготе с соответствующим организованным матричным массивом размерностью 13×13 при общем количестве задействованных 169 узловых информационных данных. Для обеспечения лучшей информативности представления геофизического поля помимо узловых точек в 5, 10, 15, 20, 25 и 30 км дополнительно использовались промежуточные сеточные точки в 2,5; 12,5; 17,5; 22,5; 27,5 км по каждой координатной оси.

С целью демонстрации принципиальной работоспособности предлагаемого алгоритма выполнена трехмерная компьютерная визуализация синтезированного фрагмента карты изолиний геофизического поля на основе использования методов базисных сплайнов (рис. 4). Приведенная геометрическая интерпретация символизирует возможность эффективного вычисления в цифровом формате равного значения навигационного параметра каждой фиксированной изолинии.

В развитие идеи корреляционно-экстремальной навигации реализовано синтезирование фрагмента геофизического поля на основе репродуцированных цифровых значений по рис. 3 для создания возможного картографированного эталона информативности, представленного на рис. 4 в трехмерном измерении.

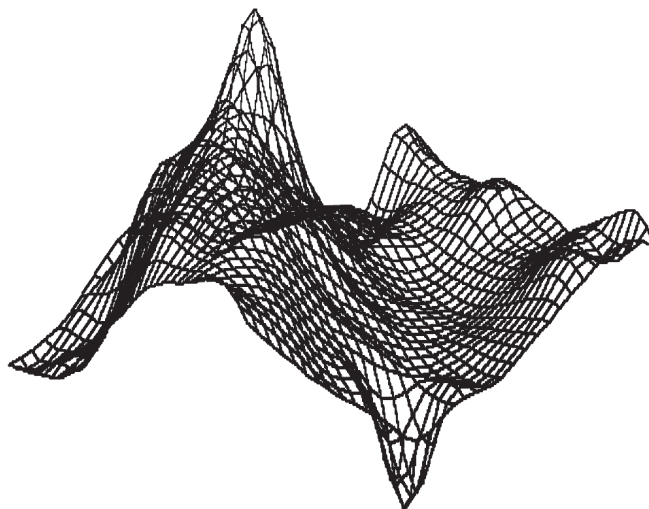


Рис. 4. Трехмерная визуализация синтезированного фрагмента

Фактически скриншот (см. рис. 4) является трехмерным представлением плоскостной карты изолиний, приведенной на рис. 3. На основе анализа рис. 4 можно сделать вывод о том, что максимальный и минимальный естественные всплески навигационной изоповерхности соответствуют местоположению возвышенности и ложбины, определяемых по густоте и оцифровке циклических контуров, обозначенных на рис. 3.

Основной проблемой при построении следящих навигационных систем является синтез эффективных алгоритмов хранения и воспроизведения геофизических данных в цифровой форме. Любые нежелательные результаты измерительных ошибок датчиков следящих систем гарантированно обнаруживаются в виде шумовой изометрической флуктуации на основе метода визуализации сплайновой изоповерхности за счет нарушения «гладкости» и условий «склейки» лоскутных образований синтезированного электронного профиля эталонной изоповерхности [40].

Для наиболее сложных вариантов структуры информационного поля возможно оптимальное решение при условии использования сплайновой технологии, позволяющей оперировать даже искаженными изолиниями в навигационных целях [41]. При сплайновой визуализации в качестве эталона информативности геофизического поля эффективной является практическая реализация высокоточной корреляционно-экстремальной навигации при организации движения подвижного

объекта на основе соблюдения принципа знания геометрии поля в виде трехмерной карты сплайнового профиля с ориентированием перемещения в соответствии с «гладкостью» по электронной сплайн-траектории.

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

Обсуждение (Discussion)

Дополнительным преимуществом КЭНС на основе сплайновых технологий является быстрое действие вычислительных реализаций. При применении альтернативных алгоритмов в рамках байесовского подхода и калмановской фильтрации возникают трудности быстрого действия расчетов в процессе решения задачи корреляционно-экстремальной навигации [42], [43].

В отличие от фильтра Калмана и алгоритмов Байеса, сплайновая аппроксимация является высокоскоростным средством решения различных навигационных задач, так как формат аппроксимированной функции определяет только объем памяти судового компьютера с предварительно рассчитанными сплайновыми коэффициентами и сеточными координатами для вычисления в масштабе реального времени значения навигационной функции по номеру сеточного интервала.

Измеренная вдоль траектории движения реализация поля в обязательном порядке подлежит коррекции для повышения точности обсервации. Коррекция осуществляется путем выработки поправок к показаниям навигационной системы с помощью алгоритма, основанного на сопоставлении измеренной реализации поля и фактологии его значений, вычисляемых с использованием информативности карты вдоль предполагаемых траекторий движения объекта. Байесовские алгоритмы дают оптимальное решение задачи коррекции как нелинейной задачи фильтрации, однако необходимые для их практического воплощения вычислительные ресурсы даже при современном уровне развития компьютерной техники остаются не всегда реализуемыми.

В силу нелинейности характера задачи коррекции возникают трудности реализации алгоритмов Байеса также по причине так называемого «проклятия размерности» [42]. Данный термин означает экспоненциальный рост преимущества экспериментальных данных по сравнению с размерностью пространства вероятностно-статистических решений [44]. Указанное ранее обстоятельство вызывает предпосылку для намеренного искусственного упрощения алгоритмов решения стратегически сложной задачи корреляционно-экстремальной навигации. Интуитивное тактическое решение проблемы направлено на снижение влияния различных составляющих погрешностей измерения с целью повышения точности оценки значений навигационного поля в каждой текущей точке траектории перемещения транспортной единицы. В итоге происходит частичная потеря измерительной информации, обуславливающая неизбежность снижения конечной точности решения непосредственно задачи коррекции. Становится очевидной необходимость использования всего набора измерений по трассе корреляционно-экстремальной навигации для устранения недостатка финальной потери точности обсерваций.

По мнению автора терминологии, ведущего американского специалиста в области математики Ричарда Эрнеста Беллмана, проблема размерности действует на конечный результат оптимизационного метода в силу неоправданного усложнения целевой функции. Фактическая реализация сравнения в бортовом вычислителе выполняется на основе расчета целевого функционала, отражающего корреляционную зависимость между измеренным и эталонным сигналами. Экстремум функционала, соответствующий искомому навигационному решению, в упрощенном варианте не позволяет найти точное решение позиционирования в масштабе реального времени. Таким образом, происходит автоматическое возвращение к необходимости первоначальной сложности алгоритма с организацией замкнутого круга нерешенной проблемы предсказательного моделирования.

Сплайновый алгоритм по своей математической конфигурации лишен феномена «проклятия размерности», что служит дополнительным основанием для применения кусочной аппроксимации при синтезировании информативности картографического эталона поля.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Выполнен обзорный анализ проблематики, выявлены преимущества и недостатки использования различных автономных вариантов корреляционно-экстремальной навигации.
2. Математический гибридный алгоритм *B*-сплайновой аппроксимации адаптирован к моделированию информативности эталона навигационного поля.
3. В алгоритме реализован целевой квадратичный функционал, учитывающий рассогласование моделируемой поверхности с измерительными данными эксперимента.
4. Выполнено трехмерное визуализированное представление цифровой модели геофизического поля на основе базисных финитных сплайнов.
5. Разработаны прикладные программы, объединенные пользовательским интерфейсом в среде языка программирования высокого уровня Turbo Pascal применительно к задаче синтезирования и визуализации фрагментов картографированной изоповерхности.
6. Сделан прогноз о принципиальной возможности практического применения теории сплайн-функций к организации изолинейного плавания по новейшим эталонным структурам информационного поля, которые могут появиться в будущем в процессе технологических инноваций судовождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров Д. С. Разработка методов и средств создания навигационных гравитационных карт: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. С. Бобров. — Менделеево, 2020. — 23 с.
2. Stepanov O. A. Navigation informativity of geophysical fields in map-aided navigation / O. A. Stepanov, A. S. Nosov, A. B. Toropov // 2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). — IEEE, 2017. — Pp. 1–19. DOI: 10.1109/InertialSensors.2017.8171509.
3. Киселев Л. В. О гравиметрии с борта автономного подводного робота и оценках ее информативности для навигации по карте / Л. В. Киселев [и др.] // Подводные исследования и робототехника. — 2019. — № 1 (27). — С. 21–30. DOI: 10.25808/24094609.2019.27.1.003.
4. Stepanov O. A. Algorithm for Planning an Informative Route for Map-Aided Navigation / O. A. Stepanov, A. S. Nosov // 2021 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). — IEEE, 2021. — Pp. 1–5. DOI: 10.23919/ICINS43216.2021.9470825.
5. Yuyukin I. V. Configuring the fan of spline gradients when approximating the navigational isoline with a linear piecewise functional / I. V. Yuyukin // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 2032. — № 1. — Pp. 012054. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012054.
6. Berdyshev V. I. Optimal Trajectory of an Observer Tracking the Motion of an Object Equipped with a Striking Device / V. I. Berdyshev // Doklady Mathematics. — Pleiades Publishing, 2021. — Vol. 104. — No. 1. — Pp. 221–224. DOI: 10.1134/S1064562421040037.
7. Бердышев В. И. Объект с поражающим устройством и недружественный наблюдатель в трехмерном пространстве / В. И. Бердышев // Труды Института математики и механики УрО РАН. — 2021. — Т. 27. — № 2. — С. 49–58. DOI: 10.21538/0134-4889-2021-27-2-49-58.
8. Wang A. Hermite Interpolation Based Interval Shannon-Cosine Wavelet and its Application in Sparse Representation of Curve / A. Wang, L. Li, S. Mei, K. Meng // Mathematics. — 2021. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 1. DOI: 10.3390/math9010001.
9. 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.
10. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) / В. Лю // Математика и математическое моделирование. — 2018. — № 1. — С. 15–58. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098.

11. Woods A. C. Dynamic Target Tracking and Obstacle Avoidance using a Drone / A. C. Woods, H. M. La // International Symposium on Visual Computing. — Springer, Cham, 2015. — Vol. 9474. — Pp. 857–866. DOI: 10.1007/978-3-319-27857-5_76.
12. Berdyshev V. I. Optimal Trajectory in R^2 under Observation / V. I. Berdyshev, V. B. Kostousov, A. A. Popov // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. — 2019. — Vol. 304. — Is. 1. — Pp. S31–S34. DOI: 10.1134/S0081543819020056.
13. Berdyshev V. I. Characterization of Optimal Trajectories in R^3 / V. I. Berdyshev // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. — 2019. — Vol. 305. — Is. 1. — Pp. S10–S15. DOI: 10.1134/S0081543819040035.
14. Shi C. Mobile robot path planning in three-dimensional environment based on ACO-PSO hybrid algorithm / C. Shi, Y. Bu, J. Liu // 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. — IEEE, 2008. — Pp. 252–256. DOI: 10.1109/AIM.2008.4601668.
15. Лю В. Построение траекторий и моделирование движения летательного аппарата в среде с препятствиями: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. н. / В. Лю. — М., 2018. — 15 с.
16. 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.
17. Тхоренко М. Ю. Синтез и анализ алгоритмов навигации по измерениям магнитного поля: дис. ... канд. техн. наук / М. Ю. Тхоренко. — М., 2020. — 107 с.
18. 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.
19. 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.
20. Fateev V. Problems of creating autonomous navigation systems on geophysical fields / V. Fateev, D. Bobrov, M. Muzabekov, R. Davlatov // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2021. — Vol. 310. — Pp. 03008. DOI: 10.1051/e3sconf/202131003008.
21. 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.
22. Karshakov E. V. Promising Map-Aided Aircraft Navigation Systems / E. V. Karshakov, B. V. Pavlov, M. Y. Tkhorenko, I. A. Papusha // Gyroscopy and Navigation. — 2021. — Vol. 12. — Is. 1. — Pp. 38–49. DOI: 10.1134/S2075108721010077.
23. Berdyshev V. I. Extremal problems of navigation by geophysical fields / V. I. Berdyshev, V. B. Kostousov // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. — 2018. — Vol. 6. — Is. 2. — Pp. 4–18. DOI: 10.32523/2306-6172-2018-6-2-4-18.
24. Berdyshev V. I. Mapping Problems of Geophysical Fields in Ocean and Extremum Problems of Underwater Objects Navigation / V. I. Berdyshev, L. V. Kiselev, V. B. Kostousov // IFAC-PapersOnLine. — 2018. — Vol. 51. — Is. 32. — Pp. 189–194. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.379.
25. Gavril K. Optimizing B-spline surface for developability and paneling architectural freeform surfaces / K. Gavril, A. Schiftner, H. Pottman // Computer-Aided Design. — 2019. — Vol. 111. — Pp. 29–43. DOI: 10.1016/j.cad.2019.01.006.
26. Gao X. Double B-Spline Curve-Fitting and synchronization-Integrated Feedrate Scheduling Method for Five-Axis Linear-Segment Toolpath / X. Gao, S. Zhang, L. Qiu, X. Liu, Z. Wang, Y. Wang // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10. — Is. 9. — Pp. 3158. DOI: 10.3390/app10093158.
27. 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.
28. 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.

29. *Lavrenov R.* Modified Spline-Based Navigation: Guaranteed Safety for Obstacle Avoidance / R. Lavrenov, F. Matsuno, E. Magid // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. — Springer, Cham, 2017. — Vol. 10459. — Pp. 123–133. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_14.
30. *Lavrenov R.* Towards heterogeneous robot team path planning: acquisition of multiple routes with a modified spline-based algorithm / R. Lavrenov, E. Magid // MATEC Web of Conference. — EDP Sciences, 2017. — Vol. 113. — Pp. 02015. DOI: 10.1051/mateconf/201711302015.
31. *Lavrenov R.* Smart Spline-Based Robot Navigation on Several Homotopies: Guaranteed Avoidance of Potential Function Local Minima / R. Lavrenov // The 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2018). — ALife Robotics Corporation Ltd, 2018. — Pp. 407–410. DOI: 10.5954/ICAROB.2018.OS7-7.
32. *Лавренов Р. О.* Математическое и программное обеспечение решения задачи многокритериального поиска пути мобильного объекта: дис. ... канд. техн. наук / Р. О. Лавренов. — Казань, 2020. — 138 с.
33. *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.
34. *Penner A.* ODF Using a 5-Point B-Spline / A. Penner // Fitting Splines to a Parametric Function. Springer Briefs in Computer Sciences. — Springer, Cham, 2019. — Pp. 37–42. DOI: 10.1007/978-3-030-12551-6_6.
35. *Лавренов Р. О.* Разработка и имплементация сплайн-алгоритма планирования пути в среде ROS/Gazebo / Р. О. Лавренов, Е. А. Магид, Ф. Мацуно, Дж. Сутакорн // Труды СПИИРАН. — 2019. — № 18 (1). — С. 57–84. DOI: 10.15622/sp.18.1.57-84.
36. *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.
37. *Лавренов Р. О.* Многогомотопический поиск оптимального маршрута для автономных мобильных устройств / Р. О. Лавренов, Е. А. Магид // Автоматизация в промышленности. — 2020. — № 7. — С. 61–64. DOI: 10.25728/avtprom.2020.07.14.
38. *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.
39. *Kiselev L. V.* Computational Models of Trajectory Investigation of Marine Geophysical Fields and Its Implementation for Solving Problems of Map-Aided Navigation / L. V. Kiselev, V. B. Kostousov, A. V. Medvedev, A. E. Tarkhanov, K. V. Dunaevskaya // Advanced in Systems Science and Applications. — 2020. — Vol. 20. — № 4. — Pp. 45–59. DOI: 10.25728/assa2020.20.4.972.
40. *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.
41. *Ююкин И. В.* Синтез кубическими сплайнами искажённой 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.
42. *Stepanov O. A.* A Map-Aided Navigation Algorithm without Preprocessing of Field Measurements / O. A. Stepanov, A. S. Nosov // Gyroscopy and Navigation. — 2020. — Vol. 11. — Is. 2. — Pp. 162–175. DOI: 10.1134/S207510872002008X.
43. *Stepanov O. A.* Classification of Map-Aided Navigation Algorithms / O. A. Stepanov, A. S. Nosov, A. B. Toporov // 2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). — IEEE, 2020. — Pp. 1–9. DOI: 10.23919/ICINS43216.2020.9133757.
44. *Poggio T.* Why and When Can Deep-but Not Shallow-networks Avoid the Curse of Dimensionality: A Review / T. Poggio, H. Mhaskar, L. Rosasco, B. Mirando, Q. Liano // International Journal of Automation and Computing. — 2017. — Vol. 14. — № 5. — Pp. 503–519. DOI: 10.1007/s11633-017-1054-2.

REFERENCES

1. Bobrov, Dmitriy S. Razrabotka metodov i sredstv sozdaniya navigatsionnykh gravitatsionnykh kart. Abstract of PhD Diss. Mendeleevo, 2021.
2. Stepanov, Oleg A., Alexey S. Nosov, and Anton B. Toropov. "Navigation informativity of geophysical fields in map-aided navigation." *2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/InertialSensors.2017.8171509.
3. Kiselev, L. V. [et al]. "About gravimetry of on-board autonomous underwater robot and estimates of its informative for navigation on the map." *Underwater Investigations and Robotics* 1(27) (2019): 21–30. DOI: 10.25808/24094609.2019.27.1.003.
4. Stepanov, O. A., and A. S. Nosov. "Algorithm for Planning an Informative Route for Map-Aided Navigation." *2021 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. IEEE, 2021. DOI: 10.23919/ICINS43216.2021.9470825.
5. Yuyukin, I. V. "Configuring the fan of spline gradients when approximating the navigational isoline with a linear piecewise functional." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2032. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012054.
6. Berdyshev, V. I. "Optimal Trajectory of an Observer Tracking the Motion of an Object Equipped with a Striking Device." *Doklady Mathematics*. Vol. 104. No. 1. Pleiades Publishing, 2021. 221–224. DOI: 10.1134/S1064562421040037.
7. Berdyshev, Vitalii Ivanovich. "An object with a destructive device and an unfriendly observer in three-dimensional space." *Trudy Instituta Matematiki i Mekhaniki UrO RAN* 27.2 (2021): 49–58. DOI: 10.21538/0134-4889-2021-27-2-49-58.
8. Wang, Aiping, Li Li, Shuli Mei, and Kexin Meng. "Hermite Interpolation Based Interval Shannon-Cosine Wavelet and its Application in Sparse Representation of Curve." *Mathematics* 9.1 (2021): 1. DOI: 10.3390/math9010001.
9. 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.
10. Liu, W. "Path Planning Methods in an Environment with Obstacles (A Review)." *Mathematics and Mathematical Modeling* 1 (2018): 15–58. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098.
11. Woods, Alexander C., and Hung M. La. "Dynamic Target Tracking and Obstacle Avoidance using a Drone." *International Symposium on Visual Computing*. Vol. 9474. Springer, Cham, 2015. 857–866. DOI: 10.1007/978-3-319-27857-5_76.
12. Berdyshev, V. I., V. B. Kostousov, and A. A. Popov. "Optimal Trajectory in R^2 under Observation." *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 304.1 (2019): S31–S43. DOI: 10.1134/S0081543819020056.
13. Berdyshev, V. I. "Characterization of Optimal Trajectories in R^3 ." *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 305.1 (2019): S10–S15. DOI: 10.1134/S0081543819040035.
14. Shi, Chunxue, Yingyong Bu, and Jianghui Liu. "Mobile robot path planning in three-dimensional environment based on ACO-PSO hybrid algorithm." *2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE, 2008. 252–256. DOI: 10.1109/AIM.2008.4601668.
15. Liu, V. Postroenie traektorii i modelirovanie dvizheniya letatel'nogo apparata v srede s prepyatstviyami: Abstract of PhD Diss. M., 2018.
16. Rybakov, Evgeniy A. Kompleksirovanie apparatury global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem s apparatury korrelyatsionno-ekstremal'noy navigatsii po gravitatsionnomu polu Zemli. Abstract of PhD Diss. M., 2021.
17. Tkhorenko, M. Yu. Sintez i analiz algoritmov navigatsii po izmereniyam magnitnogo polya. PhD Diss. M., 2020.
18. 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.
19. 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.

20. Fateev, Vyacheslav, Dmitrii Bobrov, Murat Murzabekov, and Ruslan Davlatov. "Problems of creating autonomous navigation systems on geophysical fields." *E3S Web of Conferences*. Vol. 310. EDP Sciences, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202131003008.
21. 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.
22. Karshakov, E. V., B. V. Pavlov, M. Y. Tkorenko, and I. A. Papusha. "Promising Map-Aided Aircraft Navigation Systems." *Gyroskopy and Navigation* 12.1 (2021): 38–49. DOI: 10.1134/S2075108721010077.
23. Berdyshev, Vitalii Ivanovich, and Viktor Borisovich Kostousov. "Extremal problems of navigation by geophysical fields." *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications* 6.2 (2018): 4–18. DOI: 10.32523/2306-6172-2018-6-2-4-18.
24. Berdyshev, Vitalii I., Lev V. Kiselev, and Victor B. Kostousov. "Mapping Problems of Geophysical Fields in Ocean and Extremum Problems of Underwater Objects Navigation." *IFAC-PapersOnLine* 51.32 (2018): 189–194. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.379.
25. Gavriil, Konstantinos, Alexander Schiftner, and Helmut Pottmann. "Optimizing B-spline surface for developability and paneling architectural freeform surfaces." *Computer-Aided Design* 111 (2019): 29–43. DOI: 10.1016/j.cad.2019.01.006.
26. Gao, Xiangyu, Shuyou Zhang, Lemiao Qiu, Xiaojian Liu, Zili Wang, and Yang Wang. "Double B-Spline Curve-Fitting and synchronization-Integrated Feedrate Scheduling Method for Five-Axis Linear-Segment Toolpath." *Applied Sciences* 10.9 (2020): 3158. DOI: 10.3390/app10093158.
27. 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.
28. 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.
29. Lavrenov, Roman, Fumitoshi Matsuno, and Evgeni Magid. "Modified Spline-Based Navigation: Guaranteed Safety for Obstacle Avoidance." *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Vol. 10459. Springer, Cham, 2017. 123–133. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_14.
30. Lavrenov, Roman, and Evgeni Magid. "Towards heterogeneous robot team path planning: acquisition of multiple routes with a modified spline-based algorithm." *MATEC Web of Conference*. Vol. 113. EDP Sciences, 2017. DOI: 10.1051/matecconf/201711302015.
31. Lavrenov, Roman. "Smart Spline-Based Robot Navigation on Several Homotopics: Guaranteed Avoidance of Potential Function Local Minima." *The 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2018)*. ALife Robotics Corporation Ltd, 2018. 407–410. DOI: 10.5954/ICAROB.2018.OS7-7.
32. Lavrenov, Roman O. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie resheniya zadashi mnogokriterialnogo poiska puti mobil'nogo obekta*. PhD Diss. Kazan, 2020.
33. 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.
34. Penner, Alvin. "ODF Using a 5-Point B-Spline." *Fitting Splines to a Parametric Function. Springer Briefs in Computer Sciences*. Springer, Cham, 2019. 37–42. DOI: 10.1007/978-3-030-12551-6_6.
35. Lavrenov, Roman O., Evgeni A. Magid, Fumitoshi Matsuno, Mikhail M. Svinin, and Jackrit Suthakorn. "Development and implementation of spline-based path planning algorithm in ROS/Gazebo." *SPIIRAS Proceedings* 18 (1) (2019): 57–84. DOI: 10.15622/sp.18.1.57-84.
36. 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.
37. Lavrenov, Roman O., and Evgeni A. Magid. "Mnogogomotopicheskiy poisk optimal'nogo marshruta dlya avtonomnykh mobil'nykh ustroystv." *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* 7 (2020): 61–64. DOI: 10.25728/avtprom.2020.07.14.
38. 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.

39. Kiselev, Lev V., Victor B. Kostousov, Andrei V. Medvedev, Alexander E. Tarkhanov, and Kristina V. Dunaevskaya. "Computational Models of Trajectory Investigation of Marine Geophysical Fields and Its Implementation for Solving Problems of Map-Aided Navigation." *Advanced in Systems Science and Applications* 20.4 (2020): 45–59. DOI: 10.25728/assa2020.20.4.972.

40. 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.

41. 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.

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

43. Stepanov, O. A., A. S. Nosov, and A. B. Toropov. "Classification of Map-Aided Navigation Algorithms." *2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. IEEE, 2020. DOI: 10.23919/ICINS43216.2020.9133757.

44. Poggio, Tomaso, Hrushikesh Mhaskar, Lorenzo Rosasco, Brado Miranda, and Qianli Liano. "Why and When Can Deep-but Not Shallow-networks Avoid the Curse of Dimensionality: A Review." *International Journal of Automation and Computing* 14.5 (2017): 503–519. DOI: 10.1007/s11633-017-1054-2.

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 30 ноября 2021 г.

Received: November 30, 2021.

JUSTIFICATION AND CALCULATION OF “STORM ZIGZAGS” WHEN TANKERS SAILING

A. A. Ershov, P. I. Buklis, S. Yu. Razvozov

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

The ways to ensure the safety and effectiveness of stormy navigation of tankers in the form of “storm zigzags” are discussed in the paper. The proposed method of tanker navigation in a storm using “storm zigzags” can serve as one of the elements of restoring the sea transportation efficiency in overcoming the consequences of the COVID-19 epidemic for maritime transport. Examples of calculation and justification of parameters of “storm zigzags 60–120 and 60–130” of tankers for lateral course angles of wind and waves are given on the basis of earlier publications of the authors of this study. It is shown that the use of “storm zigzags” avoids the danger of blind sailing in the form of resonance for various types of pitching, slamming, loss of stability in passing waves, including for emergency tankers. It is noted that at the same time, the speed of the vessel’s movement in the chosen direction of movement in storm conditions is maintained. The use of “storm zigzags” can be one of the most important conditions for maintaining the rhythm of sea tanker transportation also for other types of vessels in stormy conditions, as well as ensuring the efficiency and safety of sea transportation. A universal diagram of safe and effective maneuvering of tankers in a storm, which allows you to choose a safe and effective “storm zigzag” to maintain the speed of the vessel depending on the heading angle of wind and waves, is proposed. The ways of using and correcting the universal diagram of safe and effective maneuvering of tankers in a storm by performing “storm zigzags” are proposed. The methods of storm sailing using “storm zigzags” proposed in the paper, as well as in earlier publications of the authors of this study, make it possible to ensure the efficiency and safety of tankers maneuvering in storm conditions. The use of “storm zigzags” makes it possible to choose ocean routes and maneuvers that allow solving a complex task — at the same time to ensure the optimality of the transit path, safety conditions and maintain the speed of tankers movement in the chosen direction. The conclusions obtained in the paper coincide with the available data for determining the methods of storm navigation that ensure safety and speed storage during the vessels passage along a given path. The results of this work can be used to develop methods for ensuring safety, maintaining speed and running time when sailing in a storm, taking into account the characteristics of tankers and other types of vessels.

Keywords: “storm zigzag”, justification and calculation, universal diagram, effective safe management, ship management in a storm.

For citation:

Ershov, Andrey A., Peter I. Buklis, and Sergey Yu. Razvozov. “Justification and calculation of “storm zigzags” when tankers sailing.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 40–54. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-40-54.

УДК 655.62.052.4

ОБОСНОВАНИЕ И РАСЧЕТ «ШТОРМОВЫХ ЗИГЗАГОВ» ПРИ ПЛАВАНИИ ТАНКЕРОВ

А. А. Ершов, П. И. Буклис, С. Ю. Развозов

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

В статье рассмотрены способы обеспечения безопасности и эффективности штормового плавания танкеров в виде «штормовых зигзагов». Предложенный способ плавания танкеров в шторм с использованием «штормовых зигзагов» может служить одним из элементов восстановления эффективности морских перевозок в условиях преодоления последствий эпидемии COVID-19 для морского транспорта. Приведены примеры расчета и обоснование параметров «штормовых зигзагов 60–120 и 60–130» танкеров для боковых курсовых углов ветра и волнения на основании более ранних публикаций авторов настоящего исследования. Показано,

что использование «штормовых зигзагов» позволяет избежать опасности штормового плавания в виде резонанса по различным видам качки, слеминга и слеппинга, потери остойчивости на попутном волнении, в том числе для аварийных танкеров. Отмечается, что при этом сохраняется скорость движения судна по выбранному направлению движения в условиях шторма. Использование «штормовых зигзагов» может явиться одним из важнейших условий сохранения ритмичности морских танкерных перевозок и для других типов судов в штормовых условиях, а также обеспечения эффективности и безопасности морских перевозок. Предложена универсальная диаграмма безопасного и эффективного маневрирования танкеров в условиях шторма, которая позволяет выбрать безопасный и эффективный «штормовой зигзаг» для сохранения скорости движения судна в зависимости от курсового угла ветра и волнения. Предложены способы использования и корректировки универсальной диаграммы безопасного и эффективного маневрирования танкеров в условиях шторма путем выполнения «штормовых зигзагов». Предложенные в настоящей статье, а также в более ранних публикациях авторов настоящего исследования способы штормования с использованием «штормовых зигзагов» позволяют обеспечить эффективность и безопасность маневрирования танкеров в условиях шторма. Использование «штормовых зигзагов» дает возможность выбора океанских путей и маневров, позволяющих решать комплексную задачу — одновременно обеспечивать оптимальность пути перехода, условия безопасности и сохранять скорость движения танкеров по выбранному направлению движения. Полученные в настоящей статье выводы совпадают с имеющимися данными определения способов штормового плавания, обеспечивающих безопасность и сохранение скорости при переходе судов по заданному пути. Результаты настоящей работы могут быть использованы для развития методов обеспечения безопасности, сохранения скорости и ходового времени при плавании в шторм с учетом особенностей танкеров и судов других типов.

Ключевые слова: «штормовой зигзаг», обоснование и расчет, универсальная диаграмма, эффективное безопасное управление, управление судном в шторм.

Для цитирования:

Ершов А. А. Обоснование и расчет «штормовых зигзагов» при плавании танкеров / А. А. Ершов, П. И. Буклис, С. Ю. Развозов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 40–54. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-40-54.

Введение (Introduction)

Современное судоходство должно быть безопасным и эффективным для морской перевозки грузов. Оно не должно приводить к катастрофическим потерям судов и грузов в результате морских аварий, а также допускать потери скорости и времени перехода, оказывать влияние на графики занятости и аренды причалов, складских помещений, задерживать смежные участники транспортного процесса и т. п. Особую актуальность безопасность и эффективность перевозок грузов морем получила в настоящее время, когда мировое судоходство преодолевает последствия ограничений, связанных с распространением в мире COVID-19.

В перевозке грузов морем важнейшую роль имеют обе составляющие — *безопасность и эффективность* морских перевозок, которые должны обеспечиваться при любых условиях, в том числе в условиях перехода судна в штормовую погоду. Большое значение это имеет для танкеров, к которым, в силу особенности эксплуатации, предъявляются особые требования по обеспечению безопасности и эффективности перевозок морем.

В работе [1] рассматривались способы автоматизации плавания судов с учетом основных опасностей, вызванных штормом. В работах [2]–[5] рассматривались задачи обеспечения эффективности маневрирования танкера в условиях шторма и снижения, дополнительных составляющих сопротивления и поддержания скорости судна путем выполнения «штормовых зигзагов». В указанных ранее работах определялись курсовые углы ветра и волнения (КУВ), которые приводили к максимальной и минимальной потерям скорости при движении танкера в штормовых условиях, и предлагалось выполнять маневрирование танкера таким образом, чтобы потери скорости и времени перехода были минимальными. В результате для обеспечения движения без потерь ходового времени танкер должен был маневрировать «штормовым зигзагом», переходя с одних КУВ, при которых обеспечивалось минимальные потери скорости на другие КУВ с таким же результатом (эффективные значения КУВ).

Одновременно в работе [5] предлагалось избегать тех КУВ, при которых потери скорости были максимальными. В работе [6] было показано, что применение движения «зигзагом» с эффективными значениями КУВ не приводит к существенным потерям ходового времени и может быть

использовано для обеспечения безопасности движения танкера в условиях шторма. Было обосновано применение «штормового зигзага 12–60» как безопасного и эффективного способа маневрирования танкера в грузу при движении в условиях встречного шторма с КУВ = 40°.

В работе [7] предложено использовать «штормовой зигзаг 12–60» при планировании переходов совместно с принятыми в морской практике плаванием по локсодромии и ортодромии при оптимизации океанского плавания судов. В работах [8]–[12] рассмотрены основные положения оптимизации времени и скорости переходов судов, а также принципы эффективной работы портовых комплексов и морских терминалов в зависимости от ритмичности поставок и безаварийной работы морского транспорта.

В настоящей работе продолжено исследование, целью которого является обоснование движения танкеров безопасными и эффективными «штормовыми зигзагами» для любых диапазонов курсовых углов при выполнении морских перевозок с учетом основных опасностей штормового плавания [13], [14].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Причины, приводящие к необходимости выполнения «штормового зигзага» при боковом волнении [13], [14], могут быть сведены к следующему: боковое волнение и волнение моря, к которому можно отнести волнение, действующее на танкер с КУВ = 60–130°. Причины, приводящие к необходимости изменения курса судна и, следовательно, КУВ, в штормовых условиях при бортовом волнении, в соответствии с положениями [13], определяются следующими видами опасностей (рис. 1–3).

1. Опасность попадания в зону усиленной бортовой качки (КУВ = 78–102°).

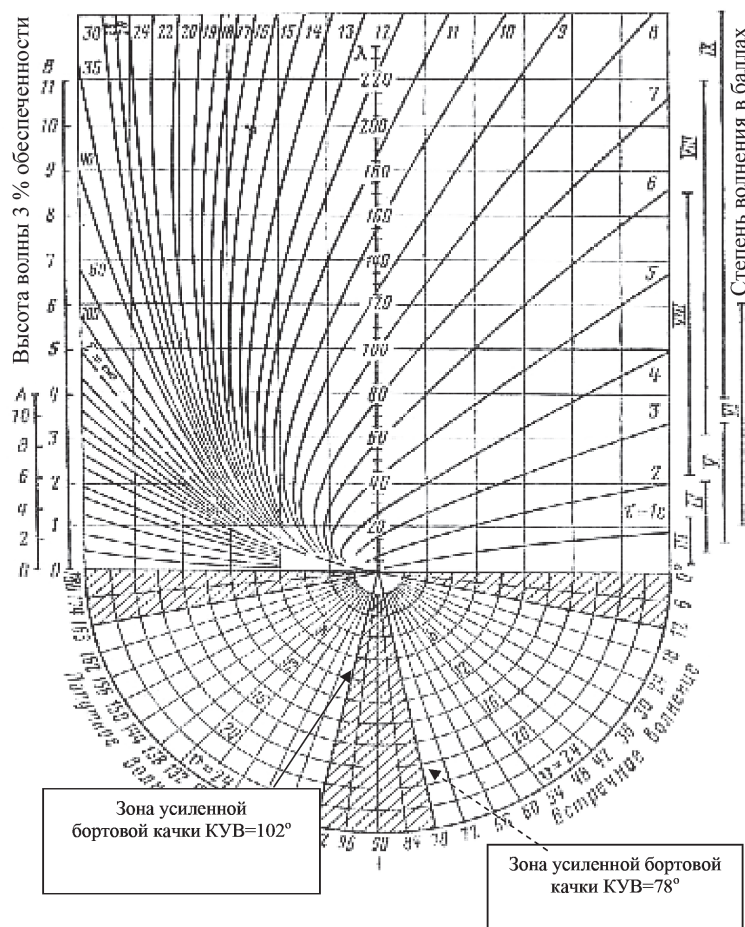
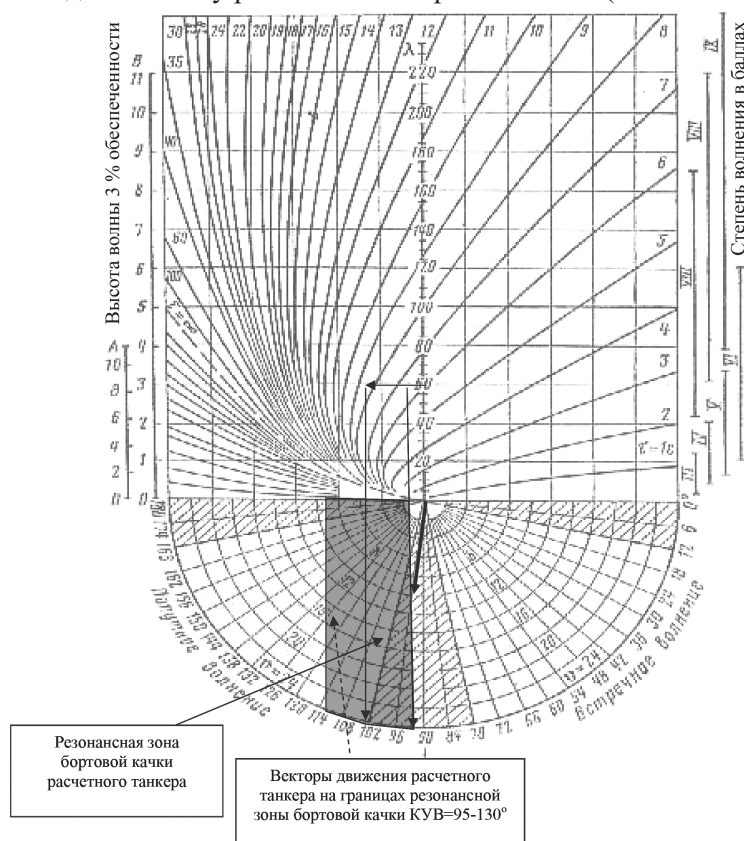


Рис. 1. Зона усиленной бортовой качки на диаграмме Ю. В. Ремеза (КУВ = 78–102°)

Зона усиленной бортовой качки, обозначенная штриховкой на диаграмме Ю. В. Ремеза, находится в зоне КУВ = 78–102° для всех типов судов и всех скоростей движения судна (см. рис. 1).

2. Опасность попадания в зону резонанса по бортовой качке (КУВ = 95–130° (рис. 2)).

а)



б)

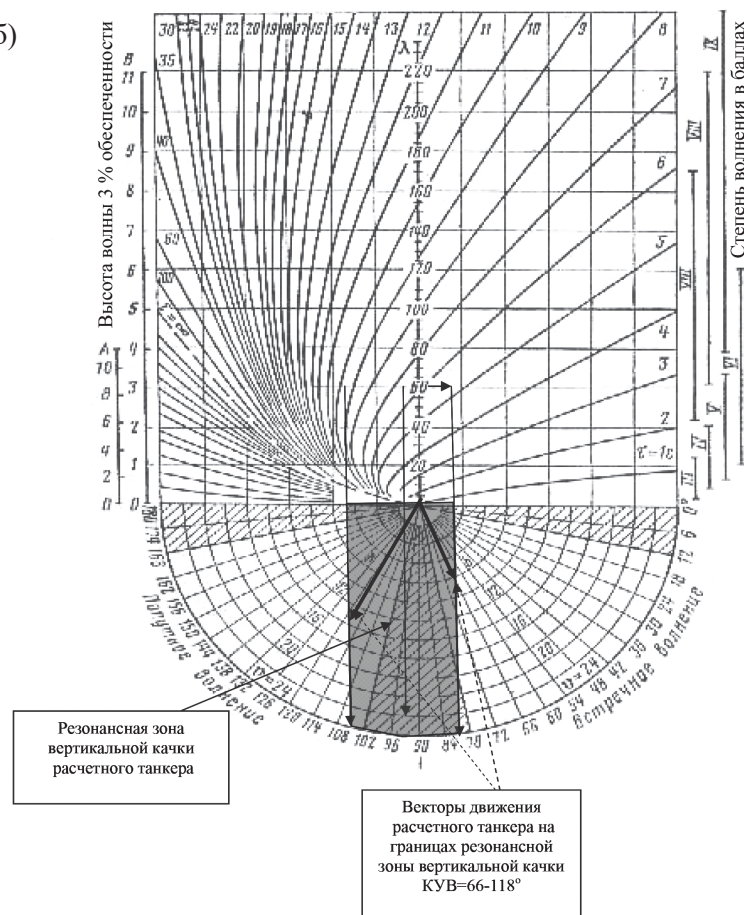


Рис. 2. Резонансная зона вертикальной качки расчетного танкера на диаграмме Ю. В. Ремеза: а — КУВ = 95–130°; б — КУВ = 66–118°

На рис. 2, а приведена резонансная зона бортовой качки расчетного танкера, характеристики которой представлены в [3], [5], [6]. Границы резонансной зоны бортовой качки с учетом векторов скорости расчетного танкера находятся на КУВ = 95–130°.

3. Опасность попадания в зону резонанса по вертикальной качке (КУВ = 66–118° (рис. 2, б)). На рис. 2, б показана резонансная зона вертикальной качки расчетного танкера, границы которой с учетом векторов скорости расчетного танкера находятся на КУВ = 66–118°. Как видно из результатов расчета, представленных на рисунке, в определенных диапазонах КУВ может возникать сочетание опасностей, связанное с одновременным попаданием в зону усиленной бортовой качки (КУВ = 78–102°) резонанса по различным видам качки (КУВ = 95–130° на рис. 1 и 2). Это сочетание многократно увеличивает опасность для судна, поэтому таких КУВ судам необходимо избегать в первую очередь.

Как показали результаты систематических расчетов и результаты, представленные на рис. 1–3, можно избежать основных опасностей бортового волнения и сочетания опасных КУВ в случае, если танкер при движении будет находиться на КУВ = 60–70° и КУВ = 120–130°. Таким образом, становится целесообразным выполнение «штормового зигзага 60–120° или 70–130°» для обеспечения безопасного движения танкера в условиях бокового волнения. Дополнительным преимуществом выполнения «штормовых зигзагов 60–120° или 70–130°» является значительное увеличение скорости движения танкера при переходе от КУВ = 60–70° до КУВ = 120–130° (рис. 3) [5]. Так, изменение скорости танкера при переходе от КУВ = 60° к КУВ = 130° дает возможность обоснованно предположить, что переход от КУВ = 60–70° к КУВ = 120–130° при выполнении «штормового зигзага» позволяет не снижать, а, возможно, даже увеличивать скорость перехода танкера по первоначальному направлению движения (первоначальному значению ИК или ПУ).

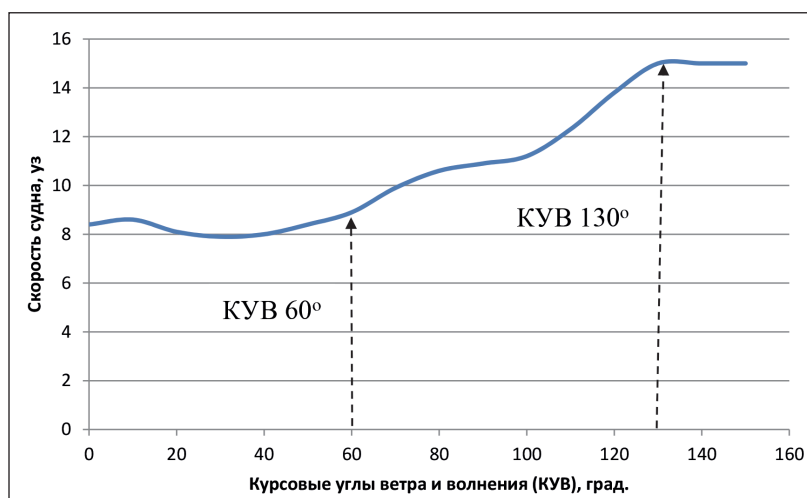


Рис. 3. Изменение скорости движения расчетного танкера при изменении курса (выполнении зигзага) с КУВ = 60° ($V_T = 9$ уз) на КУВ = 130° ($V_T = 15$ уз)

Основная задача способа эффективного и безопасного маневрирования танкера в условиях шторма (выполнения эффективного и безопасного «штормового зигзага») заключается в том, чтобы обеспечить безопасные условия штормового плавания с минимальным отходом от первоначального пути и наименьшим снижением скорости при движении по первоначальному пути (заданному истинному курсу и / или путевому углу).

Эффективный «штормовой зигзаг 60–120» танкера в шторм может определяться исходя из следующих условий:

1. На диаграмме Ю. В. Ремеза (см. рис. 1 и 2) показано, что нахождение расчетного танкера на КУВ = 60–120° позволяет избежать зон резонанса по бортовой и вертикальной качке, а также нахождения в зоне усиленной бортовой качки.

2. Переход танкера с $KУВ = 60^\circ$ на $KУВ = 120^\circ$ позволяет увеличить скорость движения танкера с 9 уз до 14 уз (см. рис. 3), что дает возможность избежать потерь скорости при движении по основному ИК или ПУ.

Таким образом, при выполнении «штормового зигзага 60–120» движение танкера будет эффективным (без потерь скорости) и безопасным (без попадания в опасные зоны резонанса и усиленной бортовой качки (см. рис. 1 и 2). Для детального рассмотрения применения «штормового зигзага 60–120» необходимо предположить, что судно изначально следует ИК = ПУ = 0° и на $KУВ = 90^\circ$ оно испытывает усиленную бортовую качку (см. рис. 1). Схематично это движение судна можно представить в виде рис. 4 аналогично [5].

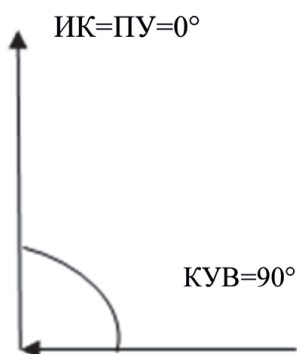
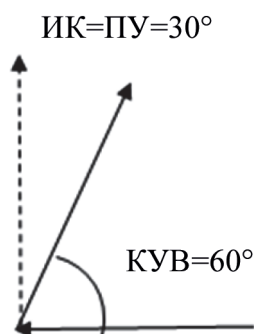


Рис. 4. Первоначальное расположение судна ИК = ПУ = 0° и курсового угла ветра и волнения КУВ = 90°

Для улучшения состояния качки танкера изменяет свой курс так, чтобы его КУВ был равен 60° . Схематично это движение судна представлено на рис. 5, а.

а)



б)

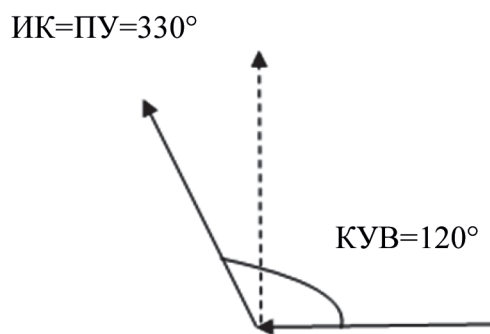


Рис. 5. Изменение курса судна: а — вправо на ИК = $0^\circ + 30^\circ = 30^\circ$ для получения курсового угла ветра и волнения (КУВ = 60°); б — влево на КУВ = 120° или ИК = 330° для получения курсового угла ветра и волнения КУВ = 120° , а также возврата к первоначальной линии пути (ИК = ПУ = 0°)

Для того чтобы не уйти далеко от первоначального пути (первоначальный ИК = ПУ = 0°), танкер должен через некоторое время перейти на КУВ = 120° (ИК = ПУ = 330°) с тем, чтобы вернуться на первоначальную линию пути: ПУ = 0° (рис. 5, б). После возврата к первоначальной линии пути ИК = ПУ = 0° «штормовой зигзаг 60–120» может быть выполнен повторно.

В соответствии с методикой, представленной в [5] для «штормового зигзага 12–60», с целью сравнения эффективного и безопасного «штормового зигзага 60–120» и плавания танкера на КУВ = 90° (без изменения курса в зоне усиленной бортовой качки) будем использовать сравнительную схему расчета, приведенную в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнительная схема расчета параметров эффективного
и безопасного «штормового зигзага 60–120»**

Название маневра и его параметры	Значение
Маневр 60 «Поворот направо, КУВ = 60 град.»:	
КУВ, град.	90,0
Направление ИК (ПУ), град.	0,0
Изменение КУВ, град.	30,0
Изменение ИК, град.	30,0
Скорость, уз	9,0
Время, ч	0,9
Расстояние, мили	8,1
Движение по курсу (ПУ = 0), мили	7,0
Снос поперек курса (ПУ = 0), мили	4,1
Маневр 120 «Поворот налево, КУВ = 120 град.»:	
КУВ, град.	120,0
Изменение курса, град.	–60,0
Внутренний угол для расчета	–30,0
Скорость, уз	14,0
Время, ч	1,1
Расстояние, мили	15,4
Движение по курсу (ПУ = 0), мили	13,3
Снос поперек курса (ПУ = 0), мили	–7,7
Суммарное движение по курсу с эффективным «штормовым зигзагом» (без опасностей шторма), мили	20,4
Скорость с КУВ = 90, уз	10,6
Без маневра с КУВ = 90 град (с опасностями штормового плавания), мили	21,2

Как следует из результатов табл. 1, предложенный способ осуществления эффективного «штормового зигзага 60–120» позволяет не только избежать основных опасностей штормового плавания за счет безопасного маневрирования, но и совершать переход по заданному направлению (ПУ = 0°) без значительной потери пройденного расстояния.

Эффективный «штормовой зигзаг 60–130» танкера может определяться исходя из следующих факторов:

1. На диаграмме Ю. В. Ремеза показано (см. рис. 1 и 2), что нахождение расчетного танкера на КУВ = 60–130° позволяет избежать зон резонанса по бортовой и вертикальной качке, а также нахождения в зоне усиленной бортовой качки.

2. Переход танкера с КУВ = 60° на КУВ = 130° позволяет увеличить скорость движения танкера с 9 уз до 15 уз (см. рис. 3), что дает возможность избежать потерь скорости при движении по основному ИК или ПУ в процессе выполнения «штормового зигзага 60–130».

Таким образом, при выполнении «штормового зигзага 60–130» движение танкера будет эффективным (без значительных потерь скорости) и безопасным (без попадания в опасные зоны резонанса и усиленной бортовой качки). Для детального рассмотрения применения «штормового зигзага 60–130» необходимо предположить, что судно изначально следует ИК = ПУ = 0° и на КУВ = 90° испытывает усиленную бортовую качку (см. рис. 1). Схематично это движение судна можно представить в виде рис. 6.

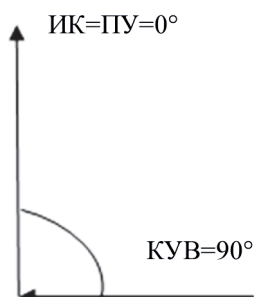


Рис. 6. Первоначальное расположение судна ИК = ПУ = 0° и курсового угла ветра и волнения КУВ = 90°

Для улучшения состояния качки танкера изменяет свой курс так, чтобы его КУВ был равен 60°. Схематично это движение судна можно представить в виде рис. 7, а.

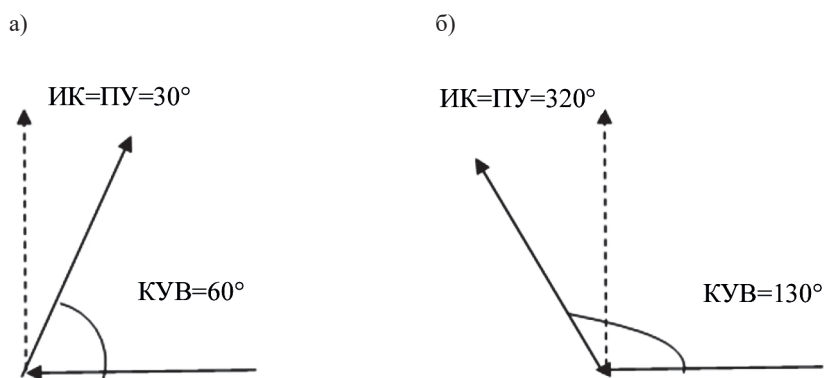


Рис. 7. Изменение курса судна: а — вправо на ИК = 0° + 30° = 30° для получения курсового угла ветра и волнения КУВ = 60°; б — влево на ПУ или ИК = 320° для получения курсового угла ветра и волнения КУВ = 130°, а также возврата к первоначальной линии пути (ИК = ПУ = 0°)

Для того чтобы не уйти далеко от первоначального пути (первоначальный ИК = ПУ = 0°), танкер должен через некоторое время перейти на КУВ = 130° (ИК = ПУ = 320°) с тем, чтобы вернуться на первоначальную линию пути ПУ = 0° (рис. 7, б). После возврата к первоначальной линии пути ИК = ПУ = 0° «штормовой зигзаг 60–130» может быть выполнен повторно.

С целью сравнения эффективного и безопасного «штормового зигзага 60–130» и плавания танкера на КУВ = 90° (без изменения курса в зоне усиленной бортовой качки) используем сравнительную схему расчета, приведенную в табл. 2.

Таблица 2

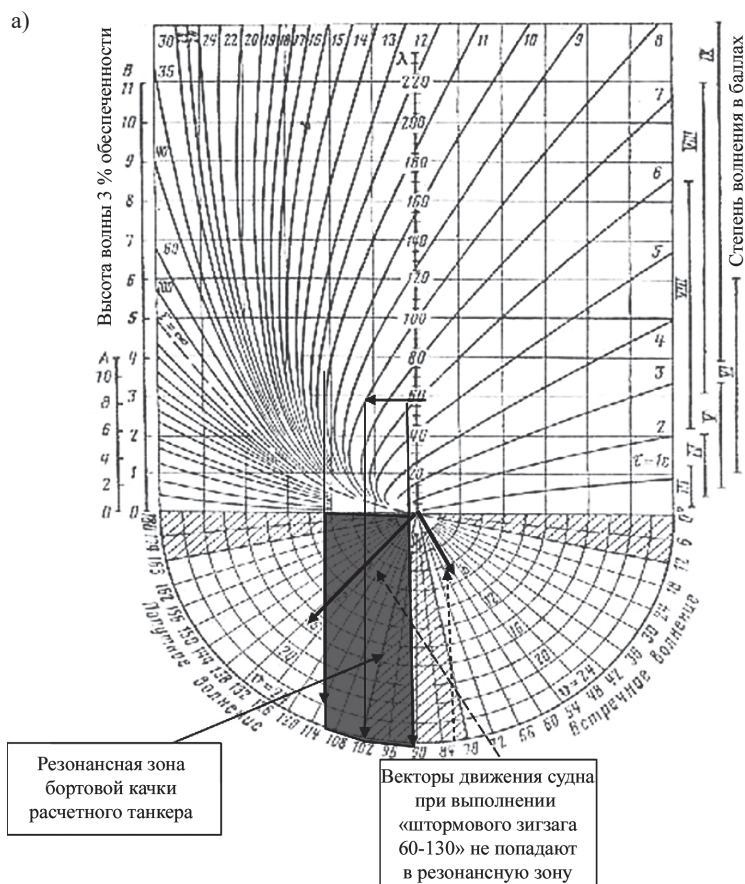
Сравнительная схема расчета параметров эффективного и безопасного «штормового зигзага 60–130»

Название маневра и его параметры	Значение
Маневр 60 «Поворот направо, КУВ = 60°»:	
КУВ, град.	90,0
Направление ИК (ПУ), град.	0,0
Изменение КУВ, град.	30,0
Изменение ИК, град.	30,0
Скорость, уз	9,0
Время, ч	0,9

Таблица 2
(Окончание)

Расстояние, мили	8,1
Движение по курсу (ПУ = 0), мили	7,0
Снос поперек курса (ПУ = 0), мили	4,1
Маневр 130 «Поворот направо, КУВ = 130°»:	
КУВ, град.	130,0
Изменение курса, град.	-70,0
Внутренний угол для расчета	-40,0
Скорость, уз	15,0
Время, ч	1,1
Расстояние, мили	16,5
Движение по курсу (ПУ = 0), мили	12,6
Снос поперек курса (ПУ = 0), мили	-10,6
Суммарное движение по курсу с эффективным штормовым зигзагом (без опасностей шторма), мили	19,7
Скорость с КУВ = 90 уз	10,6
Без маневра с КУВ = 90 град (с опасностями штормового плавания), мили	21,2

Как следует из результатов, приведенных в табл. 1 и 2, предложенный способ осуществления эффективных «штормовых зигзагов 60–120 и 60–130» позволяет не только избежать основных опасностей штормового плавания за счет безопасного маневрирования, но и совершать переход по заданному направлению (ПУ = 0°) без значительной потери пройденного расстояния. Оценка безопасности «штормового зигзага 60–130» на боковом волнении с точки зрения попадания в резонанс по различным видам качки приведена на рис. 8.



б)

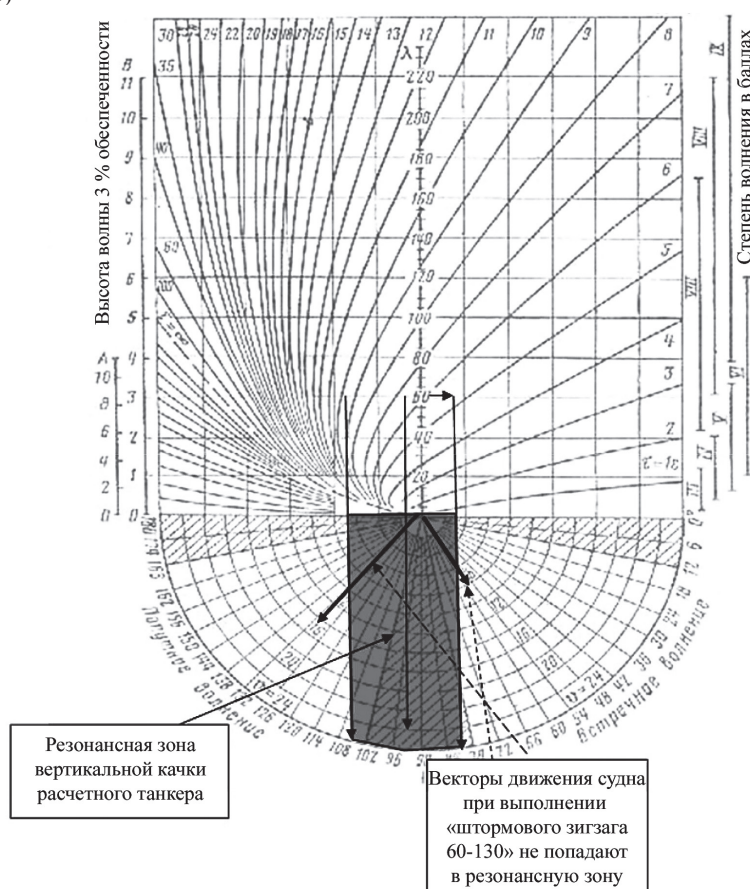


Рис. 8. Оценка положения танкера при выполнении «штормового зигзага 60–130» относительно рассчитанных резонансных зон:
а — бортовой качки; б — вертикальной качки

Оценка опасности попадания в резонанс по различным видам качки может быть выполнена путем построения резонансных зон на диаграмме Ю. В. Ремеза и определения положения танкера при выполнении «штормового зигзага 60–130». Векторы движения расчетного танкера не попадают в резонансные зоны по бортовой и вертикальной качке (см. рис. 8). Движение танкера при выполнении «штормового зигзага 60–130» является безопасным с точки зрения попадания в резонанс по основным видам качки. В том случае, если КУВ = 130° попадает в резонансную зону по отдельным видам качки, его значение может быть увеличено до КУВ = 135°. Таким образом, безопасный «штормовой зигзаг 60–130» может быть преобразован в «штормовой зигзаг 60–135» без потери скорости перехода (см. рис. 4).

В работе [13] показано, что наиболее вероятным является возникновение опасного слеминга и слеппинга на КУВ = 30–40°. Для решения проблем обеспечения безопасности танкера при выполнении «штормовых зигзагов» удобно использовать изображение зоны возможного слеминга и слеппинга на диаграмме Ю. В. Ремеза. Оценка положения танкера при выполнении «штормового зигзага 60–130» относительно зоны возможного слеминга и слеппинга расчетного танкера, приведенная на рис. 9, показывает, что параметры движения расчетного танкера при выполнении «штормового зигзага 60–130» не попадают в опасную зону. Таким образом, выполнение «штормового зигзага 60–130» делает движение танкера безопасным от возможного возникновения слеминга и слеппинга.

Анализ безопасности и эффективности выполнения «штормовых зигзагов» на всем диапазоне курсовых углов ветра и волнения от КУВ = 0–180° с учетом [13], [14] позволяет предложить универсальную диаграмму безопасного и эффективного маневрирования танкеров путем выполнения этих маневров.

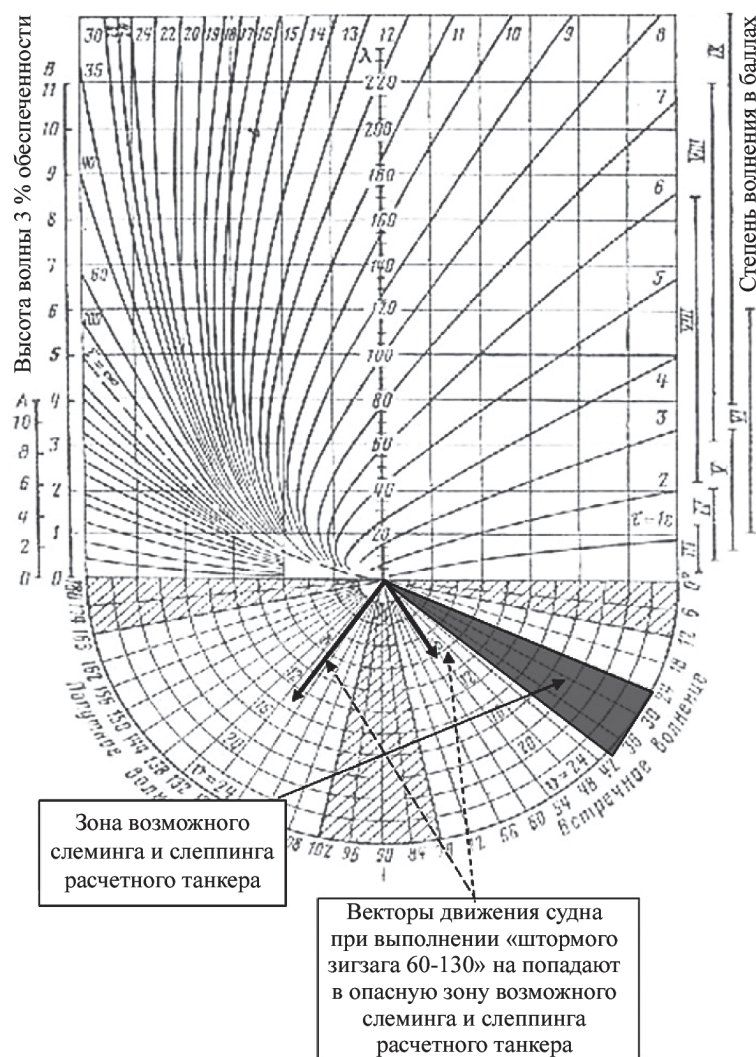


Рис. 9. Оценка положения танкера при выполнении «штормового зигзага 60–130» относительно зоны возможного слеминга и слеппинга расчетного танкера

Общий вид предлагаемой универсальной диаграммы штормового плавания для определения параметров «штормовых зигзагов» танкеров приведен на рис. 10. На внешней границе универсальной штормовой диаграммы показаны стрелки, характеризующие «попадание» танкера в определенные диапазоны КУВ, определяемые в соответствии с первоначальным направлением движения судна и волнения. На внутренней части диаграммы показаны параметры рекомендованного «штормового зигзага», позволяющего снизить опасность штормового плавания в данном диапазоне КУВ, максимально сохранив скорость движения судна по первоначальному направлению движения.

С учетом данных, приведенных в источниках [1]–[7], [13], способ использования и корректировки универсальной диаграммы безопасного и эффективного маневрирования танкеров в условиях шторма путем выполнения «штормовых зигзагов» (см. рис. 10) заключается в следующем.

1. В условиях развивающегося ветрового волнения и шторма определяется КУВ ветра и волнения. Для этого может использоваться пеленгатор и репитер гирокомпаса на крыле ходового мостика. Характерными признаками развивающегося ветрового волнения является практическое полное совпадение КУВ ветра и волнения. При этом на водной поверхности видны характерные «барашки» ветровых волн.
2. На внешней границе универсальной диаграммы наносится найденное значение КУВ (примером служат голубые стрелки на внешней границе универсальной диаграммы — см. рис. 10).

3. Определяется диапазон курсовых углов ветра и волнения, в который «попадает» измеренный КУВ. При этом на универсальной диаграмме (см. рис. 10), используются следующие обозначения:

«12–12» — рекомендуется «штормовой зигзаг 12–12°», позволяющий снизить опасность килевой и вертикальной качки на встречном волнении без существенного снижения скорости движения судна по заданному ПУ (см. [5], [13]);

«12–60» — рекомендуется «штормовой зигзаг 12–60°», позволяющий избежать значительного снижения скорости и опасности бортового слеминга, а также сохранить скорость движения судна по заданному ПУ (см. рис. 1–6, табл. 1);

«60–130» — рекомендуется штормовой зигзаг «60–130°» (см. рис. 7–10, табл. 2);

«60–135» — рекомендуется штормовой зигзаг «60–135°» (при «попадании» КУВ = 130° в резонансные зоны по различным видам качки, см. рис. 7–10);

«135–135» — рекомендуется «штормовой зигзаг 135–135°» (см. [1], [13]) для судов с пониженной остойчивостью и танкеров в аварийной ситуации);

«168–168» — рекомендуется штормовой зигзаг «168–168°» (см. [1], [13]).

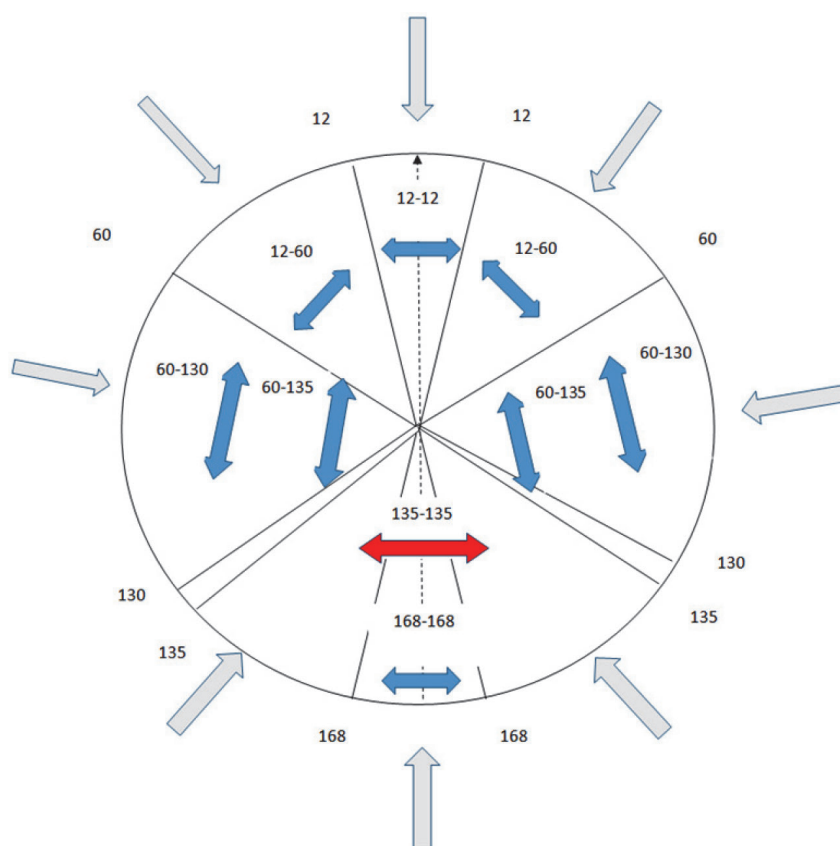


Рис. 10. Универсальная диаграмма безопасного и эффективного маневрирования танкеров в условиях шторма путем выполнения «штормовых зигзагов»

4. Определяются навигационные ограничения для выполнения рекомендованного штормового зигзага.

5. Выполняется рекомендованный из универсальной диаграммы штормовой зигзаг.

6. При выполнении штормового зигзага контролируется скорость танкера для уточнения зависимости скорости от КУВ (см. рис. 4 с использованием [3]).

7. Уточняются данные универсальной диаграммы эффективного и безопасного маневрирования танкеров в условиях шторма (см. рис. 10) для последующего использования.

Обсуждение (Discussion)

Преодоление последствий ограничений, вызванных эпидемией COVID-19, в сфере морского транспорта возможно при обеспечении безопасности судоходства, а также реализации ритмичных и своевременных поставок грузов в порты и терминалы.

Большая часть морских перевозок осуществляется в условиях штормового плавания, что увеличивает риск возникновения аварий и задержки доставки грузов. Интенсивное внедрение современных технологий во все сферы деятельности современного морского флота до недавнего времени не затрагивало проблемы штормового плавания. Предложенные в настоящей статье, а также в более ранних работах авторов исследования способы штормования с использованием «штормовых зигзагов» позволяют обеспечить эффективность и безопасность маневрирования танкеров в условиях шторма. Использование этих маневров дает возможность использования выбора океанских путей и маневров, которые позволяют решать комплексную задачу — одновременно обеспечивать условия безопасности и сохранять скорость движения по заданному направлению движения.

Полученные в настоящей статье выводы совпадают с данными авторов других работ о возможности определения способов штормового плавания, обеспечивающих безопасность и сохранение скорости при переходе судов по заданному пути.

Результаты настоящей работы могут быть использованы для развития методов обеспечения безопасности и сохранения скорости при плавании в шторм с учетом особенностей танкеров и судов других типов, а также оптимизации рейсовых расходов.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотренный в настоящей статье способ использования «штормовых зигзагов» для обеспечения безопасного и эффективного маневрирования танкеров показывает возможность решения проблем безопасности и сохранения скорости движения судна по выбранному пути в условиях штормового плавания.
2. Предложены способы определения параметров «штормовых зигзагов» на различных курсовых углах ветра и волнения с использованием универсальной диаграммы безопасного и эффективного маневрирования танкеров в условиях шторма путем выполнения соответствующих маневров.
3. Предложены методы уточнения и совершенствования универсальной диаграммы безопасного и эффективного маневрирования танкеров в условиях шторма путем выполнения «штормовых зигзагов» на основании измерения скорости и оценки безопасности конкретного «штормового зигзага» судна.
4. Предлагаемые в настоящей статье методы обеспечения безопасности и сохранения скорости при штормовом плавании путем выполнения «штормовых зигзагов» могут быть распространены на другие типы судов, что позволит обеспечить безопасность и эффективность их плавания в штормовых условиях.
5. Результаты настоящей статьи позволяют оптимизировать рейсовые расходы и уменьшить ходовое время в условиях штормового плавания при грузовых и балластных переходах танкеров и других типов судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ершов А. А.* Способы автоматизации штормового плавания судна / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 4. — С. 62–64.
2. *Бояринов А. М.* Анализ применимости формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов / А. М. Бояринов, А. А. Ершов, С. М. Пылаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1168–1174. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1168-1174.
3. *Ершов А. А.* Способы увеличения скорости и экономии топлива танкера при штормовом плавании / А. А. Ершов, П. И. Буклис // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1122–1131. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1122-1131.

4. Ершов А. А. Практические способы расхождения танкера со штормом / А. А. Ершов, С. Ю. Развозов, П. И. Буклис // Сборник тезисов докладов национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — С. 81–83.

5. Ершов А. А. Способы эффективного маневрирования танкера в условиях шторма / А. А. Ершов, П. И. Буклис, С. Ю. Развозов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 515–525. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-515-525.

6. Ершов А. А. Использование маневра «12–60» для безопасного и эффективного маневрирования танкера в шторм / А. А. Ершов, П. И. Буклис, С. Ю. Развозов // Приоритетные направления научных исследований. Анализ, управление, перспективы: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Челябинск, 02 февраля 2021 г.). — Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2021. — С. 59–60.

7. Нуриев Р. А. Процедура выбора оптимального пути океанского перехода при штормовом плавании / Р. А. Нуриев, А. А. Ершов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 625–635. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-625-635.

8. Чертков А. А. Автоматизация выбора кратчайших маршрутов судов на основе модифицированного алгоритма Беллмана – Форда / А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.

9. Бодровцева Н. Ю. Систематизация факторов и показателей оценки конкурентоспособности морских портов / Н. Ю. Бодровцева // Транспортное дело России. — 2017. — № 2. — С. 105–109.

10. Русинов И. А. Опыт Японии в области регулирования линейного судоходства / И. А. Русинов, И. А. Гаврилова, А. Г. Нелогов // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15. — № 1 (68). — С. 150–160.

11. Степанов А. Развитие портов и контейнерных терминалов / А. Степанов, О. Вербило // Логистика. — 2017. — № 3 (124). — С. 25–33.

12. Плотников С. Н. Модель прохождения судов через участок водного пути формирующая расписание в процессе своего выполнения / С. Н. Плотников, В. Е. Марлей // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. — 2017. — Т. 79. — № 1 (71). — С. 114–118. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-1-114-118.

13. Липис В. Б. Безопасные режимы штормового плавания судов: справ.-практ. пособие / В. Б. Липис, Ю. В. Ремез. — М.: Транспорт, 1982. — 117 с.

14. Stewart R. Introduction to Physical Oceanography / R. Stewart. — Texas: Department of Oceanography Texas A&M University, 2008. — 353 p.

REFERENCES

1. Ershov, A. A., and A. V. Terenchuk. “Ways to automate storm navigation of the vessel.” *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 4 (2015): 62–64.

2. Boyarinov, Alexander M., Andrey A. Ershov, and Sergey M. Pylyayev. “Analysis of the applicability of the formulas the calculation of the loss of ships speed due to wind and waves.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Mararova* 9.6 (2017): 1168–1174. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1168-1174.

3. Ershov, Andrey A., and Peter I. Buklis. “Ways to increase speed and save fuel tanker in storm conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1122–1131. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1122-1131.

4. Ershov, A. A., S. Yu. Razvozov, and P. I. Buklis. “Prakticheskie sposoby raskhozhdeniya tankera so shtormom.” *Sbornik tezisev dokladov natsional’noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel’skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admiral S. O. Makarova»*. Spb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019. 81–83.

5. Ershov, Andrey A., Peter I. Buklis, and Sergey Yu. Razvozov. “Ways to effectively maneuver a tanker in a storm.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.3 (2020): 515–525. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-515-525.

6. Ershov, A. A., P. I. Buklis, and S. Yu. Razvozov. “Ispol’zovanie manevra «12–60» dlya bezopasnogo i effektivnogo manevrirovaniya tankera v shtorm.” *Prioritetnye napravleniya nauchnykh issledovaniy. Analiz, upravlenie, perspektivy: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ufa: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost’yu «OMEGA SAINS»*, 2021. 59–60.

7. Nuriev, Ramazan A., and Andrey A. Ershov. "Procedure for choosing the optimal ocean route when gale." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 625–635. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-625-635.
8. Chertkov, Alexander A. "Automation selection shortcuts routes of ships on the basis of modified BellmanFord Algorithm." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.
9. Bodrovteva, N. "Systematization of an assessment factors and indicators of the seaports competitiveness." *Transport business of Russia* 2 (2017): 105–109.
10. Rusinov, Igor A., Irina A. Gavrilova, and Andrey G. Nelogov. "Japan's experience in governing liner shipping." *World of Transport and Transportation* 15.1(68) (2017): 150–160.
11. Stepanov, A., and O. Verbilo. "Razvitie portov i konteynernykh terminalov." *Logistika* 3(124) (2017): 25–33.
12. Plotnikov, S. N., and V. E. Marlei. "Model of passage of vessels through the waterway section forming the schedule in the course of its implementation." *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies* 79.1(71) (2017): 114–118. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-1–114-118.
13. Lipis, V. B., and Yu. V. Remez. *Bezopasnye rezhimy shtormovogo plavaniya sudov. Spravochno-prakticheskoe posobie*. M.: Transport, 1982.
14. Stewart, R. *Introduction to Physical Oceanography*. Texas: Department of Oceanography Texas A&M University, 2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ершов Андрей Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru
Буклис Петр Игоревич — аспирант
Научный руководитель:
Развозов Сергей Юрьевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: petyunyaaa@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru
Развозов Сергей Юрьевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_mus@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov, Andrey A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru
Buklis, Peter I. — Postgraduate
Supervisor:
Razvozov, Sergey Yu.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: petyunyaaa@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru
Razvozov, Sergey Yu. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_mus@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 13 января 2022 г.
Received: January 13, 2022.

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-55-62

FORMALIZATION OF THE CONSTRAINT INDICATOR OF THE NORTHERN SEA ROUTE WATER AREA

E. V. Andreeva, A. L. Tezikov

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

A formalized assessment of the constraint of the Northern Sea Route water area is developed in the paper. The connection of the research topic with the tasks of designing shipping routes in the waters of the Arctic seas, the choice of safe routes and the issues of ship management in narrows is established. The list of the main factors affecting the constraint of the Northern Sea Route includes shores, dangerous depths and isobaths, forbidden zones, areas with insufficient hydrographic knowledge of the bottom relief and dangerous ice formations. The formalization of the constraint index is carried out by methods developed in the theory of stochastic geometry. The concepts of geometric measure of water area constraint and indicator of water area constraint are introduced. The geometric measure of constraint is used as a characteristic of the water area and does not depend on the maneuverability properties of vessels. The constraint indicator takes into account the ratio of the water area properties and the maneuverability characteristics of vessels. It is proposed, along with the general indicators of the water area constraint, to use private indicators that allow separately taking into account the impact of potentially dangerous objects located on both sides of the projected route. The functional relationship of the geometric measure of the water area constraint with the distance to dangerous objects, with their geometric shape and size is established. The conditions under which the distance to dangerous objects can be used as a measure of constraint are formulated. The results of a comparative assessment of the water area constraint of the Vilkitsky Strait using generalized and partial indicators are presented. A comparative quantitative assessment of the constraint of three navigable zones of the strait is carried out. The regularities of changes in quantitative indicators of individual shipping routes and points on the route are investigated. Recommendations on the developed method use are given. The direction of further research has been determined.

Keywords: Northern Sea Route, shipping routes, measure of constraint, Vilkitsky Strait, stochastic geometry.

For citation:

Andreeva, Ekaterina V., and Aleksandr L. Tezikov. "Formalization of the constraint indicator of the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-55-62.

УДК 528.47

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ СТЕСНЕННОСТИ АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков

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

Исследование посвящено разработке формализованной оценки стесненности акватории Северного морского пути. Установлена связь темы исследования с задачами проектирования судоходных маршрутов в акватории арктических морей, выбором безопасных маршрутов и вопросами управления судна в узкостях. К перечню основных факторов, оказывающих влияние на стесненность акватории Северного морского пути, относятся берега, опасные глубины и изобаты, запретные зоны, области с недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна и опасные ледовые образования. Формализация показателя стесненности выполнена методами, разработанными в теории стохастической геометрии. Введены понятия «геометрической меры стесненности акватории» и «показателя стесненности акватории». Отмечается, что геометрическая мера стесненности используется в качестве характеристики акватории и не зависит от маневренных свойств судов. Показатель стесненности учитывает соотношение свойств акватории и маневренных характеристик судов. Предложено наряду с общими показателями стесненности акватории использовать

частные показатели, позволяющие отдельно учитывать влияние потенциально опасных объектов, расположенных по обеим сторонам от проектируемого маршрута. Установлена функциональная связь геометрической меры стесненности акватории с расстоянием до опасных объектов, их геометрической формой и размерами. Сформулированы условия, при которых расстояние до опасных объектов может использоваться в качестве меры стесненности. Приведены результаты сравнительной оценки стесненности акватории пролива Вилькицкого с использованием обобщенных и частных показателей. Выполнена сравнительная количественная оценка стесненности трех судоходных зон пролива. Исследованы закономерности изменения количественных показателей отдельных судоходных маршрутов и точек на маршруте. Даны рекомендации по использованию разработанного метода. Определено направление дальнейших исследований.

Ключевые слова: Северный морской путь, судоходные маршруты, мера стесненности, пролив Вилькицкого, стохастическая геометрия.

Для цитирования:

Андреева Е. В. Формализация показателя стесненности акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-55-62.

Введение (Introduction)

Тема проведенного исследования связана с выбором безопасных маршрутов плавания судов в арктических водах [1], [2]. В процессе решения этой задачи отдельно рассматриваются соотношение осадки судов с глубинами на маршруте, гидрографическая изученность рельефа дна в зоне маршрута, соотношение ледовой проходимости судов с толщиной ледового поля, а также ширины полосы движения судна с шириной зоны безопасного маневрирования акватории. Последний из указанных факторов характеризует стесненность акватории.

К районам со стесненными условиями обычно относятся участки акватории, на которых суда ограничены в возможности маневрирования из-за близости берегов и других навигационных опасностей [3]. Считается, что для морских судов такие ограничения действуют на расстояниях менее 3–5 миль от навигационных опасностей. По этой причине расстояние до навигационных опасностей используется в качестве основного количественного показателя. В работе [4] показано, что расстояние до препятствия может использоваться как частная характеристика навигационной безопасности судоходных маршрутов. Расстояние до препятствия не учитывает протяженность препятствия и его форму. Понятие «стесненная акватория» обычно используется по отношению к условиям плавания судов в узкостях и на мелководье без учета ледовых условий.

Результаты гидрографических и гидрометеорологических исследований морей Арктики, а также опыт полярного судоходства свидетельствуют о том, что акватория Северного морского пути (СМП) изобилует подводными навигационными опасностями в виде отмелей, банок, подводных камней и скал [5]. Кроме того, большую часть года она покрыта льдами, среди которых особую навигационную опасность представляют толстые многолетние льды, айсберги, стамухи, торосы и зоны ледового сжатия [6], [7]. К факторам, ограничивающим возможность маневрирования судов в акватории СМП, также относятся запретные зоны, зоны безопасности и границы акваторий с недостаточной гидрографической изученностью. Наличие большого количества навигационных опасностей создает особо тяжелые условия судоходства, которые могут быть определены как крайне стесненные.

В этой связи формализация показателя стесненности судоходных маршрутов акватории СМП представляется актуальной. Формализация показателя стесненности предполагает разработку методики количественной оценки влияния на навигационные характеристики судоходных маршрутов множества разнородных препятствий с учетом их размеров и формы при решении задач трех уровней:

- 1-й уровень — тактика плавания судов;
- 2-й уровень — выбор оптимальных маршрутов;
- 3-й уровень — проектирование маршрутов.

К наиболее разработанному направлению относятся задачи первого уровня, составляющие основу практики управления морским судном [3]. При решении задач обеспечения безопасного дви-

жения в узкостях и задач расхождения судов в качестве критерия используется отношение размеров акватории к диаметру циркуляции судна. В соответствии с этим критерием акватория считается стесненной, если ее размеры не превышают диаметр циркуляции данного судна. Направление второго и третьего уровней получили особенно активное развитие в последние десятилетия, на современном этапе развития судоходства в акватории СМП. В работах [8], [9] предложен метод формализации, основанный на принципах теории геометрических вероятностей [10]. Данный метод предназначен для использования при проектировании сети судоходных маршрутов.

Целью настоящей работы является использование метода оценки стесненности, основанного на принципах теории стохастической геометрии [11], при выборе оптимальных маршрутов в акватории СМП.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В теории геометрических вероятностей вероятность наступления некоторого события определяется отношением геометрической меры, выражающей количество благоприятных исходов, к геометрической мере, выражающей общее число всех возможных исходов данного события. В качестве геометрической меры используются длины, площади и объемы.

В качестве базовой задачи при оценке стесненности акватории используется задача стохастической геометрии [11] определения меры множества прямых линий, проходящих между двумя выпуклыми областями K_1 и K_2 . Для определения геометрической меры множества прямых линий необходимо найти разность между периметром скрещивающегося в точке O контура и периметров областей K_1 и K_2 , показанных на рис. 1.

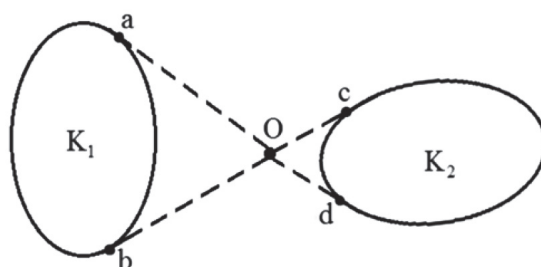


Рис. 1. Схема построения вспомогательных контуров относительно областей K_1 и K_2

На рис. 1 буквами a , b и c и d отмечены точки слияния контуров. С учетом равенства длин контуров в сливающихся зонах искомая мера определяется соотношением

$$M(K_1, K_2) = ad + cb - ab - cd, \quad (1)$$

где ad и cb — длины отрезков скрещивающегося контура; ab и cd — длины отрезков внутренней части контуров областей K_1 и K_2 .

В случае, когда область K_2 стягивается в точку c (рис. 2, a), отрезок $cd \rightarrow 0$, можно выражение (1) преобразовать к виду

$$M(K_1, K_2 \rightarrow c) = ad + cb - ab. \quad (2)$$

В случае, когда каждая из областей K_1 и K_2 стягиваются в точки a и c (рис. 2, b), соответственно, выражения (1) и (2) преобразуются к виду

$$M(K_1 \rightarrow a, K_2 \rightarrow c) = 2ac = 2D_0, \quad (3)$$

где D_0 — расстояние между точками a и c .

Из выражения (3) следует, что расстояние между объектами K_1 и K_2 может использоваться в качестве геометрической меры множества прямых линий, проходящих между двумя выпуклыми областями K_1 и K_2 при условии, что их форма и размеры не учитываются.

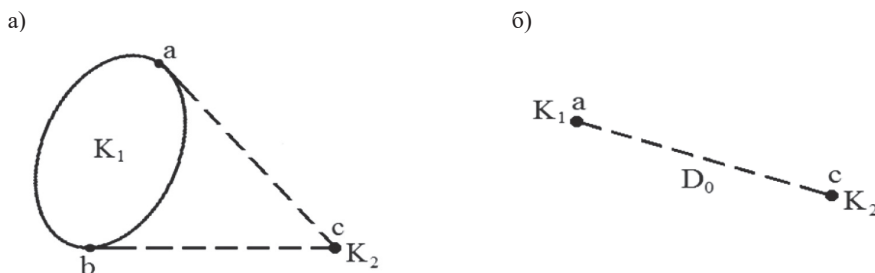


Рис. 2. Схемы вспомогательных контуров:
а — область K_2 вырождается в точку c ;
б — области K_1 и K_2 вырождаются в точки a и c

В выражениях (1)–(3) под множеством прямых линий понимаются линии, проходящие между объектами K_1 и K_2 в двух направлениях. С учетом этого мера стесненности области $M(K_1, K_2)$, расположенной между K_1 и K_2 , устанавливается соотношением

$$M_{st}(K_1, K_2) = 0,5M(K_1, K_2). \quad (4)$$

Переход от геометрической абстракции к навигационно-гидрографическому описанию объектов выполняется методом аналогий [12]:

- под множеством прямых линий, проходящих между объектами K_1 и K_2 , понимается множество возможных траекторий движения судов;
- под объектами K_1 и K_2 могут пониматься любые препятствия, ограничивающие способность судов маневрировать, в том числе опасные глубины, изобаты, ледовые образования, встречные суда, запретные для плавания зоны, морские платформы и др.

Выражение (1) позволяет получить оценку стесненности акватории одним числом без привязки к конкретным маршрутам судов, как показано в работах [8], [9]. Выражение (1) предназначено для выполнения сравнительной оценки отдельных проливов.

Мера стесненности M_{st} представляет собой характеристику акватории. Очевидно, что для судов разных типов и размерений степень стесненности акватории будет отличаться. На этом основании вводится показатель стесненности S_t , учитывающий маневренные характеристики конкретного судна. Показатель стесненности задается выражением

$$S_t = \frac{B_m}{M_{st}}, \quad (5)$$

где B_m — ширина полосы безопасного маневрирования заданного судна [13].

Показатель стесненности представляет собой безразмерную величину, тогда как мера стесненности выражается в линейных единицах.

Зависимости (2) и (5) могут использоваться для вычисления меры и показателя стесненности маршрута, обусловленной препятствиями, расположенными слева и справа от маршрута:

M_{st}^l, B_m^l, S_t^l — характеристики, относящиеся к левой стороне;

$M_{st}^{np}, B_m^{np}, S_t^{np}$ — характеристики, относящиеся к правой стороне;

D^l и D^{np} — минимальные расстояния от точки маршрута до препятствий, расположенных с левой и правой стороны от него. Выбор стороны определяется по направлению движения по маршрутам с запада на восток и с севера на юг.

Приведем результаты оценки стесненности прол. Вилькицкого, соединяющего Карское море и море Лаптевых. Длина пролива составляет около 70 миль, ширина в самом узком месте — 30,2 мили. К основным навигационным препятствиям относятся берег острова Большевик, северный берег п-ва Таймыр, а также о-ва Малый Таймыр, Комсомольской правды на востоке и четыре небольших о-ва Гейберга на западе, а также айсберги [14], обломки которых часто дрейфуют с востока на запад вдоль южного берега о-ва Большевик. Влияние айсбергов на стесненность при расчетах не учитывалось.

Схема прол. Вилькицкого приведена на рис. 3, а.

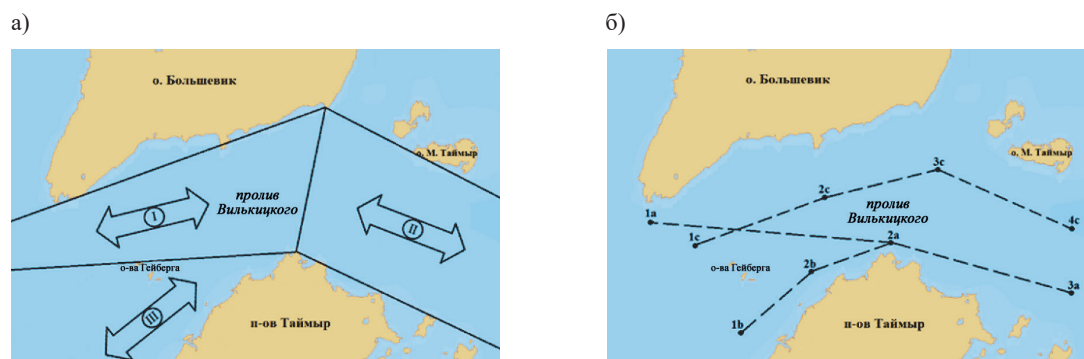


Рис. 3. Судходные зоны (а) и судходные маршруты (б) прол. Вилькицкого

На рис. 3, а стрелками выделены три судходные зоны: *I* — западная; *II* — восточная; *III* — южная. На рис. 3, б показаны три фрагмента судходных маршрутов *a*, *b* и *c*, проходящие через точки, для которых оценивалась стесненность.

Результаты (Results)

В табл. 1 приведены количественные характеристики стесненности трех судходных зон, показанных на рис. 3, а.

Таблица 1

Стесненность судходных зон

Номер зоны	Мера стесненности M_{st} , мили	Ширина зоны, мили
I	5,5	От 22 до 35
II	8,5	От 35 до 38
III	3,2	13

Стесненность акватории тем больше, чем меньше мера ее стесненности. На этом основании стесненность зоны *III* превышает стесненность зоны *I* в 1,7 раза, а зоны *II* — в 2,7 раза. Зоны *I* и *II* имеют форму четырехугольников с разными длинами противоположных сторон, поэтому ширина этих зон характеризуется ее граничными значениями. Зона *III* имеет форму прямоугольного четырехугольника, ширина которого определяется одним числом. Отношение ширины зон к значениям их мер стесненности находится в диапазоне от четырех до шести.

В табл. 2 указаны количественные показатели стесненности маршрутов *a*, *b* и *c*, приведенных на рис. 3, б.

Таблица 2

Стесненность судходных маршрутов

Точка маршрута	Мера стесненности маршрута, мили		Минимальное расстояние до берега, мили	
	M_{st}^{np}	$M_{st}^{\perp}$	D^{np}	$D^{\perp}$
Маршрут <i>a</i>				
1а	16,0	2,0	18,4	6,0
2а	1,5	13,2	5,4	25,4
3а	2,7	15,1	7,4	31,6
Маршрут <i>b</i>				
1б	6,2	10,3	7,8	10,6
2б	2,9	14,6	6,8	15,0
Маршрут <i>c</i>				
1с	10,2	3,0	11,5	11,5
2с	11,6	7,7	18,8	12,6
3с	8,1	5,1	28,7	12,1
4с	8,6	16,7	27,8	19,6

Полученные в табл. 2 данные показывают, что количественное значение меры стесненности на каждом из маршрутов меняется в широких пределах: для маршрута *a* — от 1,5 до 16,0 миль; для маршрута *b* — от 2,9 до 14,6 миль; для маршрута *c* — от 3,0 до 16,7 миль.

Показатели стесненности точек маршрута зависят от удаленности маршрута от берега. Существенные различия в численных значениях показателей меры стесненности связаны с разной удаленностью берегов, расположенных по обеим сторонам маршрута. Сравнение численных значений показателей меры стесненности и минимальных расстояний до берега показывают, что расстояния по величине всегда превышают показатель меры.

Обсуждение (Discussion)

Применение методов стохастической геометрии для оценки навигационных свойств акватории позволяет более полно и детально учесть влияние опасных объектов на возможность судов маневрировать в данной акватории. Использование в качестве меры стесненности акватории множества прямых линий, выраженное в длинах отрезков, которые эти линии могут пересекать, обосновано тем, что маршруты морских судов на большей части также имеют вид прямых линий. Кроме того, такая мера позволяет производить взаимное сравнение отдельных участков акваторий по показателю стесненности, используя одно число, характеризующее не только расстояния между препятствиями, но также их форму и размеры. Вместе с тем предлагаемый подход требует дополнительных средств наблюдения и измерения параметров контуров объектов, влияющих на стесненность акватории, в том числе движущихся объектов, которые оказывают стохастическое влияние на данные показатели. По этой причине использование предложенного метода формализованной оценки стесненности акватории целесообразно использовать при решении многокритериальных задач выбора оптимальных маршрутов [1], [2]. В таких задачах критерий стесненности используется наряду с критериями, связанными с проходными глубинами, гидрографической изученностью рельефа дна, ледовой проходимостью судов и временем их перехода между точками отправления и прихода [15], [16].

Приведенная в работе оценка стесненности прол. Вилькицкого выполнена без учета влияния опасных ледовых образований. Наличие тяжелых льдов в проливе в отдельные годы приводит к его полной блокаде. Влияние неподвижных айсбергов, запретных зон и других стационарных объектов на стесненность акватории может быть учтено с использованием предложенной методики. Для учета влияния подвижных объектов требуется проведение дополнительных исследований.

Заключение (Conclusion)

В статье приведены результаты формализации показателей стесненности, основанные на методах стохастической геометрии. Исследование является продолжением работ по математическому обоснованию навигационно-гидрографического обеспечения судоходства в акватории арктических морей, осуществляемых на Арктическом факультете ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова». Впервые выполнена систематизация параметров стесненности, включающая обобщенные показатели акватории и ее частей, а также показатели маршрутов, их отдельных частей и точек.

Сформулированы условия и ограничения использования расстояний в качестве меры стесненности судоходных маршрутов. Приведены основные формулы и соотношения показателей стесненности. Сравнительная оценка показателей стесненности, полученных традиционными методами и методами стохастической геометрии, проиллюстрирована на примере прол. Вилькицкого. В дальнейшем планируется выполнить комплексную навигационно-гидрографическую оценку основных судоходных маршрутов акватории СМП по критериям навигационной безопасности, включающих критерии стесненности акватории, проходных глубин и ледовой проходимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева Е. В. Многокритериальный подход в задаче выбора оптимальных маршрутов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева // Вестник Государственного университета морского и речного

флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.

2. Акмайкин Д. А. Эвристический поиск оптимального маршрута судна по северному морскому пути / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.

3. Снопков В. И. Управление судном / В. И. Снопков. — СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. — 536 с.

4. Андреева Е. В. Обоснование выбора количественных показателей зон маневрирования в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 951–959. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-951-959.

5. Афонин А. Б. Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.

6. Павлова Е. А. Особенности распределения айсбергов по данным судовых наблюдений в Карском море в 2004–2019 гг. / Е. А. Павлова [и др.] // Российская Арктика. — 2020. — № 10. — С. 30–36.

7. Горбунов Ю. А. Стамухи моря Лаптевых / Ю. А. Горбунов, С. М. Лосев, Л. Н. Дымент // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2008. — № 2 (79). — С. 111–116.

8. Ключев В. В. Количественная оценка показателя стесненности акватории Северного морского пути / В. В. Ключев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 109–117. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-109-117.

9. Tezиков А. Research of quantitative indicators of tightness of the northern sea route (NSR) / A. Tezиков, A. Afonin, V. Kljuev // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions. — Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2017.

10. Сантало Л. Интегральная геометрия и геометрические вероятности / Л. Сантало. — М.: Наука, 1983. — 358 с.

11. Амбарцумян Р. В. Введение в стохастическую геометрию / Р. В. Амбарцумян, Й. Мекке, Д. Штойян. — М.: Наука, 1989. — 400 с.

12. Костюченко Р. Ю. Аналогия в науке и обучении / Р. Ю. Костюченко // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. — 2017. — № 4 (24). — С. 136–142.

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

14. Александров А. В. Анализ айсберговой опасности на Северном морском пути на примере газозавозов / А. В. Александров [и др.] // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 2 (26). — С. 76–81. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-2-76-81.

15. Afonin A. Conventional and Deep-Water Shipping Passages Along the Northern Sea Route / A. Afonin, E. Olkhovik, A. Tezиков // Handbook of Research on International Collaboration, Economic Development, and Sustainability in the Arctic. — IGI Global, 2019. — Pp. 314–337. DOI: 10.4018/978-1-5225-6954-1.ch015.

16. Андреева Е. В. Перспективы развития СМП / Е. В. Андреева, К. Я. Исаулова // Деловой журнал Neftegaz.RU. — 2021. — № 6 (114). — С. 30–37.

REFERENCES

1. Andreeva, Ekaterina V. “Multi-criteria approach to the problem of choosing the optimal routes in the waters of the Northern Sea Route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.

2. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. “Heuristic search for the optimal route ship Northern Sea Route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.

3. Snopkov, V. I. *Upravlenie sudnom*. SPb: ANO NPO «Professional», 2004.

4. Andreeva, Ekaterina V., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezиков. “The rationale for the selection of quantitative indicators zones of maneuvering in the water area of the Northern sea route.” *Vestnik Gosudarstvennogo*

universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova 10.5 (2018): 951–959. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-951-959.

5. Afonin, Andrej B. “A comprehensive assessment of the safety of navigation in the water area of the Northern sea route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.

6. Pavlova, E. A., T. A. Alekseeva, E. Y. Mironov, and V. Mf. Smolyanitsky. “Specific features of iceberg distribution according to shipborne observations in the Kara sea in 2004–2019.” *Russian Arctic* 10 (2020): 30–36.

7. Gorbunov, Yu. A., S. M. Losev, and L. N. Dymant. “Stamukhi morya Laptevykh.” *Problemy Arktiki i Antarktiki* 2(79) (2008): 111–116.

8. Kljuev, Vitaly Vladimirovich. “Quantitative assessment of constraint of the Northern sea route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 5(39) (2016): 109–117. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-109-117.

9. Tezиков, Aleksandr, Andrei Afonin, and Vitaly Kljuev. “Research of quantitative indicators of tightness of the northern sea route (NSR).” *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions*. Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2017.

10. Santalo, Luis A. *Integral geometry and geometric probability*. 2nd Edition. Cambridge University Press, 2004.

11. Ambartsumyan, R. V., I. Mekke, and D. Shtoiyan. *Vvedenie v stokhasticheskuyu geometriyu*. M.: Nauka, 1989.

12. Kostyuchenko, Roman Yu. “Analogy in science and education.” *Herald of Siberian Institute of Business and Information Technologies* 4(24) (2017): 136–142.

13. Ershov, Andrey A., and Andrey V. Mikhnevich. “The use of characteristics of maneuvering to ensure the safety of vessel traffic in the narrows.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.5 (2018): 897–910. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-897-910.

14. Aleksandrov, Anatolii Vladimirovich, Olga Donatovna Ivanovskaya, Roman Andreevich Matantsev, and Valerii Mikhaylovich Shaposhnikov. “Iceberg risk analysis for the northern sea route: LNG carrier study case.” *Arctic: ecology and economics* 2(26) (2017): 76–81. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-2-76-81.

15. Afonin, Andrey, Evgeniy Olkhovik, and Alexander Tezиков. “Conventional and Deep-Water Shipping Passages Along the Northern Sea Route.” *Handbook of Research on International Collaboration, Economic Development, and Sustainability in the Arctic*. IGI Global, 2019. 314–337. DOI: 10.4018/978-1-5225-6954-1.ch015.

16. Andreeva, E. V., and K. Ya. Isaulova. “Perspektivy razvitiya SMP.” *Delovoi zhurnal Neftegaz.RU* 6(114) (2021): 30–37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреева Екатерина Валерьевна — ассистент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: kaf_gm@gumrf.ru
Тезиков Александр Львович —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: altezиков@yandex.ru, TezиковAL@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andreeva, Ekaterina V. — Assistant
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: kaf_gm@gumrf.ru
Tezиков, Aleksandr L. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: altezиков@yandex.ru, TezиковAL@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 31 января 2022 г.

Received: January 31, 2022.

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-63-74

STUDYING THE POSSIBILITY OF FATIGUE DAMAGES FORMATION ON THE GEARWHEELS OF OPEN GEAR OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE TAINTER GATES OF THE MOSCOW CANAL NAVIGATION LOCKS

N. M. Ksenofontov¹, O. V. Sugak²

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

² — UK UralEnergoservis, Ltd., St. Petersburg, Russian Federation

Maneuvering of the main tainter gates of the upstream end of the Moscow Canal navigation locks is carried out by means of electromechanical drives. Many of them have been in operation for over 80 years. One of the main elements that limit the service life of drive mechanisms are gearwheels of open gears. The realization of their sudden failure can lead to a long interruption of shipping. The accumulated experience of operating and observing similar elements at other facilities has shown that the controlled parameters established in the regulatory documentation may not be enough to objectively assess their technical condition and determine the residual life. In particular, there are no requirements for checking these products for fatigue damage. To determine the possibility of such defects formation and the localization of areas where their occurrence is most likely, a comprehensive assessment of the stress-strain state is performed using the finite element method under design loading conditions, as a result of which global calculation models of the elements under study are obtained. It has been established that the calculated values of nominal stresses do not exceed the endurance limit of the material, with the exception of contact fatigue on the working surface of the gear teeth. At the same time, the possibility of fatigue cracks formation on the elements of the studied gearwheels due to the possible presence of technological stress concentrators in the form of casting defects is not excluded. The obtained cartograms of the stress state make it possible to establish the areas where the formation of fatigue cracks is most likely in the presence of technological defects on them. Taking into account the information received, recommendations are developed to prevent the implementation of sudden failures due to the uncontrolled development of the process of fatigue damage on the gearwheels of open gears at the stage of their operation.

Keywords: navigation lock, tainter gate, electric drive, gearwheel, strain-stress state, service time, fatigue damage, failure.

For citation:

Ksenofontov, Nikolay M., and Oleg V Sugak. "Studying the possibility of fatigue damages formation on the gearwheels of open gear of the electric drive of the tainter gates of the Moscow canal navigation locks." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 63–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-63-74.

УДК 626.44; 626.45

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕСАХ ОТКРЫТОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕКМЕНТНЫХ ВОРОТ ШЛЮЗОВ КАНАЛА ИМЕНИ МОСКВЫ

Н. М. Ксенофонтов¹, О. В. Сугак²

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

² — ООО «УК УралЭнергоСервис», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе представлены результаты оценки необходимости проверки наличия усталостных повреждений на наиболее ответственных элементах электромеханических приводов сегментных ворот, эксплуатируемых на судоходных шлюзах канала имени Москвы. Отмечается, что продолжительность эксплуатации многих из них составляет более 80 лет. В качестве основных элементов, ограничивающих срок службы

приводных механизмов, выбраны зубчатые колеса открытых передач. Подчеркивается, что реализация их внезапного отказа может привести к длительному прекращению судоходства. Накопленный опыт эксплуатации и наблюдений за подобными элементами на других сооружениях показал, что установленных в нормативной документации контролируемых параметров может быть недостаточно для объективной оценки их технического состояния и определения остаточного ресурса. В частности, в ней отсутствуют требования по проверке данных изделий на наличие усталостных повреждений. Для определения возможности образования подобных дефектов и локализации участков, на которых наиболее вероятно их появление, выполнена комплексная оценка напряженно-деформированного состояния с помощью метода конечных элементов при проектных условиях нагружения, в результате которой получены глобальные расчетные модели исследуемых элементов. Установлено, что расчетные значения номинальных напряжений не превышают предела выносливости материала, за исключением контактной усталости на рабочей поверхности зубьев колес. При этом не исключается вероятность образования усталостных трещин на элементах исследуемых зубчатых колес из-за возможного наличия технологических концентраторов напряжений в виде дефектов литья. Полученные картограммы напряженного состояния позволили установить участки, на которых наиболее вероятным является образование усталостных трещин при наличии на них технологических дефектов. С учетом полученной информации разработаны рекомендации по предотвращению реализации внезапных отказов, обусловленных бесконтрольным развитием процесса усталостного повреждения на зубчатых колесах открытых передач на стадии их эксплуатации.

Ключевые слова: судоходный шлюз, сегментные ворота, электропривод, зубчатое колесо, напряженно-деформированное состояние, продолжительность эксплуатации, усталостное повреждение, отказ.

Для цитирования:

Ксенофонтов Н. М. Исследование возможности образования усталостных повреждений на зубчатых колесах открытой передачи электропривода сегментных ворот шлюзов канала имени Москвы / Н. М. Ксенофонтов, О. В. Сугак // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 63–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-63-74.

Введение (Introduction)

Для осуществления судопропуска и удержания гидростатического напора на верхних головах шлюзов № 1–10, эксплуатируемых в ФГБУ «Канал имени Москвы» используются сегментные ворота. Их маневрирование осуществляется с помощью цепного электромеханического привода (ЭМП), продолжительность эксплуатации которого для большинства ворот составляет более 80 лет. Комплексным проектом реконструкции объектов инфраструктуры на ФГБУ «Канал имени Москвы» предусмотрена замена данных приводов на аналогичные механизмы ввиду длительного периода их эксплуатации.

Следует отметить, что принятая в отрасли система технического обслуживания механического оборудования, базирующаяся на стратегии планово-предупредительных ремонтов¹, исключает возможность замены его элементов ввиду продолжительного срока службы. Главным основанием для замены является наличие повреждений, размеры и динамика развития которых превышают регламентированные предельно-допускаемые значения.

Одним из основных типовых элементов, лимитирующих срок службы рассматриваемого ЭМП, являются зубчатые колеса открытых передач, длительность эксплуатации которых в большинстве случаев сопоставима с продолжительностью работы непосредственно самого привода. Реализация внезапного отказа данных элементов может привести к длительному прекращению судоходства. Для предотвращения подобных событий выполняется их периодическая проверка специалистами группы наблюдений канала за механическим оборудованием.

В процессе наблюдений за изменением технического состояния открытых зубчатых передач в процессе эксплуатации отраслевым нормативным документом² регламентировано выполнение контроля следующих параметров:

¹ Положение о планово-предупредительном ремонте судоходных гидротехнических сооружений / Утв. 29.10.1969 г. Министерством речного флота СССР. М.: Транспорт, 1970. 104 с.

² Инструкция по наблюдениям и исследованиям на судоходных гидротехнических сооружениях. Ч. II: Механическое оборудование гидротехнических сооружений / Главное управление водных путей и гидротехнических сооружений Минречфлота РСФСР. М.: Транспорт, 1982.

- радиального и бокового биения;
- боковых зазоров;
- размера пятна контакта;
- износа зубьев.

Анализ технической литературы, нормативных документов и научных публикаций, а также имеющийся опыт наблюдений и исследований за открытыми зубчатыми передачами приводов ворот и затворов судоходных шлюзов показал, что приведенных контролируемых параметров может быть недостаточно для объективной оценки их технического состояния и определения остаточного ресурса. Продолжительность работы рассматриваемых элементов ЭМП и факты выявления усталостных повреждений на колесах закрытых передач рассматриваемого привода указывают на возможность их наличия также на зубчатых колесах его открытых передач.

Причины образования усталостных повреждений и их развития, в том числе для зубчатых передач, подробно рассмотрены во многих работах, в частности [1]–[4]. Среди исследований, направленных на классификацию видов повреждений зубчатых колес, для усталостного процесса можно выделить два основных типа повреждений: *трещинообразование* и *питтинг* (*выкрашивание*) рабочей поверхности зубьев [5], [6]. Практически во всех рассмотренных источниках возможность образования усталостных повреждений рассматривается только на элементах зубчатого венца. Однако исследование [7], выполненное на подобных элементах привода подъемно-опускных шлюзовых ворот Волго-Балтийского водного пути, доказало возможность образования усталостных трещин на других элементах колес (в частности, ввиду наличия технологических дефектов).

Для объективной оценки технического состояния рассматриваемых элементов механического оборудования и необходимости их замены, с учетом представленной ранее информации и отсутствия в проектной документации прочностных расчетов данных изделий, представляется необходимым решение следующих частных задач:

- комплексная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) исследуемых элементов для установления возможности и условий образования усталостных повреждений;
- локализация наиболее напряженных участков;
- определение необходимости введения дополнительных диагностических параметров;
- подготовка рекомендаций по контролю исследуемых элементов в эксплуатационных условиях.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве объекта исследования выбраны два приводных прямозубых цилиндрических зубчатых спицевых колеса внешнего зацепления: $m = 14, z = 93$ (колесо № 1) и $m = 26, z = 64$ (колесо № 2), изготовленных посредством литья из стали 45Л (рис. 1). Требованиями проекта предусмотрена термообработка данных изделий в виде нормализации с доведением поверхностной твердости до 148–217 НВ. Схемы колес с основными размерами приведены на рис. 2.

В течение всего периода эксплуатации сооружений «Канала имени Москвы» исследуемые элементы были заменены только на шлюзах № 7–9 ввиду сверхнормативного механического изнашивания рабочей поверхности зубьев колес. По этой же причине в межнавигационный период 2021–2022 гг. запланирована замена зубчатых колес на шлюзе № 3.

Проверка наличия трещин с использованием методов и средств неразрушающего контроля на исследуемых в настоящей работе колесах не проводится. Расчетная оценка НДС выполнена с помощью метода конечных элементов, который в последнее время чаще всего используется для проведения подобных исследований [7]–[9]. В целом, все эти работы направлены на конструктивное совершенствование зубчатых передач, что, безусловно, необходимо для проектирования и изготовления новых изделий, однако они не позволяют обеспечить безопасную работу эксплуатируемых изделий до их замены.

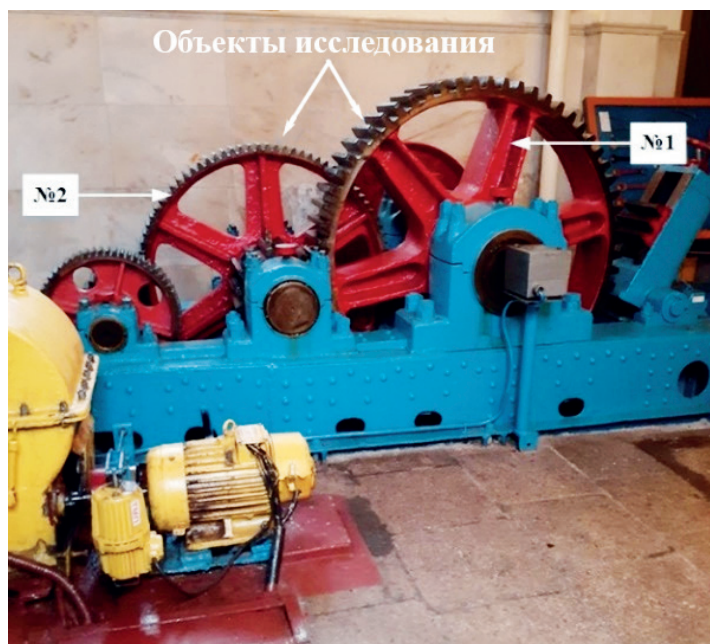


Рис. 1. Исследуемые зубчатые колеса открытой передачи привода основных сегментных ворот верхней головы

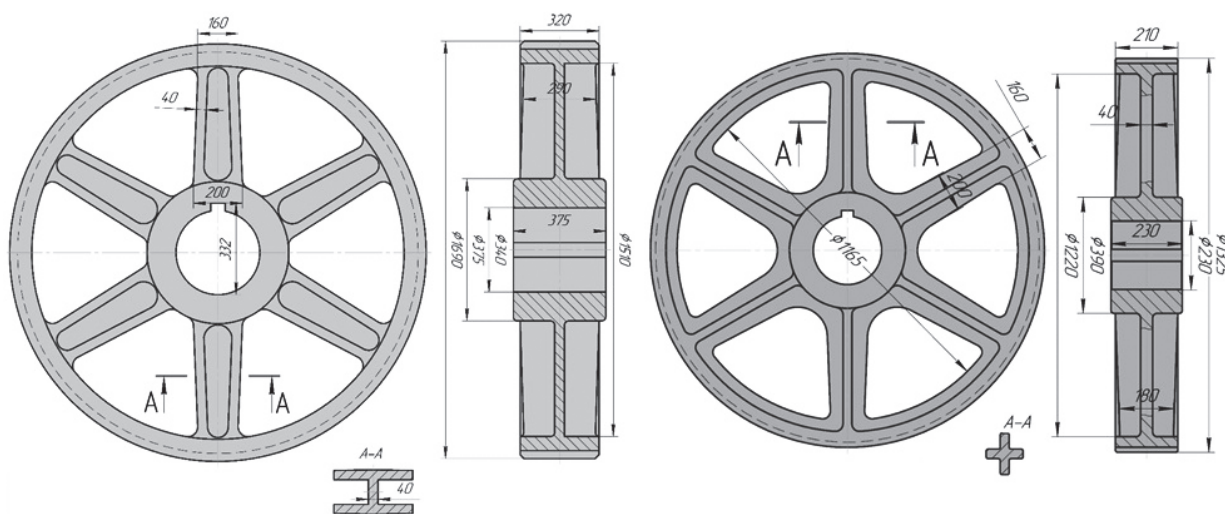


Рис. 2. Схемы исследуемых элементов привода сегментных ворот

В качестве основного методического документа при выполнении расчетного исследования использовалось руководство¹. При выполнении расчета были приняты следующие допущения: расчетные нагрузки соответствуют проектным значениям, материал колес однородный, поверхностная твердость изделий соответствует требованиям проекта. Расчетная схема привода, используемая для оценки НДС зубчатых колес, приведена на рис. 3.

Расчетные значения крутящих моментов (обороты) на выходном валу редуктора составляют:

- при наполнении: $T_3 = 57500 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ($n_3 = 4,8 \text{ об/мин}$);
- основной подъем: $T_3 = 41500 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ($n_3 = 127 \text{ об/мин}$).

Рассмотрим НДС колес при максимальном крутящем моменте на валу редуктора $T = 57500 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ (5639 Н·м).

¹ Руководство Р.007–2004. Расчет зубчатых передач на прочность. М.: Российский Речной Регистр, 2005.

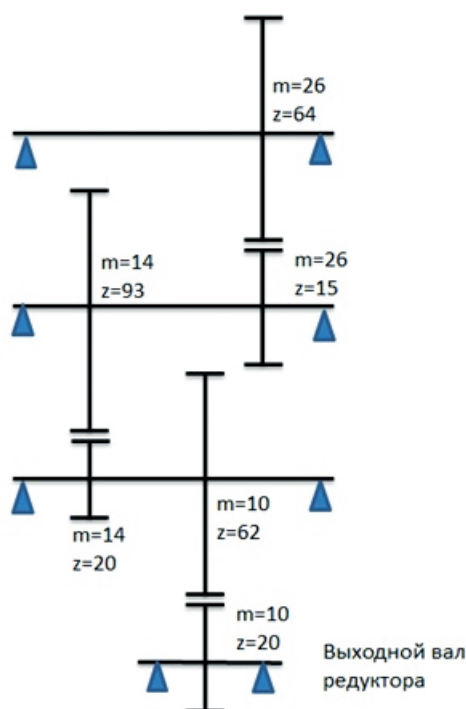


Рис. 3. Расчетная схема привода

Крутящие моменты на шестернях, находящихся в зацеплении с рассматриваемыми соответствующими ведомыми зубчатыми колесами, составляют:

$$T_1(m = 14, z = 20) = 5639 \cdot \frac{62}{20} = 17481 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$T_2(m = 26, z = 15) = 5639 \cdot \frac{62}{20} \cdot \frac{93}{20} = 81286 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

При моделировании ведомых зубчатых колес использованы объемные конечные элементы (КЭ) со срединными узлами. Контакт зубчатого колеса и шестерни задан с помощью пар контактных КЭ на соответствующих поверхностях (контакт задан без трения). Расчетная нагрузка реализует максимальный крутящий момент на шестерню. В табл. 1 указаны свойства материалов шестерни и колеса, принятые при расчете.

Таблица 1

Механические свойства материалов, необходимые для выполнения расчета

Наименование и обозначение			Шестерня	Колесо
Наименование материала	—	—	Ст5сп ГОСТ 380–71	Сталь 45Л ГОСТ 977–65
Твердость	НВ	—	156	148
Модуль нормальной упругости,	Е	МПа	200000	215000
Коэффициент Пуассона	μ	—	0,35	0,28
Плотность	ρ	кг/м³	7850	7800
Временное сопротивление	R_m	МПа	490	550
Предел текучести	R_{eH}	МПа	295	320
Предел выносливости	При контакте	σ_{HP}	МПа	366
	При изгибе	σ_{-1}	МПа	259
Допускаемое напряжение при максимальной нагрузке	При контакте	σ_{HPmax}	МПа	896
	При изгибе	σ_{-1max}	МПа	550

Результаты (Results)

Трехмерные КЭ модели зубчатых зацеплений показаны на рис. 4. При моделировании, в силу симметрии, использовались половины твердотельных моделей зацеплений. Принятые при расчете схема нагружения и граничные условия показаны на рис. 5 на примере зубчатого зацепления колеса № 1. Расчетное распределение эквивалентных напряжений показано на рис. 6, более детально — на рис. 7. На рис. 8 и 9 показаны распределения растягивающих напряжений. На рис. 10 и 11 приведены контактные давления, откуда видно, что для первого зацепления контакт происходит по трем зубьям, в то время как для второго зацепления наблюдается контакт по одному зубу.

Результаты выполненных расчетных исследований в обобщенном виде приведены в табл. 2 и 3. Для выявленных характерных зон в точках с максимальными растягивающими напряжениями даны компоненты тензора напряжений, характеризующие амплитуду пульсирующего цикла, максимальные эквивалентные напряжения, а также максимальные контактные напряжения на рабочей поверхности зубьев рассматриваемых колес.

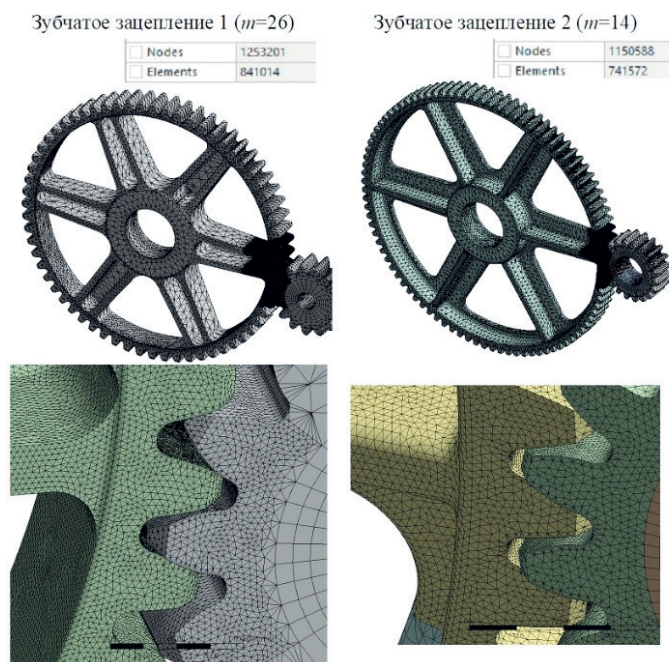


Рис. 4. Конечно-элементная модель зубчатого зацепления

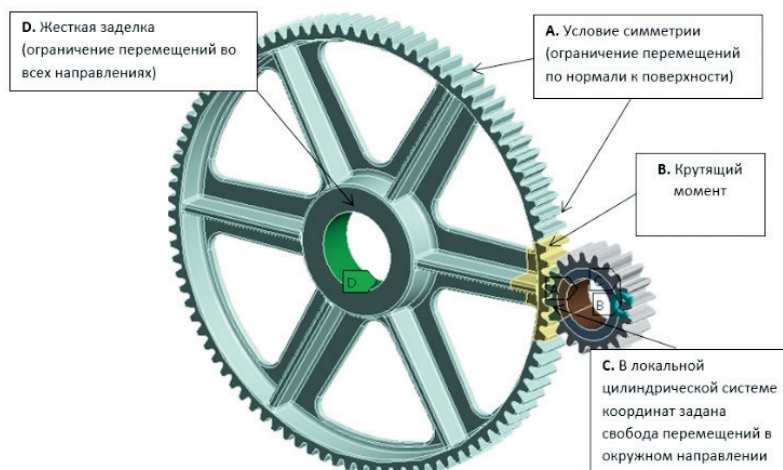


Рис. 5. Схема нагружения и граничных условий, принятая при расчете

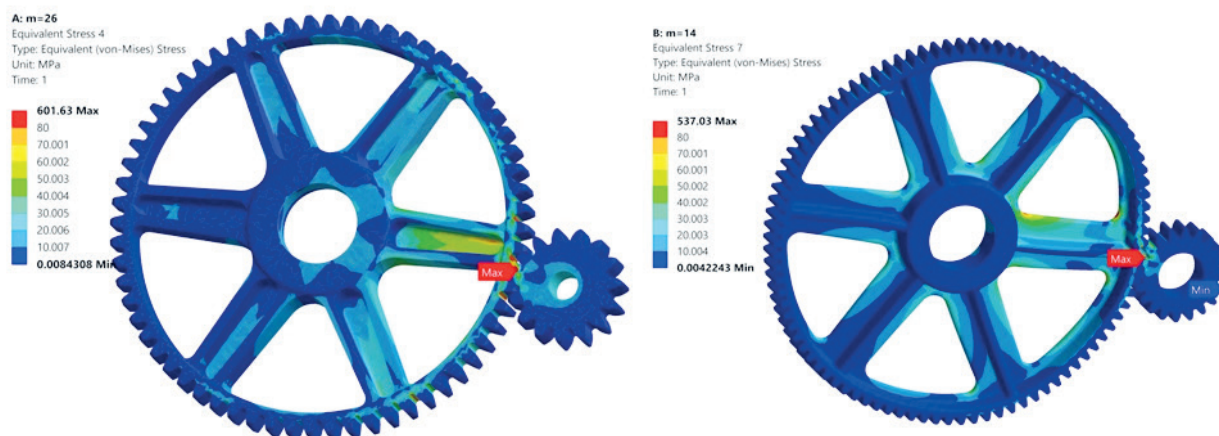


Рис. 6. Расчетное распределение эквивалентных напряжений, МПа

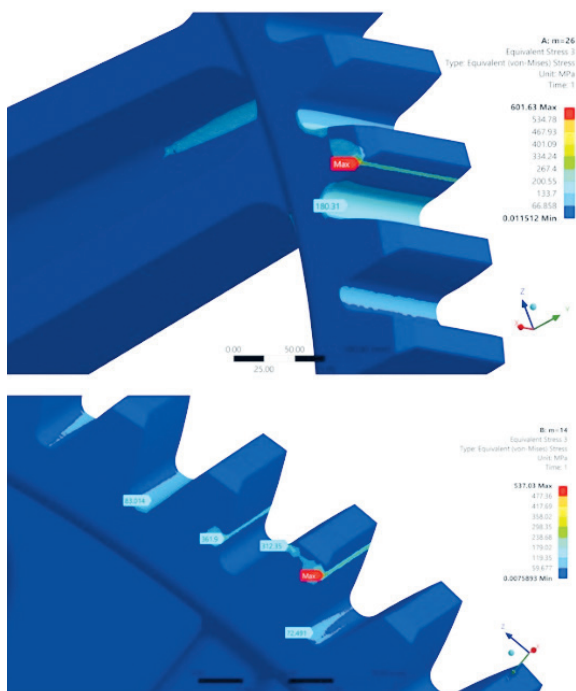


Рис. 7. Локализация распределения эквивалентных напряжений в колесе № 1 ($m = 26$) и № 2 ($m = 14$), МПа

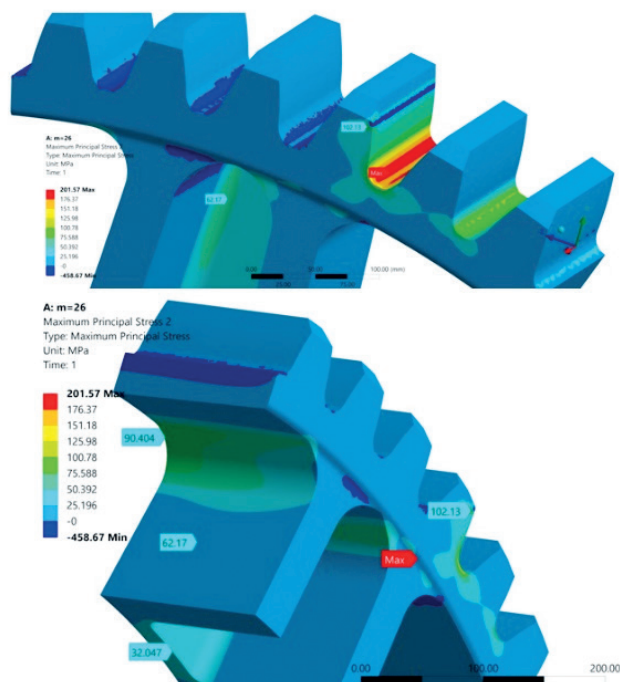


Рис. 8. Локализация напряжений растяжения в колесе № 1 ($m = 26$), МПа

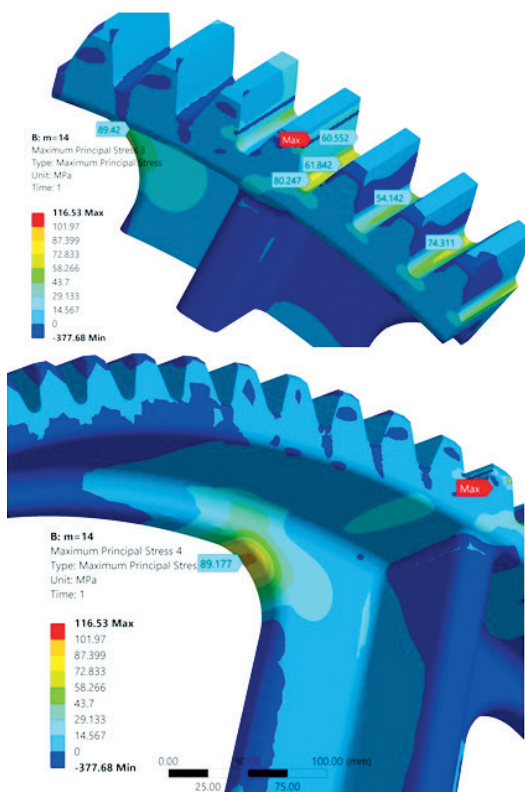


Рис. 9. Локализация напряжений растяжения в колесе № 2 ($m = 14$), МПа

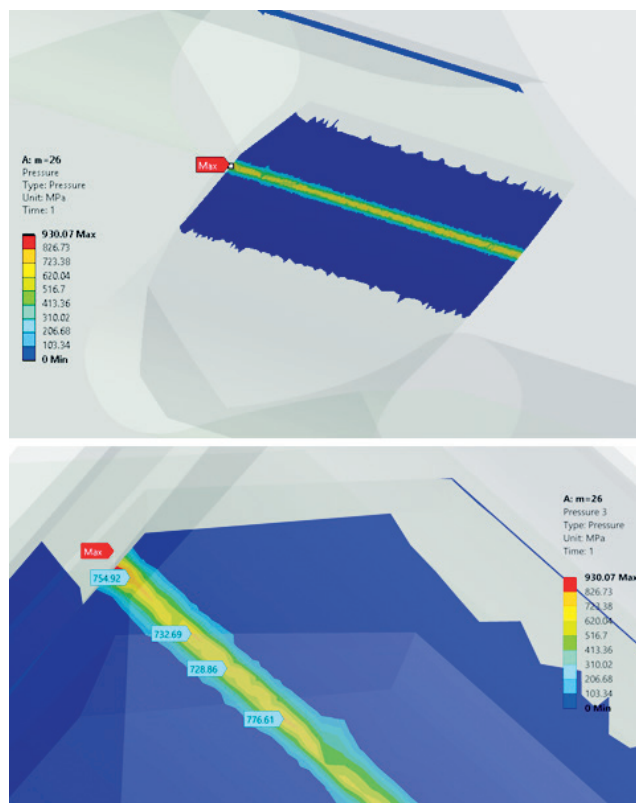


Рис. 10. Распределение контактных давлений в зубьях колеса № 1, МПа

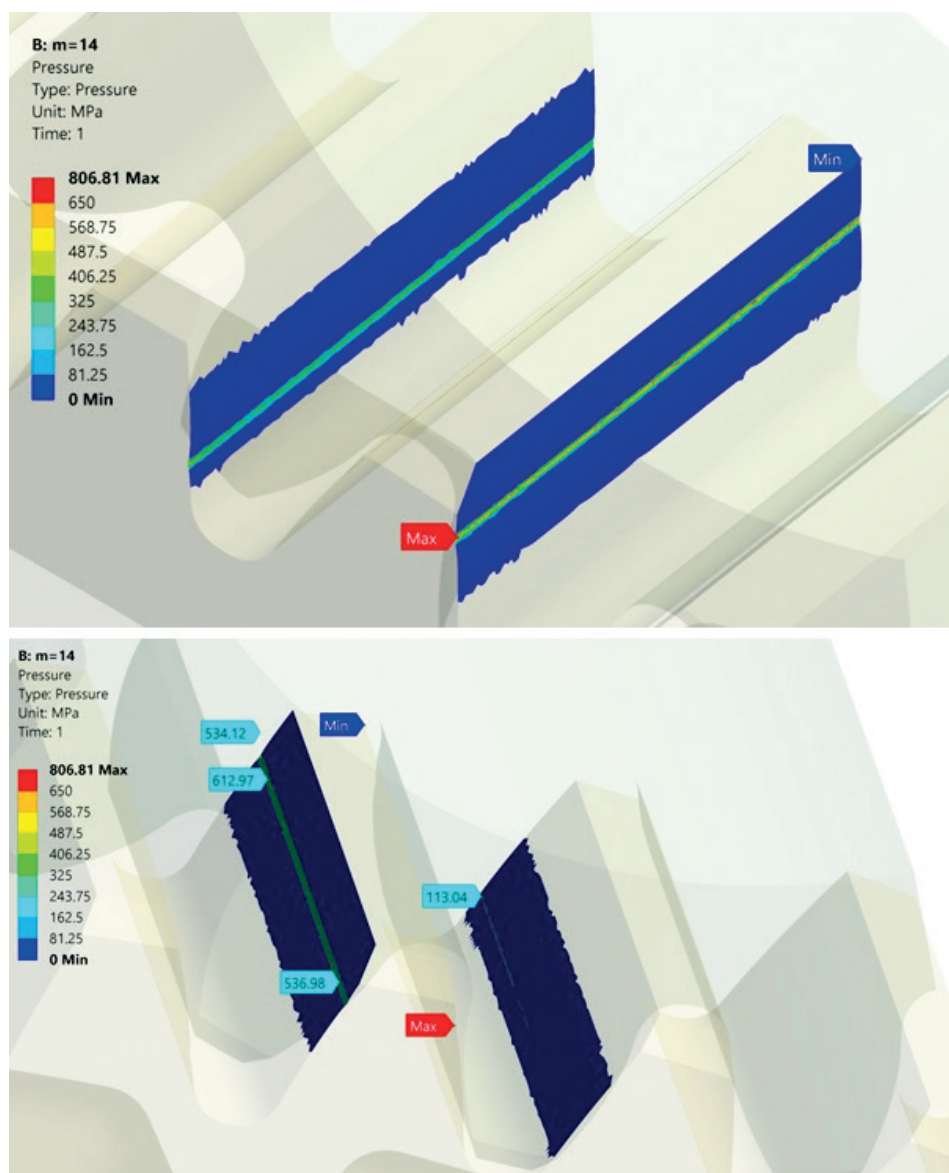


Рис. 11. Распределение контактных давлений в зубьях колеса № 2

Таблица 2

Расчетные значения напряжений в зубьях колес

Параметр		Напряжения в зубе колеса № 1 ($m = 14$), МПа		Напряжения в зубе колеса № 2 ($m = 26$), МПа	
		max	min	max	min
Нормальные напряжения	σ_x	20,0	0	49,3	0
	σ_y	6,6	0	32,0	0
	σ_z	74,2	0	169,4	0
Касательные напряжения	τ_{xy}	1,5	0	2,3	0
	τ_{yz}	-21,1	0	73,60	0
	τ_{zx}	-5,2	0	4,95	0
Эквивалентные напряжения	$\sigma_{\text{экр}}$	73,1	0	182,3	0
Контактные напряжений	σ_n	700 (807)	0	780 (930)	0

Примечание. В скобках указаны значения контактных напряжений в зонах сингулярности КЭ сетки.

Таблица 3

Амплитуды компонентов переменных напряжений и запасы прочности

Параметр		Значение	
		Колесо № 1 ($m = 14$)	Колесо № 2 ($m = 26$)
Эффективный коэффициент концентрации напряжений	k_{σ}	1,00	1,00
Масштабный коэффициент, учитывающий влияние абсолютных размеров детали на усталостную прочность	ε_{σ}	0,50	0,50
Коэффициент, учитывающий влияние состояния поверхности детали на усталостную прочность	β_{σ}	1,21	1,21
Амплитуды компонент переменных напряжений	σ_{xa}	10,00	24,65
	σ_{ya}	3,30	16,00
	σ_{za}	37,10	84,70
	τ_{xya}	0,75	1,15
	τ_{yza}	-10,55	36,80
	τ_{zxa}	-2,60	2,48
Интенсивность переменных напряжений	σ_a	13,20	91,0
Интенсивность средних напряжений	σ_m	33,64	83,6
Коэффициент, отражающий зависимость предела выносливости по амплитуде при асимметричном цикле от среднего (статистического) напряжения, действующего в той же точке сечения	Ψ_{σ}	0,295	0,245
Амплитуда эквивалентных напряжений, приведенная к симметричному циклу	σ_y	31,74	170,9
Коэффициент запаса прочности по подобному циклу	n	8,16	1,52
Коэффициент запаса прочности по переменным напряжениям	n_a	11,42	1,59
Коэффициент запаса прочности по пределу текучести	n_m	4,38	1,76
Коэффициент запаса прочности по пределу прочности	n_b	7,53	3,02
Коэффициент запаса прочности по контактной выносливости	n_H	0,52	0,50

Обсуждение (Discussion)

Полученные расчетные значения напряжений на элементах открытых зубчатых передач приводов сегментных ворот не превышают предела выносливости материала за исключением контактной усталости на рабочей поверхности зубьев. Однако следует обратить внимание, что предел выносливости реальной детали будет ниже приведенного в табл. 1 значения данного показателя для материала по ряду причин. Помимо масштабного фактора и возможных неучтенных при проектировании и настоящем расчете нагрузок на снижение данной величины также оказывает влияние возможное несоответствие значений поверхностной твердости элементов требованиям проекта и наличие технологических дефектов литых как поверхностных, так и внутренних (см. рис. 12 и 13 [10]), что неоднократно устанавливалось при оценке технического состояния элементов, подобных исследуемым. Поэтому однозначно исключить возможность образования усталостных трещин на элементах исследуемых зубчатых колес не представляется возможным. Однако не все дефекты приводят к образованию усталостных трещин. Полученные картограммы напряженного состояния позволяют локализовать участки, на которых наиболее вероятным является образование усталостных трещин ввиду наличия на них технологических дефектов.



Рис. 12. Пример термической трещины на зубчатом колесе открытой передачи электропривода подъемно-опускных ворот



Рис. 13. Макрошлиф зуба колеса открытой передачи с усадочной раковиной

Полученные результаты расчетных исследований и накопленный опыт оценки технического состояния открытых зубчатых передач ЭМП ворот и затворов судоходных шлюзов в качестве дополнительных контролируемых параметров для исследуемых элементов позволяют установить следующее:

- 1) наличие повреждений контактной усталости в виде питтинга и выкрашивания на рабочей поверхности зубьев колес определяется с помощью визуального осмотра;
- 2) наличие усталостных трещин на отдельных участках, топография которых представлена на рис. 14 при условии наличия на них технологических дефектов, определяется с помощью визуального осмотра и магнитопорошкового контроля.

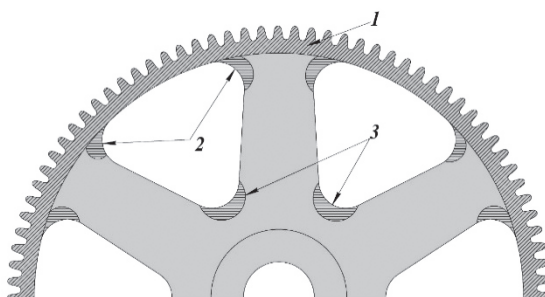


Рис. 14. Топография локализованных участков, на которых возможно образование усталостных трещин при наличии на них концентраторов напряжений

Условные обозначения:

- заштрихованная область — предлагаемые для контроля участки:
 1 — торцевая поверхность зубьев и обода; 2 — участки сопряжения спиц с ободом;
 3 — участки сопряжения спиц со ступицей

Представленная на рис. 14 топография локализованных участков может применяться не только в рамках эксплуатационного контроля, но и при приемке вновь изготовленных изделий. В случае выявления поверхностных дефектов литья в виде неслитин, трещин, рыхлот и сквозных раковин на данных участках принимаемое изделие не должно допускаться до эксплуатации.

Заключение (Conclusion)

В результате выполнения исследования были получены глобальные расчетные модели зубчатых колес открытых передач приводного механизма основных сегментных ворот, эксплуатируемых на шлюзах канала им. Москвы, которые свидетельствуют о соответствии рассматриваемых элементов критериям статической и усталостной прочности, за исключением поверхностной контактной выносливости, что предопределяет возможность образования и развития усталостных повреждений на рабочей поверхности зубьев колес. При этом в случае наличия поверхностных и внутренних технологических концентраторов напряжений в виде дефектов литья, наличия нарушения неподвижности посадок колес и несоблюдения режимов термообработки не исключается возможность образования усталостных повреждений на других элементах исследуемых изделий, в том числе в корневой части зубьев, на участках сопряжения спиц с ободом, а также на элементах ступицы.

Для обеспечения дальнейшей безотказной работы рассматриваемых элементов, находящихся в эксплуатации рекомендуется выполнять периодический осмотр рабочей поверхности зубьев, а также проверку наличия технологических дефектов на локализованных участках. При их выявлении на данном участке следует провести магнитопорошковый контроль для определения наличия усталостных повреждений и границ их распространения.

Для оценки степени допустимости выявленных повреждений в виде контактной усталости рекомендуется руководствоваться «Инструкцией по наблюдениям и исследованиям на судоходных гидротехнических сооружениях» в части наблюдений за закрытыми зубчатыми передачами. В случае установления факта наличия трещин на локализованном в результате расчета участке рекомендуется осуществить замену колеса.

Следует отметить, что полученные в ходе настоящего расчетного исследования результаты могут быть скорректированы по результатам измерения поверхностной твердости элементов. Направлением дальнейших исследований является натурная проверка эксплуатируемых зубчатых колес с применением средств неразрушающего контроля для определения достоверности полученной расчетной модели, а также исследование влияния наличия внутренних и поверхностных концентраторов на напряженно-деформированное состояние изделий, в том числе оценка допустимости наличия усталостных трещин на локализованных в результате расчета наиболее напряженных участках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терентьев В. Ф. Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева. — М.: Наука, 2015. — 480 с.
2. Yadav I. N. Fatigue damage model of concrete materials / I. N. Yadav, K. B. Thapa // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. — 2020. — Vol. 108. — Pp. 102578. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102578.
3. Nikitin I. S. Complex model for fatigue damage development / I. S. Nikitin, N. G. Burago, A. D. Nikitin, B. A. Stratula // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing LLC, 2020. — Vol. 2312. — No. 1. — Pp. 050015. DOI: 10.1063/5.0035517.
4. Liu H. Influence of load spectrum on contact fatigue damage of a case carburized wind turbine gear / H. Liu [et al] // Engineering Failure Analysis. — 2021. — Vol. 119. — Pp. 105005. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105005.
5. Старжинский В. Е. Виды повреждений зубчатых колес: типология и рекомендации по предупреждению повреждений / В. Е. Старжинский [и др.] // Трение и износ. — 2008. — Т. 29. — № 5. — С. 465–482.
6. Шеховцева Т. В. Особенности повреждения рабочих поверхностей зубчатых колес ГТД / Т. В. Шеховцева, Е. В. Шеховцева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2019. — № 6. — С. 406–416.

7. Changbin D. Meshing Error of Elliptic Cylinder Gear Based on Tooth Contact Analysis / D. Changbin, L. Yongping, W. Yongqiao // *International Journal of Engineering*. — 2020. — Vol. 33. — Is. 7. — Pp. 1364–1374. DOI: 10.5829/IJE.2020.33.07A.24.
8. Adnan M. A. Stress Analysis Validation for Gear Design. Master's Degree Thesis / M. A. Adnan, A. Shehata. — Karlskrona, Sweden: Blekinge Institute of Technology, 2018. — 66 p.
9. Ooi J. B. Modal and stress analysis of gear train design in portal axle using finite element modeling and simulation / J. B. Ooi, X. Wang, Ch. Tan, J. Ho and Y. P. Lim // *Journal of Mechanical Science and Technology*. — 2012 — Vol. 26. — Is. 2. — Pp. 575–589. DOI: 10.1007/s12206-011-1040-5.
10. Кузьмицкий М. Л. Определение уровня напряжений на колесах открытых зубчатых передач / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов, И. Н. Базавлук // *Журнал Университета водных коммуникаций*. — 2013. — № 3. — С. 55–63.

REFERENCES

1. Terent'ev, V. F., and S. A. Korableva. *Ustalost' metallov*. M.: Nauka, 2015.
2. Yadav, Indra Narayan, and Kamal Bahadur Thapa. "Fatigue damage model of concrete materials." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 108 (2020): 102578. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102578.
3. Nikitin, I. S., N. G. Burago, A. D. Nikitin, and B. A. Stratula. "Complex model for fatigue damage development." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2312. No. 1. AIP Publishing LLC, 2020. DOI: 10.1063/5.0035517.
4. Liu, Heli, Huaiju Liu, Caichao Zhu, and Yibo Ge. "Influence of load spectrum on contact fatigue damage of a case carburized wind turbine gear." *Engineering Failure Analysis* 119 (2021): 105005. DOI:10.1016/j.engfailanal.2020.105005.
5. Soliterman, Yu. L., E. I. Tesker, A. M. Goman, and S. A. Osipenko. "Modes of failure of gears: typology and recommendations for preventing failure." *Journal of Friction and Wear* 29.5 (2008): 465–482.
6. Shehovtseva, Tatiana Vladimirovna, and Evgeniya Vladimirovna Shehovtseva. "The features of working surfaces damages of gears in a gas turbine engine." *Izvestiya TulGU* 6 (2019): 406–416.
7. Changbin, D., L. Yongping, and W. Yongqiao. "Meshing Error of Elliptic Cylinder Gear Based on Tooth Contact Analysis." *International Journal of Engineering* 33.7 (2020): 1364–1374. DOI: 10.5829/IJE.2020.33.07A.24.
8. Adnan, Md. Asif, and Ahmed Shehata. *Elsayed Stress Analysis Validation for Gear Design*. Master's Degree Thesis. Karlskrona, Sweden: Blekinge Institute of Technology, 2018.
9. Ooi, J. B., X. Wang, Ch. Tan, J. Ho, and Y. P. Lim. "Modal and stress analysis of gear train design in portal axle using finite element modeling and simulation" *Journal of Mechanical Science and Technology* 26.2 (2012): 575–589. DOI: 10.1007/s12206-011-1040-5.
10. Kuz'mitskii, M. L., N. M. Ksenofontov, and I. N. Bazavluk. "Determination of the level of stresses on wheels of open gears." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2013): 55–63.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Сугак Олег Викторович —
начальник отдела прочности
ООО «УК УралЭнергоСервис»
105094, Российская Федерация, Москва,
ул. Семеновский Вал, 6Д, офис 2–7А
e-mail: ovs1213@ya.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Sugak, Oleg V. —
Head of strength department
UK UralEnergoServis, Ltd.
2–7A, 6D Semenovskii Val Str., Moscow, 105094,
Russian Federation
e-mail: ovs1213@ya.ru

Статья поступила в редакцию 10 января 2022 г.
Received: January 10, 2022.

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-75-86

THE TENDENCIES OF THE GLOBAL CONTAINER TRANSPORT SYSTEM DEVELOPMENT AND SUSTAINABILITY

A. L. Kuznetsov, V. N. Shcherbakova-Slyusarenko, A. D. Semenov

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

The core of scientific methodology is determinism or a vision of connection among all natural, sociological and thinking events and processes. The findings of the modern time in the scope of natural sciences, such as thermodynamics, statistics, quantum mechanics, modern physics of microworld, cosmology and later in sociological sciences, though added some uncertainty and a limited indeterminism, but mostly served as a superstructure on the basement of determinism. The appearance of synergy has allowed methodologically to connect the predictable behavior (i. e. determined) of the systems on the levels of their consistent development with their metamorphoses (catastrophic and deep changes of their structures and features). This connection has appeared in the definition of place and limits of the possibilities of traditional mathematics, probability theory, theory of catastrophes, theory of behavior of dissipative structures and others. For a long time the findings, made in this fundamental science, have been left in the limits of its starting scientific scope — theoretical physics. Gradually it became clear that many results of synergy can be used in other problems, which makes it an interdisciplinary scientific approach, which explains the principals of creation and self-organization of models and structure of open unstable systems. However, the practical branches of human activity, such as economics and transport, have being used the traditional mathematics for the calculation and forecasts until the last time. At the same time, the monotonously growing complexity and scale of the world economical systems represents tendency to unexpected catastrophes and tectonic changes of the structure, which could not be calculated nor forecasted. These processes create an interest of the practical sciences to the synergy: the absence of the instruments that could describe the processes starts to be compensated by the qualitative possibilities to explain and forecast its development, that often become more important that knowledge of certain values. In this research an attempt to review the tendency of the global world transport system development from the view of modern science and explain the fluctuations that appear during the system evolution and do not lead to the paradigm change, and to identify the mechanisms of crises, catastrophes and change of system structure appearance is taken.

Keywords: transport system, synergy, container system, system approach, catastrophe theory, seaports, container shipping, systems sustainability, systems reliability.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko, and Anton D. Semenov. "The tendencies of the global container transport system development and sustainability." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 14.1 (2022): 75–86. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-75-86.

УДК 656.613

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ГЛОБАЛЬНОЙ КОНТЕЙНЕРНОЙ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А. А. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, А. Д. Семенов

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

В работе утверждается, что в основе научной методологии заложен детерминизм, или представление о взаимосвязи всех явлений и процессов, обуславливающих существование закономерностей в природе, обществе и мышлении. Отмечается, что открытия нового и новейшего времени в области естественных наук, таких как термодинамика и базирующиеся на ее основе статистические теории, квантовая механика, современная физика микромира, космология и другие, а позже и теории в области социальных наук, несмотря на некоторую неопределенность и ограниченный недетерминизм, являлись «надстройками»,

базирующимися на незыблемом фундаменте детерминизма. При этом появление синергетики позволило методологически связать предсказуемое, т. е. детерминированное и причинно-следственное, поведение систем на этапах их поступательного развития с метаморфозами (изменениями их структуры и свойств). Подчеркивается, что эта связь проявилась в определении места и границ возможностей традиционной математики, теории вероятностей, теории катастроф, теории поведения диссипативных структур, неравновесной термодинамике и др. Приведено объяснение того, что в течение длительного времени открытия, полученные в рамках этой фундаментальной дисциплины, оставались внутри границ ее начальной предметной области — теоретической физики. Отмечается, что постепенно многие результаты синергетики могут быть перенесены в другие домены, что превратило ее в междисциплинарное научное направление, объясняющее образование и самоорганизацию моделей и структур в открытых системах, далеких от равновесных состояний. Несмотря на это сугубо практические области человеческой деятельности, такие как экономика и транспорт, до последнего времени обходились инструментарием традиционной математики как для расчетов, так и для прогнозов во всех приложениях. Показано, что монотонно растущая сложность и масштабность мировой экономической системы демонстрирует склонность к неожиданным кризисам и «тектоническим» структурным изменениям, которые не могли быть не только рассчитаны количественно, но даже предсказаны. Именно это обстоятельство обусловило интерес к данному вопросу и практической науки: отсутствие возможности количественно охарактеризовать процесс при помощи использования данного инструмента компенсируется качественной возможностью объяснить и предсказать его ход, что все чаще становится важнее определения конкретных значений. В данном исследовании предпринята попытка рассмотреть тенденции развития глобальной мировой транспортно-логистической системы с позиций современной науки, объяснить возникающие в ходе ее эволюции колебания и флуктуации, не приводящие к смене парадигмы, а также идентифицировать механизмы, отвечающие за возникновение кризисов, катастроф и смену структурных моделей системы.

Ключевые слова: транспортная система, синергетика, контейнерная система, системный подход, теория катастроф, морские порты, контейнерные перевозки, устойчивость систем, надежность систем.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Тенденции развития и устойчивость глобальной контейнерной транспортно-логистической системы / А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, А. Д. Семенов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 75–86. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-75-86.

Введение (Introduction)

Изучение любой системы, включая предмет настоящего исследования, начинается с определения ее структуры. Это понятие происходит от лат. слова *structure*, означающего строение, расположение, порядок. Структура системы определяет ее внутреннюю упорядоченность и организованность, отражает определенный уровень сложности по составу отношений множества элементов системы, или уровень разнообразия проявлений объекта [1], [2]. Понятие *структура* включает определенные взаимосвязи, взаиморасположение отдельных частей системы, ее устройство и в общем случае не имеет единого определения. Это объясняется тем, что система является операционным понятием, используемым для объективного научного способа изучения того или иного явления, объекта или процесса. Структура глобальной контейнерной транспортно-логистической системы (сети) в целях данного исследования показана на рис. 1.

Элементами рассматриваемой системы выбраны терминалы, т. е. точки сопряжения грузопотоков контейнерных грузов: морские и фидерные порты, наземные логистические центры, а также конечные пользователи — грузовладельцы. Системными связями в этой структуре являются маршруты перевозок контейнеров между выделенными элементами [3], [4]. Все выделенные маршруты являются лишь направлением перевозки, требуя для реализации связи между элементами движения соответствующих транспортных средств. На океанских маршрутах задействованы гигантские контейнерный суда вместимостью в десятки тысяч контейнеров, на фидерных маршрутах используются суда вместимостью несколько тысяч контейнеров. Маршруты наземного распределения представлены железнодорожными магистралями и автомобильными дорогами. На железной дороге в перевозках участвуют составы вместимостью до сотни контейнеров или отдельные «повагонные» отправки размером в десятки контейнеров. Автомобильные

транспорт осуществляет доставку индивидуальных контейнеров на «последних милях» логистических цепей.

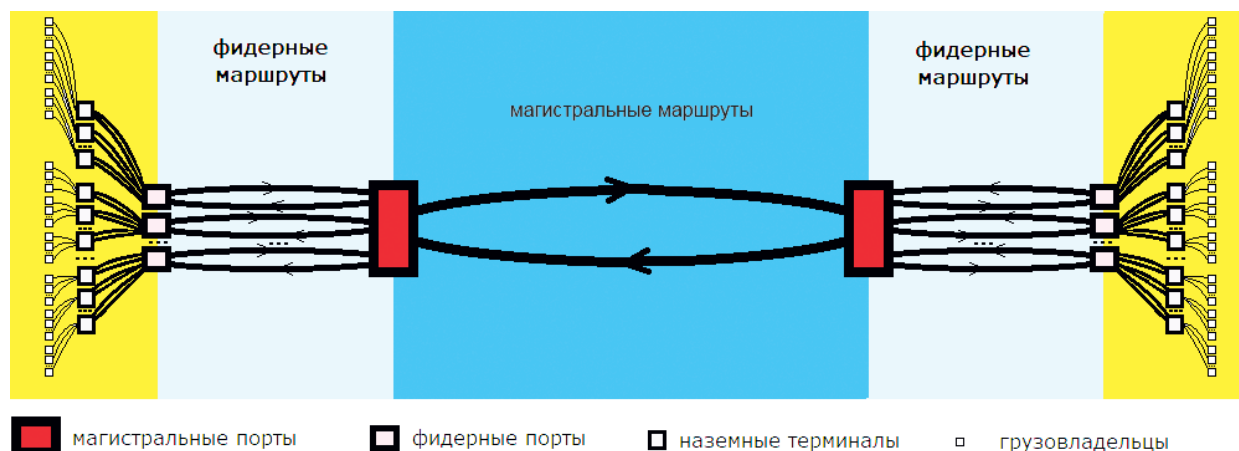


Рис. 1. Структура глобальной транспортно-логистической системы

Очевидно, что эффективная и своевременная доставка контейнерных грузов между конечными точками охвата сети поставок требует синхронизации движения всех транспортных средств, движущихся по маршрутам различной географической локализации и различных иерархических уровней консолидации грузопотоков [5], [6]. При этом синхронизация в основном требуется грузовладельцам, в то время как операторы транспортных средств (океанские перевозчики, фидерные линии, железная дорога, автоперевозчики) заинтересованы в получении максимальной прибыли, что напрямую связано с их загрузкой.

Организация движения судов на океанской линии является крайне сложным и затратным проектом. Типичным для отдельной трансатлантической линии является использование десятка судов вместимостью более тысячи контейнеров и стоимостью около 100 млн долл., т. е. капитализацией около 1 млрд долл. только в расстановку флота. К этому добавляется стоимость владения (или аренды) контейнерного оборудования на борту судна, складах портов, маршрутах и терминалах наземного обращения. Контейнерные перевозчики организуют судоходство между портами лишь при достаточной степени уверенности в наличии груза, позволяющего максимально использовать совокупную провозную способность расставляемого на маршруте флота. При этом полная загрузка флота может быть обеспечена лишь при условии превышения запросов на перевозку над ее предложением, т. е. за счет ухудшения качества оказываемых грузовладельцам услуг.

Обычным средством достижения компромисса между интересами перевозчиков и клиентов является согласование минимального количества перевозимого груза (MQC — Minimum Quantity Commitment), исходя из которого перевозчик устанавливает потребность в провозной способности, выбирает вместимость судов и частоту сервиса, т. е. их количество на линии. За недогрузку судов он получает право требовать компенсации, а за отказ в перевозке оговоренного количества груза компенсацию может получить грузовладелец.

Необходимость полной загрузки транспортных средств, выполняющих перевозки на всех уровнях транспортно-логистической системы, при отсутствии очередей и задержек во всех операционных элементах и уровнях, превращает транспортно-логистическую систему в сложный многозвенный механизм, который можно сравнить с системой взаимодействующих ленточных конвейеров или находящихся в зацеплении шестерней (рис. 2).

На практике взаимодействие всех маршрутов не носит характер подобной регулярной структуры «колес» и «приводных ремней». Реальные магистральные и фидерные маршруты морских перевозок, несмотря на то, что называются «круговыми», представлены более сложными пространственными фигурами (рис. 3).

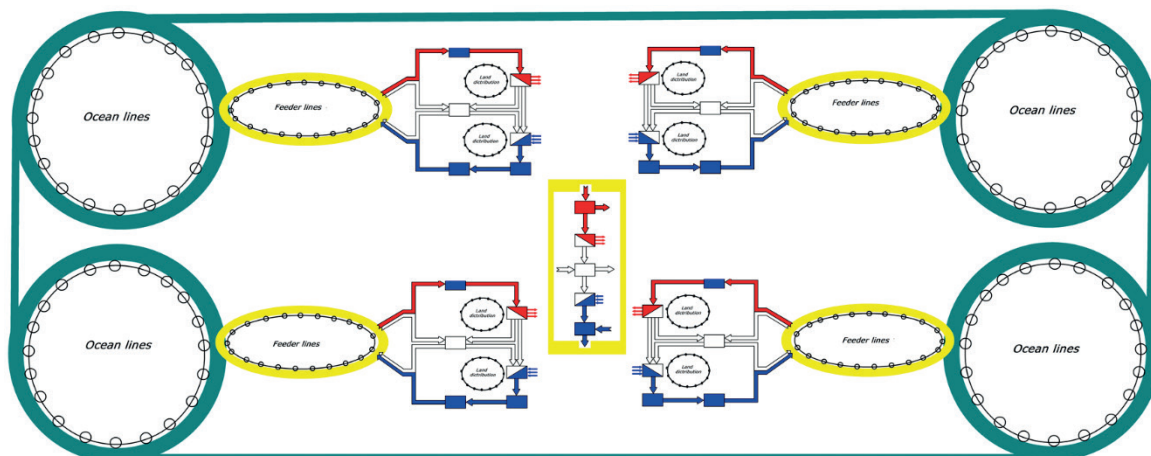


Рис. 2. Контейнерная транспортно-логистическая система как многозвенный механизм

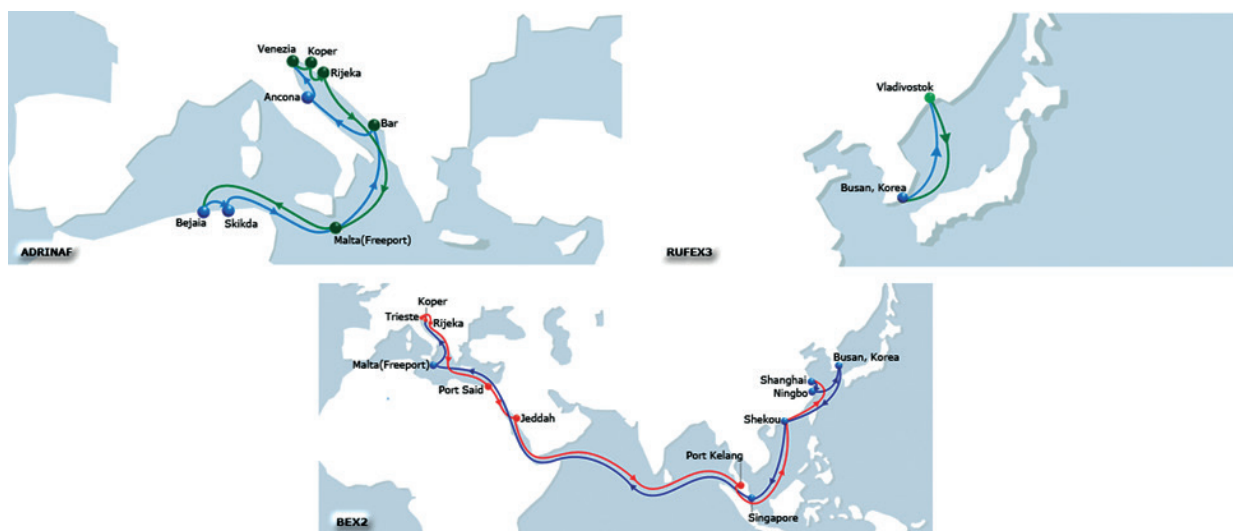


Рис. 3. Взаимодействие магистрального и фидерного маршрутов

Тем не менее базовая структура и основанная на ней модель глобальной транспортно-логистической сети отражается этой концепцией достаточно адекватно. Параметрами анализируемой системы, структура которой была рассмотрена ранее, является общий объем перевезенного в ней груза, стоимость перевозки (тарифы), затраты и прибыль всех ее участников. При устойчивой или стабильно развивающейся мировой торговле также стабильной является глобальная транспортно-логистическая система. Как было определено ранее, система находится в состоянии равновесия. Внешние и внутренние факторы могут оказать влияние на ее стабильность, что неизбежно отразится, также на состоянии обслуживаемых ею мировой торговле и мировой экономике. Сформулированная концептуальная модель позволяет проанализировать действующие факторы и степень их влияния, вызывающих наблюдаемый в 2021–2022 гг. глобальный кризис.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассматриваемая на достаточно коротком промежутке времени любая абстрактная система может считаться находящейся либо в состоянии равновесия, либо в состоянии движения [7]. При этом состояние равновесия включает как состояние покоя, когда все макроскопические

величины в системе остаются постоянными, так и состояние постоянного равномерного движения, которое может трактоваться как «развитие» и определяться монотонным равномерным изменением характеризующих систему величин.

В свою очередь, состояние равновесия в отношении воздействий на систему может быть устойчивым, неустойчивым и безразличным (нейтральным) [8], [9]. Под устойчивостью, различающей эти три состояния, понимается свойство системы возвращаться в исходное состояние после выхода из него и прекращения действия внутренних и внешних возмущений (рис. 4).



Рис. 4. Графический вид понятия устойчивости

Состояние равновесия устойчивых систем может быть не только статическим (когда макроскопические величины постоянны), но и динамическим (когда они флуктуируют вокруг средних значений). Действительно, из опыта известно, что находящийся в устойчивом положении шарик после прекращения малого воздействия на него не вернется в исходное состояние, а продолжит колебаться, как и выведенный из устойчивого положения равновесия маятник (рис. 5).

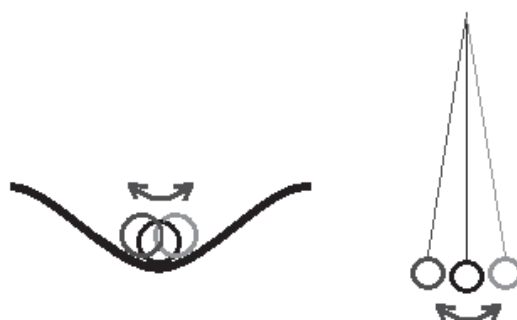


Рис. 5. Примеры динамически устойчивого положения равновесия шарика и маятника

Системы, возвращающиеся в исходное состояние после прекращения действия достаточно малых по величине воздействий, считаются устойчивыми по Ляпунову [10], [11]. Системы, движение которых после прекращения действия возмущений остается в ограниченной области, считаются устойчивыми по Пуанкаре [12], [13]. Нейтральные системы остаются в том положении, в которое они переместились под действием возмущающих воздействий.

Колебания системы вокруг устойчивого положения равновесия могут быть достаточно простыми, как показано на рис. 5, и описываться тривиальными математическими соотношениями. Однако даже простое добавление еще одного маятника в рассматриваемом примере приведет к появлению сложного поведения, трудно поддающегося описанию (рис. 6).

Еще более сложно могут вести себя системы, находящиеся в неустойчивом положении равновесия. Под влиянием возмущающих воздействий они выходят из этого состояния, представляющего собой зону колебаний, условно обозначенную на рис. 6 черным квадратом, и после прекращения их действия начинают движение в направлении нового состояния равновесия, или разрушения системы.

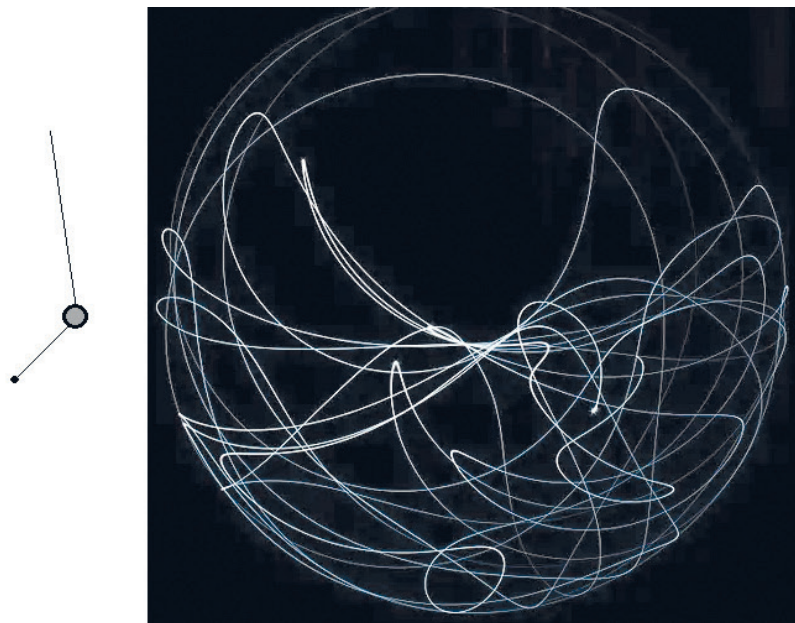


Рис. 6. Пример поведения двойного маятника

В первом приближении переход системы из одного равновесного состояния в другое изучает математическая дисциплина, называемая *теорией катастроф*. Разрушение сформированного в виде системы абстрактного представления переводит проблему в иное пространство параметров, в котором должно формироваться новое представление. Взаимодействие окружающей среды, оказывающей воздействия на первоначальную систему и переводящей систему в новые пространства, изучает математическая дисциплина, называемая *синергетикой*. Более точно синергетика представляет собой междисциплинарное направление науки, объясняющее образование и самоорганизацию моделей и структур в открытых (взаимодействующих с окружающей средой) системах, далеких от состояния равновесия.

В академическом смысле созданная для достижения определенных целей система представляет собой совокупность интегрированных и регулярно взаимодействующих или взаимозависимых элементов, отношения между которыми определены и устойчивы, а общая производительность или функциональность системы выше простой суммы элементов. Изменение параметров системы во времени называется *поведением системы*, которое может быть как целенаправленным, так и хаотическим.

Глобальная контейнерная транспортная система в этом отношении полностью подпадает под классическое определение, что позволяет применить для анализа ее поведения методы общей теории систем. В частности, целью такого анализа может служить также анализ ее устойчивости, поскольку события последних двух лет показали крайнюю зависимость всей мировой торговли, международного сотрудничества, экономического развития и конкуренции от этого свойства контейнерной транспортной системы как инфраструктуры указанных надстроек (суперструктур).

Результаты (Results)

Особенно «болезненным» феноменом вследствие своей неожиданности для всего мирового сообщества оказалась уязвимость глобальной системы торговли и мировой экономики для коронавируса. Как будет показано далее, сам вирус не мог вызвать кризиса экономической системы, но он послужил *спусковым механизмом* для цепи связанных прямыми и косвенными причинно-следственными связями событий, послуживших причиной появления «эффекта домино», который оказался практически смертельно опасным для глобальной мировой торговли и даже геополитической системы в целом.

Рассмотрим факторы, оказавшие влияние на функционирование глобальной контейнерной транспортно-логистической системы:

1. Пандемия COVID-19. Появление вируса в Китае вызвало незамедлительную реакцию властей, результатом которых было тотальное закрытие производственных мощностей и морских портов страны.

2. Доставленные из Китая в порты США и Европы груженные контейнеры с остатками произведенных до локдауна товаров прибыли в логистические центры и локации конечных потребителей, были разгружены и помещены в штабеля порожних контейнеров.

3. Распространение санитарных мер на США и страны Европы парализовало активность морских портов и центров наземного распределения, что вначале не привело к появлению проблем из-за спада спроса на потребительские товары, вызванного жесткими карантинными мерами и закрытием торговых центров.

4. Восстановление производства в Китае возобновило предложение товаров, рождественская торговля и решения президента США о выплатах населению для поддержания покупательной способности вернули спрос, однако образовавшийся в Китае дефицит порожних контейнеров не способствовал его удовлетворению.

5. Контейнерные линии в период спада испытывали трудности с загрузкой судов, и в качестве меры по снижению потерь были использованы «холостые заходы» (пропуски портов ротации), отмена рейсов, вывод судов в отстой.

6. Оставшиеся в обороте и возвращаемые в него по мере восстановления спроса на перевозки суда явились причиной возникновения операционных проблем во всех крупных портах, ослабленных тотальным карантинном, что привело к появлению огромных очередей судов в ожидании обслуживания.

7. Глобальные запреты на передвижение явились причиной появления проблем для ротации экипажей контейнеровозов в запланированных портах маршрутов.

8. Дефицит провозной способности при растущем спросе на транспортные услуги естественным образом способствовал росту тарифов, которые в среднем выросли в разы, а на некоторых направлениях — на порядки.

9. Контейнерные линии получили возможность компенсировать все затраты, понесенные ими во время вынужденного снижения активности, при этом высокая стоимость и востребованность перевозки груженных контейнеров сделали экономически невыгодным ожидание обратной доставки порожних контейнеров.

10. Дефицит контейнерного тоннажа и порожних контейнеров вызвали рост заказов на их строительство, который, очевидно, будет превышать уровень спроса после выхода из кризиса.

11. Межнациональный профсоюз портовых грузчиков и складских рабочих (International Longshore and Warehouse Union, ILWU), как всегда, вовремя начал активную борьбу за права трудящихся, которая сделала малопривлекательными все порты Западного побережья США.

12. Возникшие проблемы явились причиной ухудшения создававшихся в течение многих десятилетий отношений между перевозчиками, общественными перевозчиками — несудовладельцами (non-vessel Operated Common Carriers (NVOCC)) и грузовладельцами в форме снижения роли этих важнейших посредников.

13. Изменчивость условий ведения бизнеса исключила возможность установления сколько-нибудь достоверных соглашений MQC, что сделало индустрию морских перевозок плохо поддающейся среднесрочному и долгосрочному планированию даже по сравнению с имеющимися всегда в этом секторе циклическими волнами.

Таким образом, на основании ранее изложенного можно сделать вывод о том, что все указанные факторы находятся во взаимозависимости и иногда сложно определить их место в сложной сети причинно-следственных связей. В любом случае поведение рассматриваемой в исследовании глобальной транспортно-логистической системы свидетельствует о ее очевидной неустойчивости, т. е. о неуправляемом движении к некоторому новому состоянию.

Обсуждение (Discussion)

Можно сделать важный вывод из анализа причин внезапной нестабильности транспортно-логистической системы, свидетельствующий о ее приближении к точке бифуркации. В синергетике под бифуркацией понимается появление возможности качественной перестройки, или метаморфозы, различных систем при изменении макроскопических параметров, от которых они зависят. В этот момент плавно развивающееся и более-менее предсказуемое поведение системы характеризуется плохо предсказуемой сменой общего направления.

В данном контексте можно свидетельствовать о наступлении системной катастрофы, понимаемой как скачкообразное изменение одного или нескольких динамических параметров системы в ходе монотонного изменения управляемых параметров при достижении некоторого порогового их совокупного значения. В аспекте ведения бизнеса системная катастрофа принимает более обыденное и тем самым более трагическое значение для всех вовлеченных в эту деятельность сторон. Все участники транспортно-логистического бизнеса предпринимают отчаянные попытки, одни — выжить, другие — извлечь максимальную выгоду из происходящей катастрофы. Катастрофа, по своему определению, не может длиться долго, поскольку связана со скачкообразным переходом в новое состояние. Проблема заключается в том, чтобы спрогнозировать это новое состояние и наилучшим способом подготовиться к нему.

Владельцы и пользователи глобальных логистических цепей поставки, т. е. крупнейшие игроки мировой экономики, пытаются сформулировать для себя новые принципы проектирования этих сетей, среди которых можно отметить следующие.

1. Исключение зависимости от китайской экономики, принимающей форму правила «Китай + 1» и вызывающей структурную избыточность сетей поставок.

2. Отход от принципов «тощей» логистики в сторону создания страховочных запасов в критически важных звеньях сетей, приводящих к росту логистических затрат и стоимости их использования.

3. Стремление обеспечить больший контроль за созданными цепями, проявляющийся в широком спектре мер — от снижения степени глобализации до локализации в национальной экономике практически всех развитых и развивающихся стран.

4. Использование новых формируемых геополитических альянсов («встраивание в геополитику») для обеспечения устойчивости создаваемой логистической инфраструктуры.

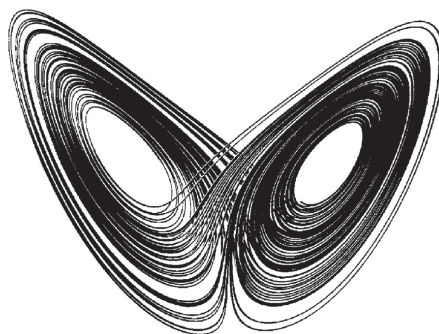
5. Пересмотр финансово-экономических критериев в связи с прогнозируемым долгосрочно высоким уровнем тарифов на контейнерные перевозки, в определенном смысле разрушающим основу контейнерной системы как идеального транспорта (быстрого, мгновенного, всегда доступного и перевозящего любые объемы).

Возможно, главным выводом, сделанным на основе выполненного анализа структуры современной транспортно-логистической системы, ее развития и произошедшего кризиса, является *неправильность оценки роли в ней собственно контейнера*. По умолчанию считалось, что контейнер выполняет роль только тары, пусть многооборотной и дорогостоящей, но лишь пассивно участвующей в системном процессе перевозки. Центр тяжести планирования и контроля за происходящими транспортными процессами традиционно размещался в точке организации рационального движения транспортных средств различных «активных» видов транспорта, значимость которых в процессе планирования убывала с их вместимостью. Доминирующую роль при этом получал *магистральный морской транспорт*, к провозной способности и расписанию которого подстраивались фидерные перевозки, в соответствии с которыми формировалась организационная структура железнодорожных перевозок.

Автомобильный транспорт, осуществляющий обслуживание «последней мили» и оперирующий единичными контейнерами, организовывал свою работу стихийно (*ad hoc*), через действие рыночных механизмов мгновенного соотношения *спроса и предложения*. Сами контейнеры из «транспортного уравнения» при этом исключались вообще. В то же время даже в соответствии с транспортным законодательством многих стран контейнер всегда рассматривался как транс-

портное средство, со всем вытекающими из этого положительными и отрицательными сторонами. В частности, обязательная процедура их обратного вывоза считалась досадным бюрократическим требованием, а большое количество контейнеров в любых локациях создавало иллюзию постоянной доступности по мере возникновения потребности. Однако контейнер в случае перевозки на другом виде транспорта формирует не просто мультимодальную (выполняемую несколькими видами транспорта) или интермодальную (выполняемую несколькими видами транспорта в виде неизменной транспортной единицы под единой организацией и документами) перевозку, но и перевозку одного вида транспорта на другом. Такая комбинированная перевозка в англоязычной литературе называется *Piggy Back* («на закорках»), предполагая особо тщательную координацию подлежащих транспортировке грузов и синхронизацию движения транспорта. Очевидно, что в сложившейся контейнерной транспортно-технологической системе такая комбинированная перевозка в неявном виде присутствует во всех звеньях глобальной транспортной сети, что увеличивает ее сложность.

Безусловно, приведенные на рис. 1 и 2 системы глобальной сети являются лишь иллюстрацией общей идеи ее функционирования, однако они позволяют понять, что все элементы системы объединены именно взаимосвязью во всех звеньях этих механизмов контейнеров, груженых или порожних. Безусловно, их перемещение по маршрутам этой упрощенной схемы и даже более реальной, показанной на рис. 3, не носит характер тривиального «вращения приводных ремней». Наложенные на структуру системы совокупные движения всех контейнеров, следующих от точек возникновения локальных грузопотоков к точкам их поглощения, повторяя затем этот цикл под общим управлением грузового экспедирования, напоминают хорошо известную в синергетике картину колебания системы вокруг странного аттрактора Лоренца (рис. 7).



*Рис. 7. Колебания системы
вокруг странного аттрактора*

Вывод тоннажа из оборота был вызван относительно кратковременным спадом спроса, обусловленным приостановкой производства и потребления вследствие действия ограничений, вызванных пандемией. С приостановкой транспортировки было связано также накопление контейнеров на складах грузополучателей. Столь же резкое возобновление спроса привело к дефициту контейнеров в пространстве логистических сетей, т. е. в нужном месте в нужное время, а не в абсолютном выражении. Недостаток судов также в значительной степени оказался вторичным, поскольку выставлять имеющие суда на линию в условиях дефицита контейнеров и перегруженности портов нерационально. Тем не менее временной и очень опасной в долгосрочной перспективе меры было выбрано ускоренное строительство контейнеров и контейнерных судов.

Определенные циклические волны спроса и предложения всегда были характерны для экономики и транспорта. В создавшейся ситуации раскачивание этой «лодки» достигло таких размеров, что может угрожать всей существующей системе, точнее, ее текущему состоянию. При этом в данном исследовании еще не принимались во внимание геополитические противостояния, риски военных конфликтов, рост санкций, усиливающийся «экономический национализм» и многие другие факторы, анализ которых выходит за рамки глобальной логистики.

Новое понимание базовых принципов «физического» (материального) функционирования контейнерной транспортно-логистических системы, в совокупности с пересмотренными принципами ее проектирования и использования в ближайшие годы, безусловно, приведут к ее значительному изменению. При этом прогнозировать конкретный вариант, к которому приведет случившаяся катастрофа, практически невозможно, но предположить все возможные варианты (исходы) крайне желательно.

Выводы (Conclusions)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Экономические циклы являются неизбежным атрибутом рыночной экономики и заключаются в периодическом, но нерегулярном колебании уровня экономической активности.
2. Колебания спроса и предложения, сопутствующие экономическим циклам, напрямую влияют на транспортную систему.
3. Большие циклы Кондратьева, или К-циклы, традиционно связывают со сменой технологических укладов общества.
4. Влияние глобальной контейнерно-транспортно-логистической системы на развитие мировой экономики, международного разделения труда, размещения производства и распределения капитала формирует классический технологический уклад в экономике.
5. Относительно небольшие колебания макроскопических параметров системы, основанной на этом технологическом и экономическом укладе, происходили на фоне устойчивой тенденции быстрого роста с момента его появления.
6. Наблюдаемая в настоящее время ситуация может свидетельствовать о достижении системой не просто кризисного снижения активности, но даже о ее приближении к точке бифуркации, которая внутри системы приведет к изменению ее структуры, а во внешнем окружении — к появлению нового технологического уклада мировой экономики.
7. Классические методы прогнозирования, относительно хорошо зарекомендовавшие себя при эволюционном развитии мировой экономики между точками бифуркации, оказываются неприемлемыми в точках катастроф.
8. В настоящий момент следует пытаться прогнозировать не конкретные изменения макроскопических параметров существующей экономической и транспортно-логистической системы, а оценить пространство возможных состояний перехода и вероятности этих состояний.
9. Для каждого из идентифицированных новых состояний следует попытаться создать наиболее адекватный проактивный сценарий действий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cetin C. K. Organizational effectiveness at seaports: a systems approach / C. K. Cetin, A. G. Cerit // Maritime Policy & Management. — 2010. — Vol. 37. — Is. 3. — Pp. 195–219. DOI: 10.1080/03088831003700611.
2. Fatimazahra B. Dry port-seaport system development: Application of the product life cycle theory / B. Fatimazahra, F. R. I. Mouhsene, C. Mabrouki, A. Semma // Journal of Transportation and Logistics. — 2016. — Vol. 1. — Is. 2. — Pp. 115–128. DOI: 10.22532/jtl.267840.
3. Кузнецов А. Л. Портоориентированная логистика: моногр. / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, О. В. Соляков, А. Д. Семёнов. — М.: Моркнига, 2021. — 247 с.
4. Кузнецов А. Л. Морские контейнерные перевозки: моногр. / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, О. В. Соляков, А. Д. Семенов. — М.: Моркнига, 2019. — 412 с.
5. Кузнецов А. Л. Расчет флота и парка контейнерного оборудования судоходной линии / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 539–547. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.
6. Галин А. В. Модель оптимизации линейных маршрутов на основе генетического алгоритма / А. В. Галин, А. С. Малихин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 530–538. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-530-538.

7. Fang X. Synergy degree evaluation of container multimodal transport system / X. Fang, Z. Ji, Z. Chen, W. Chen, C. Cao, J. Gan // *Sustainability*. — 2020. — Vol. 12. — Is. 4. — Pp. 1487. DOI: 10.3390/su12041487.
8. Dirksen M. Evaluation of synergy potentials in transportation networks managed by a fourth party logistics provider / M. Dirksen, G. Magnin // *Transportation research procedia*. — 2017. — Vol. 25. — Pp. 824–841. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.460.
9. Abramović B. Synergy In Logistics Processes For Railway Transport / B. Abramović, E. Nedeliakova, M. Panak, D. Šipuš // *Proceedings of The 17th International Scientific Conference “Business Logistics in Modern Management”*. — Osijek, 2017. — Pp. 15–28.
10. Pelinovsky D. Bifurcations of standing localized waves on periodic graphs / D. Pelinovsky, G. Schneider // *Annales Henri Poincaré*. — Springer International Publishing, 2017. — Vol. 18. — Is. 4. — Pp. 1185–1211. DOI: 10.1007/s00023-016-0536-z.
11. Poincare A. Sur les courbes definies par les equations differentielles / A. Poincare // *Journal de math.* — 1947. — Vol. 3. — Pp. 375–422.
12. Liu Y. New study on the center problem and bifurcations of limit cycles for the Lyapunov system (I) / Y. Liu, J. Li // *International journal of bifurcation and chaos*. — 2009. — Vol. 19. — No. 11. — Pp. 3791–3801. DOI: 10.1142/S0218127409025110.
13. Lyapunov A. M. *Stability of Motion* / A. M. Lyapunov. — New York: Academic Press, 1892.

REFERENCES

1. Cetin, Cimen Karatas, and A. Güldem Cerit. “Organizational effectiveness at seaports: a systems approach.” *Maritime Policy & Management* 37.3 (2010): 195–219. DOI: 10.1080/03088831003700611.
2. Fatimazahra, Bentaleb, Mouhsene Fri, Charif Mabrouki, and Alami Semma. “Dry port-seaport system development: Application of the product life cycle theory.” *Journal of Transportation and Logistics* 1.2 (2016): 115–128. DOI: 10.22532/jtl.267840.
3. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, O. V. Solyakov, and A. D. Semenov. *Porto-orientirovannaya logistika: monografiya*. M.: MORKNIGA, 2021.
4. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, O. V. Solyakov, and A. D. Semenov. *Morskie konteinernye perevozki: monografiya*. M.: MORKNIGA, 2019.
5. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. “Assessment of container ship and equipment fleet size.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 539–547. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.
6. Galin, Aleksandr V., and Aleksandr S. Malykhin. “Genetic algorithm-based linear routes optimization model.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 530–538. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-530-538.
7. Fang, Xiaoping, Zhang Ji, Zhiya Chen, Weiya Chen, Chao Cao, and Jinrong Gan. “Synergy degree evaluation of container multimodal transport system.” *Sustainability* 12.4 (2020): 1487. DOI: 10.3390/su12041487.
8. Dirksen, Michael, and Gaelle Magnin. “Evaluation of synergy potentials in transportation networks managed by a fourth party logistics provider.” *Transportation research procedia* 25 (2017): 824–841. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.460.
9. Abramović, Borja, Eva Nedeliakova, Michal Panak, and Denis Šipuš. “Synergy In Logistics Processes For Railway Transport.” *Proceedings of The 17th International Scientific Conference “Business Logistics in Modern Management”*. Osijek, 2017. 15–28.
10. Pelinovsky, Dmitry, and Guido Schneider. “Bifurcations of standing localized waves on periodic graphs.” *Annales Henri Poincaré*. Vol. 18. No. 4. Springer International Publishing, 2017. 1185–1211. DOI: 10.1007/s00023-016-0536-z.
11. Poincare, A. “Sur les courbes definies par les equations differentielles.” *Journal de math* 3 (1947): 375–422.
12. Liu, Yirong, and Jibin Li. “New study on the center problem and bifurcations of limit cycles for the Lyapunov system (I).” *International journal of bifurcation and chaos* 19.11 (2009): 3791–3801. DOI: 10.1142/S0218127409025110.
13. Lyapunov, A. M. *Stability of Motion*. New York: Academic Press, 1892.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

**Щербакова-Слюсаренко
Виктория Николаевна** —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: victorysch@mail.ru

Семенов Антон Денисович — аспирант
Научный руководитель:
Кузнецов Александр Львович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: asemyonov054@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

**Shcherbakova-Slyusarenko,
Victoria N.** —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: victorysch@mail.ru

Semenov, Anton D. — Postgraduate
Supervisor:
Kuznetsov, Aleksandr L.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: asemyonov054@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 3 февраля 2022 г.
Received: February 3, 2022.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-87-92

ANALYSIS OF CONTAINER CARGO-DISTRIBUTION FOR COMBINED CONSIGNMENTS SHIPMENT FROM THE SEAPORT

O. A. Izotov

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

The impact of the internal sub-container technologies introduction on the transportation of bulk shipments deep into the Hinterland of the sea container terminal is analyzed in the paper. The characteristics of the internal container cargo distribution and the dynamics of its changes associated with the transfer of loading and unloading operations from the territory of the sea terminal to the rear zone are revealed. The influence of new means of combined shipments consolidation on the reduction of the terms of using heavy-duty containers in the Hinterland of the seaport is noted. The mechanism of organizing small shipments transportation in Hinterland is considered and its components are indicated. A simple correlation (regressive) model, which allows the entire production process under consideration to be reduced to a function in which the dependent variable is a relationship with one independent argument, is given. It is noted that the processes occurring in the system under consideration are random and further investigation of the behavior of the system itself requires a set of primary statistics. The task formulated in the study allows us to conclude that the introduction of new means of combined shipments consolidation can be reflected in significant fluctuations in container shipments and the time of using containers in the Hinterland zones. At the same time, such differences, due to the limited time of containers use in the period between ship calls and the insignificance of the delivered bulk shipments volume from the total container traffic (8–12 %), cannot have a significant impact on the rhythm of the container terminal and related types of transportation. For the purpose of separate accounting of containers movement with small shipments, simulation modeling methods, allowing us to obtain probability density distribution of containers being located in the processing zones, are recommended for use.

Keywords: transportation modeling, combined cargo, container technologies, hinterland, seaport, correlation model, simulation modeling

For citation:

Izotov, Oleg A. "Analysis of container cargo-distribution for combined consignments shipment from the seaport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 87–92. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-87-92.

УДК 656.073.2

АНАЛИЗ КОНТЕЙНЕРНОГО ГРУЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТПРАВКИ СБОРНЫХ ПАРТИЙ ИЗ МОРСКОГО ПОРТА

О. А. Изотов

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

В работе выполнен анализ влияния внедрения внутренних субконтейнерных технологий на перевозку сборных партий грузов вглубь хинтерленда морского контейнерного терминала. Выявлены характеристики внутреннего контейнерного грузораспределения и динамика его изменения, связанная с переносом погрузочно-разгрузочных операций с территории морского терминала в тыловую зону. Отмечается влияние новых средств укрупнения сборных партий грузов на сокращение сроков использования большегрузных контейнеров в хинтерленде морского порта. Рассмотрен механизм организации перевозок малых партий грузов в хинтерленде и указаны его слагаемые. Приведена простая корреляционная (регрессивная) модель, позволяющая свести весь рассматриваемый производственный процесс к такой функции, в которой зависимая переменная представляет собой связь с одним независимым аргументом. Отмечается, что процессы, протекающие в рассматриваемой системе, носят случайный характер, и дальнейшее исследование поведения самой системы требует совокупности данных первичной статистики. Сформулированная в исследовании

задача позволяет сделать вывод о том, что внедрение новых средств укрупнения сборных партий грузов может найти свое отражение в существенных разбросах контейнерных отправок и времени использования контейнеров в зонах хинтерленда. Вместе с тем такие разбросы, ввиду ограниченности сроков использования контейнеров в период между судозаходами и незначительностью объема доставляемых сборных партий грузов от общего контейнеропотока (8–12 %), не способны оказать существенного влияния на ритм работы контейнерного терминала и смежных видов транспорта. В целях отдельного учета движения контейнеров с малыми партиями грузов к применению рекомендованы методы имитационного моделирования, позволяющие получать распределение плотности вероятности нахождения контейнеров в зонах обработки.

Ключевые слова: моделирование перевозок, сборные грузы, контейнерные технологии, хинтерленд, морской порт, корреляционная модель, имитационное моделирование.

Для цитирования:

Изотов О. А. Анализ контейнерного грузораспределения отправки сборных партий из морского порта / О. А. Изотов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 87–92. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-87-92.

Введение (Introduction)

Предварительное исследование планируемого к внедрению производственного или экономического процесса можно провести как на основе простой, так и сложной (многомерной) корреляционной (регрессивной) модели [1]. Применение простых моделей возможно, если это не сопровождается с потерей существенной информации, описывающей протекающие в системе процессы. Легко определяющиеся и поддающиеся истолкованию зависимости с одной независимой переменной, имеющие значимую практическую полезность, проще описать при помощи простой корреляционной (регрессивной) модели. С одной стороны, корреляционно-регрессионный анализ является одним из наиболее широко распространенных и гибких приемов обработки статистических данных, с другой — такая модель позволяет определить колебания оцениваемых показателей исследуемой зависимой переменной при каждом изменении значений известной независимой переменной [2].

В данном случае задача корреляционного анализа может быть сведена к выделению первостепенного фактора, который оказывает существенное или наиболее значимое влияние на оцениваемый результат. Задача регрессионного анализа заключается в установлении формы зависимости и влияния выделенного фактора на показатели неизвестных значений зависимой переменной, что позволяет, в конечном итоге, приступить к прогнозированию возможных значений результативного признака при заданных значениях факторных признаков.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Представим систему отгрузки сборных грузов с территории морского терминала в зону хинтерленда. Такие грузы прибывают в порт морским транспортом в большегрузных контейнерах и отправляются вглубь материка подвижными средствами смежного транспорта либо сразу, либо после растарки контейнера в тарно-штучно виде [3] (рис. 1, а). С введением в оборот новых средств укрупнения малых партий грузов [4]–[6] возможна отправка как согласно указанным ранее вариантам, так и сразу во внутриконтейнерных модулях (рис. 1, б).

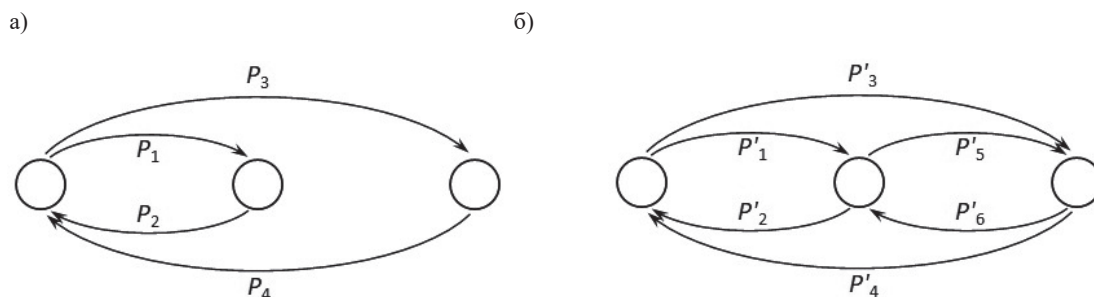


Рис. 1. Схемы транспортировки сборных грузов в зоне хинтерленда:
а — в контейнерах (P_1) и в тарно-штучном виде (P_3); б — в контейнерах (P'),
в тарно-штучном виде (P'_3 и P'_5) и во внутриконтейнерных модулях (P'_3 и P'_5)

Рассмотрим слагаемые организации перевозок малых партий грузов в хинтерленде. В идеальном случае грузопотоки, исходящие с территории порта, и грузопотоки, возвращающиеся в порт, должны быть равны [7], тогда в первом случае

$$P_1 + P_3 = P_2 + P_4; \quad (1)$$

во втором случае

$$P'_1 + P'_3 + P'_5 = P'_2 + P'_4 + P'_5. \quad (2)$$

Кроме того, следует отметить, что грузопотоки в обоих случаях равны:

$$P_1 + P_3 = P'_1 + P'_3 + P'_5. \quad (3)$$

При этом, в силу стремления к наиболее полному использованию преимуществ контейнерных технологий, $P_1 \rightarrow \max$. В то же время в целях сокращения сопряженных с перевозкой погрузочно-разгрузочных операций, $P'_1 \rightarrow \min$. Таким образом,

$$P_1 \neq P'_1. \quad (4)$$

Продолжив рассуждения, можно записать следующее:

$$P_3 \neq P'_3, \quad (5)$$

поскольку в первом случае P_3 включает только тарно-штучные грузы, а во втором — P'_3 и P'_5 предполагают также тарно-штучные отправки и перевозку малых партий грузов во внутриконтейнерных модулях (см. рис. 1).

Результаты (Results)

Простая корреляционная (регрессивная) модель позволяет свести весь рассматриваемый производственный процесс к такой функции, в которой переменная Y представляет собой зависимость только от одного аргумента X .

Общий вид модели в первом случае

$$Y = X - fX, \quad (6)$$

где Y — объем грузов, отгружаемый из порта в контейнерах; X — объем грузов, отгружаемый из порта; f — доля грузов, отгружаемая в тарно-штучном виде (от 0 до 1).

При этом функциональные зависимости между переменными Y и X выражаются в линейной форме. Во втором случае зависимости между переменными Y и X могут быть выражены следующим образом при $f + \beta \leq 1$:

$$Y = X - (fX + \beta X), \quad (7)$$

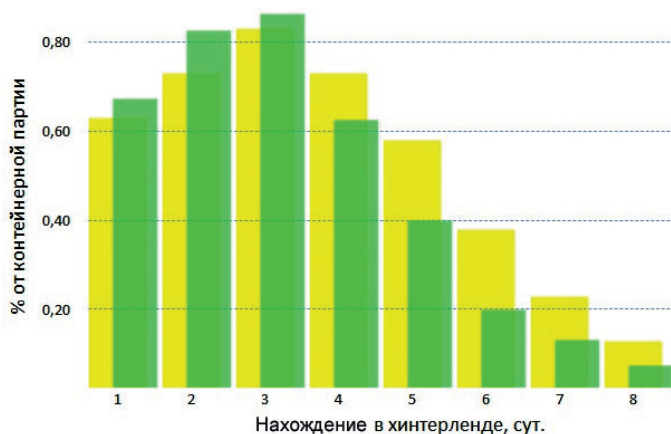
где Y — объем грузов, отгружаемый из порта в контейнерах; X — объем грузов, отгружаемый из порта; f — доля грузов, отгружаемая в тарно-штучном виде; β — доля грузов, отгружаемая во внутриконтейнерных модулях.

В выражении (7) независимая переменная X и коэффициенты f и β входят в модель нелинейно. Кроме того, коэффициенты f и β отражают случайные процессы, протекающие в системе в момент t_0 — при поступлении грузопотока в порт распределения. Так, при обработке полученных статистических данных для их расчетов здесь могут быть применены марковские матрицы отклонений [8]–[11].

Таким образом, внедрение новых средств укрупнения сборных партий грузов [12]–[13] найдет свое отражение в существенных разбросах контейнерных отправок и времени использования контейнеров в зонах хинтерленда (см. рис. 2, а) и морского терминала (см. рис. 2, б). Такие разбросы, ввиду ограниченности сроков использования контейнеров в период между судозаходами и незначительностью объема доставляемых сборных партий грузов от общего контейнеропотока (8–12 %), неспособны оказать значительного влияния на ритм работы контейнерного терминала и смежных

видов транспорта, однако требуют отдельного учета. Для этого целесообразно использовать *методы имитационного моделирования* [14]–[16], позволяющие получать распределение плотности вероятности нахождения контейнеров в зонах обработки (рис. 2).

а)



б)

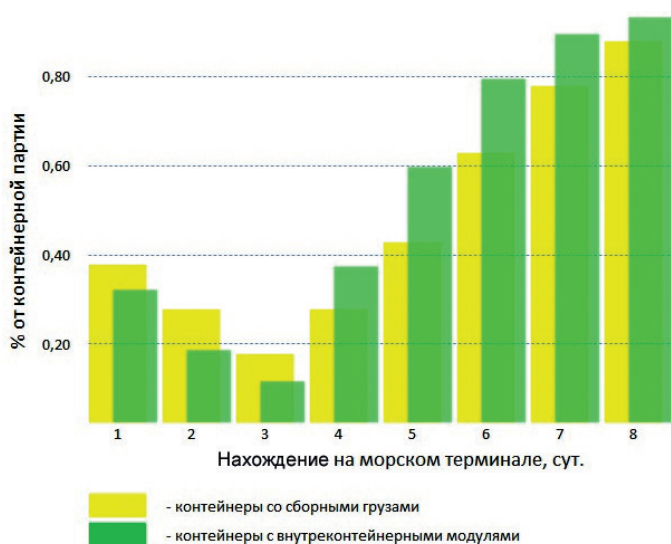


Рис. 2. Гистограмма распределения вероятности нахождения контейнеров со сборными грузами в зонах обработки:
а — в хинтерленде; б — на морском терминале

Как видно из гистограммы, внедрение внутриконтейнерных модулей позволит сократить время пребывания контейнеров в хинтерленде и сроки возвращения контейнеров на морской терминал.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная модель контейнерного грузораспределения при доставке сборных грузов из морского порта в глубь материка логична, т. е. не дает противоречащих логике результатов при вариации входящих в нее параметров.
2. Сопоставление выводов, сделанных на основе анализа данной модели, не противоречит наблюдаемым фактам и, соответственно, может считаться адекватным описываемому процессу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aas K. Pair-copula constructions of multiple dependence / K. Aas, C. Czado, A. Frigessi, H. Bakken // *Insurance: Mathematics and Economics*. — 2009. — Vol. 44. — Is. 2. — Pp. 182–198. DOI: 10.1016/j.insmatheco.2007.02.001.
2. Bedford T. Probability density decomposition for conditionally dependent random variables modeled by vines / T. Bedford, R. M. Cooke // *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*. — 2001. — Vol. 32. — Is. 1. — Pp. 245–268. DOI: 10.1023/A:1016725902970.
3. Кириченко А. В. Перевозка экспортно-импортных грузов. Организация логистических систем / А. В. Кириченко. — 2-е изд. — СПб.: Питер, 2004. — 506 с.
4. Кузнецов А. Л. Классификация и функциональное моделирование эшелонированных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 6 (34). — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
5. Изотов О. А. Роль транспортно-логистических кластеров в формировании контейнерных коридоров перевозок сборных грузов / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, Д. Л. Головцов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2020. — № 2. — С. 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136.
6. Кузнецов А. Л. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: моногр. / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 320 с.
7. Изотов О. А. Процессы формирования сборных контейнерных партий груза / О. А. Изотов, Ю. И. Васильев, О. А. Ражев // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.
8. Анфилатов В. С. Системный анализ в управлении: учеб. пособие / В. С. Анфилатов, А. А. Емельянов, А. А. Кукушкин. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 368 с.
9. Бородачѳ С. М. Теория принятия решений: учеб. пособие / С. М. Бородачѳ. — Екатеринбург: Уральский федеральный ун-т, 2014. — 124 с.
10. Демидова Л. А. Принятие решений в условиях неопределенности / Л. А. Демидова, В. В. Кираковский, А. Н. Пылькин. — М.: Горячая линия — Телеком, 2012. — 290 с.
11. Кельберт М. Я. Вероятность и статистика в примерах и задачах / М. Я. Кельберт, Ю. М. Сухов. — Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. — М.: МЦНМО, 2010. — 295 с.
12. Изотов О. А. Перспективы развития технологий перевозки сборных грузов в контейнерах / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2020. — № 1. — С. 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148.
13. Изотов О. А. Оценка требуемых технологических ресурсов путем статистического моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гулятьев // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-506.
14. Кузнецов А. Л. Оценка времени доставки в сложных цепях поставки с помощью моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.
15. Larsen R. B. Model predictive control for simultaneous planning of container and vehicle routes / R. B. Larsen, B. Atasoy, R. R. Negenborn // *European Journal of Control*. — 2021. — Vol. 57. — Pp. 273–283. DOI: 10.1016/j.ejcon.2020.06.003.
16. Кузнецов А. Л. Расчет флота и парка контейнерного оборудования судоходной линии / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 539–547. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.

REFERENCES

1. Aas, Kjersti, Claudia Czado, Arnoldo Frigessi, and Henrik Bakken. "Pair-copula constructions of multiple dependence." *Insurance: Mathematics and economics* 44.2 (2009): 182–198. DOI: 10.1016/j.insmatheco.2007.02.001

2. Bedford, Tim, and Roger M. Cooke. "Probability density decomposition for conditionally dependent random variables modeled by vines." *Annals of Mathematics and Artificial intelligence* 32.1 (2001): 245–268. DOI: 10.1023/A:1016725902970.
3. Kirichenko, A. V. *Perevozka eksportno-importnykh грузов. Organizatsiya logisticheskikh sistem*. 2nd edition. SPb.: Piter, 2004.
4. Kuznetsov, Aleksandr Lvovich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Aleksandr Aleksandrovich Davydenko. "Classification and functional modeling of echeloned container terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(34) (2015): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
5. Izotov, Oleg Albertovich, Alexander Lvovich Kuznetsov, and Dmitriy Lvovich Golovtsov. "Role of transport and logistics clusters in creating container corridors for groupage cargo transportation." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2020): 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136.
6. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and A. A. Davydenko. *Morskaya konteiner'naya transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.
7. Izotov, Oleg A., Yuri I. Vasiliev, and Oleg A. Razhev. "Processes for forming groupage container consignments." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.
8. Anfilatov, V. S., A. A. Emel'yanov, and A. A. Kukushkin. *Sistemnyi analiz v upravlenii: Uchebnoe posobie*. M.: Finansy i statistika, 2002.
9. Borodachev, S. M. *Teoriya prinyatiya reshenii: Uchebnoe posobie*. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet, 2014.
10. Demidova, L. A., V. V. Kirakovskii, and A. N. Pyl'kin. *Prinyatie reshenii v usloviyakh neopredelennosti*. M.: Goryachaya liniya — Telekom, 2012.
11. Kel'bert, M. Ya., and Yu. M. Sukhov. *Veroyatnost' i statistika v primerakh i zadachakh. T. II: Markovskie tsepi kak otpravnyaya tochka teorii sluchainykh protsessov i ikh prilozheniya*. M.: MTsNMO, 2010.
12. Izotov, Oleg Albertovich, and Alexander Lvovich Kuznetsov. "Development prospects of technologies of grouped cargo containerization." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2020): 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148.
13. Izotov, Oleg A., and Alexander V. Gulyaev. "Assessment of required technological resources by statistical simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-506.
14. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. "Evaluating lead-time in complex supply chains by simulation technique." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.
15. Larsen, Rie B., Bilge Atasoy, and Rudy R. Negenborn. "Model predictive control for simultaneous planning of container and vehicle routes." *European Journal of Control* 57 (2021): 273–283. DOI: 10.1016/j.ejcon.2020.06.003.
16. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. "Assessment of container ship and equipment fleet size." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 539–547. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Изотов Олег Альбертович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Izotov, Oleg A. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 21 января 2022 г.
Received: January 21, 2022.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103

ANALYTICAL REVIEW OF DOMESTIC AND FOREIGN EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT AND DESIGN OF SHIP REVERSE GEARS

R. V. Kuznetsov

PJSC, Zvezda, St. Petersburg, Russian Federation

The object of the study is mechanical ship reverse gears, which are the components of diesel-diesel, diesel-gas turbine and gas turbine main power plants of ships and vessels with a transmitted power of up to 24,000 kW and a torque of up to 590 kN·m for civil, special and dual (multipurpose) use ships. As part of the work, analytical studies of domestic and international experience in the development and design of modern ship reverse gears, their units and components are carried out. Typical design solutions and kinematic diagrams of ship gears are considered. As layout solutions, sorting gearboxes with axles offset, angular gearboxes and coaxial gearboxes are distinguished. A review of the technical characteristics of gearboxes for commercial marine vessels of most international and domestic manufacturers is made. The existing design and technological solutions for gear blocks of gearboxes are considered depending on their power. With regard to the power range under consideration, solutions that provide both a change in the direction of propeller rotation, and the ability to turn off and connect one of the engines of the operating plant on the move of the ship due to the presence of special jaw-friction and hydrodynamic clutches are analyzed. In conclusion, a generalization is given and an assessment of options for promising predictive design and technological solutions for the design and production of ship reverse gears is made. The obtained results of the work are sufficient for the formation of the technical image of ship reverse gears of the future for the main power plants of ships, the synthesis of structural and technological solutions for their typical units, as well as for the synthesis of end-to-end design and production technology. The results of analytical studies allow us to conclude that ship gearboxes based on gearing will be used for at least 30 years as a device for converting the rotational speed and torque of the motion source.

Keywords: reverse gear, kinematic scheme, body, friction clutch, summing gearbox, production engineering, gear block.

For citation:

Kuznetsov, Ruslan V. "Analytical review of domestic and foreign experience in the development and design of ship reverse gears." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103.

УДК 621.83.061.4

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА РАЗРАБОТКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ РЕВЕРС-РЕДУКТОРНЫХ ПЕРЕДАЧ

Р. В. Кузнецов

ПАО «Звезда», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Объектом исследования являются механические судовые реверс-редукторные передачи, являющиеся комплектующими изделиями дизель-дизельных, дизель-газотурбинных и газотурбинных главных энергетических установок кораблей и судов с передаваемой мощностью до 24000 кВт и крутящим моментом до 590 кН·м для судов гражданского, специального и двойного (многоцелевого) назначения. В рамках работы проведены аналитические исследования отечественного и международного опыта по разработке и проектированию современных судовых РРП, их узлов и компонентов. Рассмотрены типовые конструкторские решения и кинематические схемы судовых редукторных передач. В качестве компоновочных решений выделяются переборные редукторы со смещением осей, угловые редукторы и соосные редукторы. Выполнен обзор технических характеристик редукторов для морских судов коммерческого назначения большинства

международных и отечественных производителей. Рассмотрены существующие конструкторско-технологические решения по зубчатым блокам редукторов в зависимости от их мощности. Применительно к рассматриваемому диапазону мощностей проанализированы решения, обеспечивающие как изменение направления вращения гребного винта, так и возможность отключения и подключения одного из двигателей работающей установки на ходу корабля за счет наличия специальных кулачково-фрикционных и гидродинамических муфт. В заключение приведено обобщение и выполнена оценка вариантов перспективных прогнозных конструктивных и технологических решений для проектирования и производства судовых реверс-редукторных передач. Полученные результаты работы являются достаточными для формирования технического облика судовых реверс-редукторных передач будущего для главных энергетических установок кораблей, синтеза конструктивно-технологических решений их типовых узлов, а также для синтеза сквозной технологии проектирования и производства. Результаты аналитических исследований позволяют сделать вывод о том, что судовые редукторы на базе зубчатого зацепления еще в течение не менее 30 лет будут использоваться в качестве устройства преобразования частоты вращения и момента источника движения.

Ключевые слова: реверс-редукторная передача, кинематическая схема, корпус, фрикционная муфта, суммирующий редуктор, технология производства, зубчатый блок.

Для цитирования:

Кузнецов Р. В. Аналитический обзор отечественного и зарубежного опыта разработки и проектирования судовых реверс-редукторных передач / Р. В. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103.

Введение (Introduction)

Конкурентная борьба на мировом рынке судостроения, удорожание стоимости материалов, учет требований международных стандартов и морских конвенционных требований в области качества и управления проектами, а также стремление экономии природных ресурсов вывели на первый план при создании новой продукции требования надежности и эффективности главной энергетической установки (ГЭУ) корабля [1], [2], сокращению сроков проектирования [3] и производства. Все это потребовало от разработчиков судовых реверс-редукторных передач (РРП) совершенствования применяемых схемных решений, применения инновационных технических решений [4], [5], создания типовых унифицированных узлов, разработки более совершенных технологий проектирования и производства передач, а также внедрения передовых технологий в процессе производства [4]–[8].

Разработка современных судовых редукторов подразумевает высокий уровень автоматизации и комплексирования параметров, характеризующих текущее состояние основных узлов и механизмов, температуру подшипников и муфт включения, давления масла в системах смазки и управления. В современных конструкциях РРП ведущих фирм (ZF, Renk, Reintjes) с учетом использования сложных кинематических схем, состоящих из нескольких ступеней, КПД РРП достигает 98,8 % [9] (при традиционных способах проектирования и изготовления редукторов в одной ступени утрачивается 0,5–1 % КПД). При этом РРП обеспечивает суммирование нескольких источников энергии, что позволяет существенно повысить экономию топлива, обеспечить большую дальность плавания, повысить показатели живучести и надежности судовой ГЭУ — важнейшие стратегические показатели корабля.

Обеспечение приемлемых сроков и стоимости изготовления при сохранении надлежащего уровня качества и надежности судовой РРП требует от изготовителей использования высокопрочных материалов, повышенной точности механической обработки, отработанной технологии изготовления, а также совершенствования технологии проектирования и производства судовых РРП, включая технологии «цифрового двойника», т. е. компонентов, формирующих особенности судовой передачи нового поколения. При этом на сегодняшний день в Российской Федерации, несмотря на бурный рост производства корпусов судов, не сформулированы единые конструктивные и технологические решения для производства изделий подобного класса.

Целью данной работы является проведение аналитического исследования отечественного и международного опыта по разработке и проектированию современных судовых РРП и их узлов

и компонентов, включая обобщение и оценку вариантов перспективных прогнозных решений с целью дальнейшего определения необходимого уровня технологической подготовки производства, синтеза оптимальных конструктивных и технологических решений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Мировые тенденции развития судовых РРП. Судовой движитель (винт) для работы с наиболее выгодным КПД должен иметь достаточно низкие обороты, оптимальные для своего диаметра, дискового отношения и шага. При применении в составе ГЭУ судна двигателя с номинальными оборотами больше, чем оптимальные обороты винта, появляется необходимость в редуцировании оборотов, передаваемых на винт от двигателя. В этом заключается первостепенная задача, стоящая перед судовой РРП. Кроме того, в судовом редукторе происходит увеличение момента, равное по величине уменьшению числа оборотов. Указанные ранее особенности РРП выражены в виде двух показателей: коэффициента трансформации крутящего момента $K = \frac{M_{\text{двиг}}}{M_{\text{винт}}}$ и передаточного отношения $i = \frac{n_{\text{двиг}}}{n_{\text{винт}}}$.

Выбор той или иной судовой передачи во многом определяется назначением судна, требованиями к его маневренным характеристикам, типом и количеством главных двигателей, местом размещения машинного отделения и тем самым оказывает непосредственное влияние на технические, экономические и эксплуатационные показатели судна. Под воздействием РРП винтовая характеристика двигателя, работающего на винт и определяющая режим его работы, может существенно отличаться от винтовой характеристики судна в положительную сторону (рис. 1).

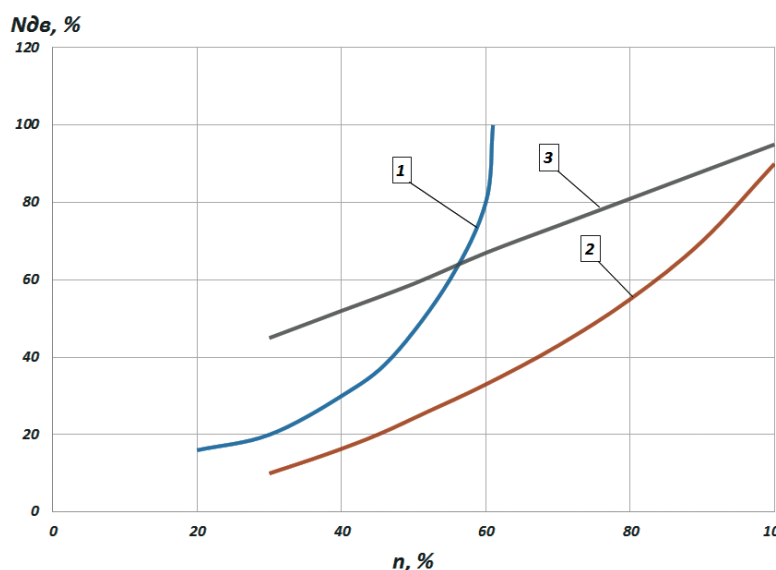


Рис. 1. Винтовые характеристики: 1 — судна без редуктора; 2 — судно с редуктором; 3 — ограничительная характеристика двигателя

Наиболее эффективным с точки зрения топливной экономичности являются судовые многоскоростные РРП, позволяющие оптимизировать работу судовой ГЭУ на всех режимах работы судна, от самого малого хода, до скоростных форсированных режимов движения. Однако, поскольку данная установка достаточно сложна в проектировании и изготовлении, ее разработка оправдана для ограниченного набора типов судов (буксиры, суда специального назначения).

На практике для решения задач снижения расхода топлива, предполагающего наличие нескольких режимов движения, используются многодвигательные установки с суммирующими РРП, которым свойственны наиболее оптимальные технико-экономические показатели при

сравнительно низкой стоимости жизненного цикла, а, кроме того, обеспечивается существенное повышение показателей надежности всей ГЭУ.

В настоящее время на отечественном рынке производителей судовых РПП в диапазоне мощностей до 24000 кВт и крутящим моментом до 590 кН·м можно выделить ОАО ХК «Барнаултрансмаш», ОАО РУМО, ОДК «ВДМ» (ЗАО «Волжский дизель им. Маминых») и ПАО «Звезда». Все указанные предприятия предлагают дизель-редукторные и дизель-реверс-редукторные агрегаты в основном на базе дизелей собственного производства.

На мировом рынке РПП для морских судов коммерческого назначения можно выделить ряд производителей, имеющих наибольший пакет заказов, и, соответственно, обладающих наибольшими техническими и технологическими компетенциями: ZF Friedrichshafen AG (ZF), Renk AG (Renk), Reintjes GmbH (Reintjes), Twin Disk, Wärtsilä Corporation (Wärtsilä). Обобщенные данные приведены на рис. 2.

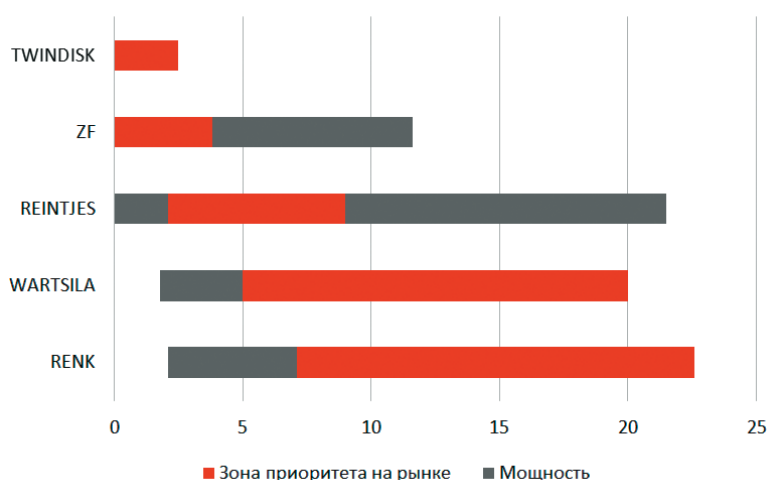


Рис. 2. Диапазон мощностей РПП основных участников рынка и их приоритеты на рынке

На основании анализа зарубежного рынка можно сделать следующие выводы:

а) международный рынок судовых РПП в области малых мощностей достаточно насыщен производителями (кроме фирм ZF и Twin Disk на рынке работает ряд менее известных фирм);

б) для судовых РПП коммерческого назначения большой передаваемой мощности (более 10000 кВт) имеет место жесткая конкуренция, усугубляющаяся небольшим количеством заказов;

в) существует мощностная ниша, которая не столь плотно заполнена производителями: от 2500 до 5000 кВт.

Типовые конструкторские решения и кинематические схемы судовых редукторных передач. В последние десятилетия к ГЭУ предъявляются повышенные требования к ряду показателей: экономическим, экологическим, надежности и др., для выполнения которых целесообразна установка на судно современных многоскоростных суммирующих РПП, позволяющих наиболее эффективно использовать ресурсы каждого источника движения в отдельности и совместно. Однако такие технические решения являются достаточно дорогостоящими и требуют серьезного технико-экономического обоснования.

Суммирующие РПП активно используются для нужд военно-морского флота государств, где имеются тактические преимущества, которые находятся в приоритете над экономической выгодой. Между тем все большую популярность набирают системы с использованием электродвижения. Примером таких установок может служить GODELAG от Renk. В настоящее время известны следующие типы ГЭУ судов и соответствующие им типы редукторов: дизельный двигатель, дизельный

двигатель-дизельный двигатель, дизельный двигатель-газовая турбина, дизельный двигатель-газовая турбина, дизельный двигатель-электродвигатель, газовая турбина-электродвигатель. Каждой из указанных комбинаций соответствует свой диапазон параметров, касающихся веса, передаваемого момента, передаточных отношений, эффективности, надежности, а также требований к системе управления.

Компания ZF (Германия) в спектре реализуемых компоновочных решений использует переборные редукторы со смещением осей, угловые редукторы, соосные редукторы [10]. Фактическое количество конструкций, предлагаемых фирмой, составляет примерно 270–280 единиц. Основное различие реализованных кинематических схем заключается во взаимном расположении и направлении смещения входного и выходного вала редуктора, учитывающее будущие особенности компоновки ГЭУ в машинном отделении судна. Такое разнообразие выбора конструктивных схем и технических решений явилось следствием последовательно накопленного опыта разработки и изготовления РРП, применения современных компьютерных систем автоматизированного проектирования, унификации основных узлов и компонентов, отлаженной параллельно-сквозной системы проектирования, использования передовых производственных технологий, а также развитого сборочно-испытательного производства.

Фирма Renk (Германия) специализируется на разработке тяжелых судовых РРП большой мощности (до 22000 кВт) в основном военного или специального назначения. Фирма выпускает планетарные РРП с передаваемым моментом до 667 кН·м и передаточным отношением в одной ступени до 16, а также цилиндрические одно- и двухмоторные РРП передаваемым моментом до 86 кН·м и передаточным отношением до 8,5.

Разработка и выпуск сложных (рассчитанных на высокие показатели) редукторов специального назначения предполагает использование хорошо отработанной с организационной точки зрения технологии проектирования и производства с использованием 3D-моделирования, автоматического планирования производства, автоматизированных производственных линий, архивацию данных и иные мероприятия, способствующие инновационному развитию процессов проектирования и изготовления продукции.

Фирма Reintjes (Германия) выпускает судовые РРП в мощностном диапазоне 250–21000 кВт. Компоновочные решения предполагают наличие, как соосного исполнения, так и вариантов смещения осей в горизонтальной и вертикальной плоскости. Кроме того, большинство реализованных схем предусматривает возможность дополнительного отбора мощности для привода генератора, имеет валоповоротное устройство, измеритель упора гребного винта, тормоз гребного вала, контрольные датчики и приборы, что говорит о высоком уровне конструкторско-технологической подготовки производства.

Компания Twin Disk в области судового редукторостроения специализируется в диапазоне мощностей от 25 до 2500 кВт. Данная мощность характерна для скоростных частных судов, а также для речных транспортных судов. Фирма выпускает РРП с параллельными валами и валами, расположенными под углом (применяются конические передачи). Для обеспечения плавности включения фирмы применяют гидравлические фрикционные муфты включения. Также в составе продукции фирмы присутствуют гидравлические преобразователи крутящего момента (гидротрансформаторы). В открытых источниках информация о конструкторских и технологических решениях фирмы Twin Disk практически отсутствует.

Компания Wärtsilä поставляет на рынок судового оборудования комплексные решения в области пропульсивных установок собственной разработки и изготовления. Данные решения включают в себя РРП двух типов: *односкоростные* в вертикальном и горизонтальном исполнении с межосевыми расстояниями стандартного ряда от 380 до 1420 мм; *суммирующие* с межосевым расстоянием стандартного ряда от 1900 до 3800 мм. Межосевые расстояния оказывают влияние на габариты РРП, а также на потенциально возможные к реализации передаточные отношения.

Судовые РРП фирмы Wärtsilä оснащены устройством дополнительного отбора мощности и упорным подшипником. Зубчатые блоки РРП выполняются косозубыми с эвольвентным

профилем. Для снятия осевых нагрузок в редукторах, передающих большую мощность, применяются шевронные зубчатые блоки из легированных сталей и подвергнутых химико-термической обработке. Корпус РРП отливают из чугуна или сваривают из стали. Все РРП, за исключением линии SV, оснащены многодисковыми фрикционными муфтами включения, обеспечивающими плавное включение и снижающими ударную нагрузку на двигатель.

Государственное предприятие «Научно-производственный комплекс газотурбостроения “Зоря-МашПроект”» (Украина) специализируется на разработке и изготовлении ГТД промышленного и судового назначения, а также проектировании и изготовлении специализированных РРП для ГТД с мощностью установки до 80000 кВт [11]. С начала 2000-х гг. предприятие также занимается разработкой, ремонтом и изготовлением судовых «тяжелых» (передающих большие моменты) РРП. Все газотурбинные агрегаты кораблей ВМФ РФ проектировались и изготавливались на этом предприятии. Существующее на предприятии редукторное производство обеспечивает проектирование, изготовление, испытания и ремонт (восстановление) практически любых зубчатых передач: цилиндрических, конических с наружным и внутренним зацеплением, с использованием прямых, косых, шевронных, эвольвентно-конических и круговых зубьев. Применяемые модули от 0,6 мм до 12 мм. Диаметр изготавливаемых зубчатых колес 10–3400 мм.

Применительно к рассматриваемому диапазону мощностей рассматриваемые конструктивные решения подразумевают наличие специальных кулачково-фрикционных и гидродинамических муфт, обеспечивающих как изменение направления вращения гребного винта, так и возможность отключения и подключения одного из двигателей работающей установки на ходу корабля.

ПАО «Звезда» имеет богатую историю создания РРП судового назначения. На предприятии существует два типа РРП:

- а) «легкие» (с литым алюминиевым корпусом), суммирующие РРП, передаваемой мощностью до 6500 кВт и оборотами входного вала до 2400 об/мин;
- б) «тяжелые» (со сварным корпусом), суммирующие РРП, передаваемой мощностью 13000 кВт и оборотами входного вала до 1500 об/мин.

Применительно для рассматриваемого мощностного диапазона типовыми можно считать решения по основным узлам, примененные для редуктора модели РРП 6000 с передаваемой мощностью до 3700 кВт [12]. Данная трансмиссия обеспечивает работу дизеля на винт фиксированного шага. Передача мощности на судовой валопровод может осуществляться по следующим схемам:

- работа на передний ход: дизель-фрикционная муфта переднего хода — первая ступень переднего хода; вторая ступень — эластичная виброизолирующая муфта — судовой валопровод;
- работа на задний ход: дизель-шестерни связи — фрикционная муфта заднего хода — первая ступень заднего хода; вторая ступень — эластичная виброизолирующая муфта — судовой валопровод.

Остальные производители выпускают редукторные агрегаты малой мощности, предназначенные в основном для речных судов и судов класса *река — море* небольшого водоизмещения. Используемые при их создании технические решения, являясь «классическими» для малонагруженных трансмиссий, не представляют значительного интереса в рамках рассматриваемых средних и высокооборотных двигателей.

Анализ конструкторско-технологических решений по зубчатым блокам. Зубчатые блоки судовых РРП рассмотренных ранее фирм, как правило, имеют цилиндрические косозубые или шевронные передачи с эвольвентным профилем зуба, крайне редко (например, с целью дополнительного отбора мощности) встречаются прямозубые передачи. В приводах валоповоротных устройств РРП применяют червячные передачи, в судовых РРП ГТД агрегатов — конические передачи.

Применение шевронных зубчатых блоков в судовых РРП, как правило, начинается с передаваемой мощности выше 9000 кВт или при окружной скорости выше 50 м/с при существенном повышении осевых нагрузок. Зубчатые блоки в конструкциях РРП рассматриваемых ранее производителей бывают *составные* и *цельные*. Составные зубчатые блоки получают при помощи штифтового, шпоночного, шлицевого или прессового соединения, а также при помощи комбинированных соединений.

Шпоночные и прессовые соединения отдельно применяются в основном в малонагруженных по моменту редукторах [13] для мощностей до 1000 кВт в связи со сложностью обеспечения высокой надежности. Для судовых редукторных передач большей мощности характерно использование шлицевого или комбинированного типов соединений. Так, в конструкциях судовых редукторных передач фирм Wärtsilä, Reintjes, ПАО «Звезда» используется комбинированный тип соединения, в котором прессовое соединение дополняется штифтовым.

Составная конструкция зубчатого блока позволяет уменьшить материалоемкость и снизить требования к металлообрабатывающему оборудованию, тем самым уменьшить себестоимость изготовления, но оказывает отрицательное влияние на точность соединения зубчатых блоков. При больших передаваемых нагрузках составная конструкция зубчатого блока может являться источником отказов в работе судовых РРП. В связи с этим для высоконагруженных РРП используют цельные зубчатые блоки (полученные из одной заготовки).

Многолетний опыт серийного производства и эксплуатации зубчатых блоков показал большое влияние применяемых при обработке зубьев колес и шестерен технологий на динамику, виброактивность, ресурс и надежность работы зубчатых передач [14]. Сложность выполнения задач, вызванная технологией производства зубчатых блоков задач, требует комплексного подхода [8] к их решению, основой которого является разработка базовых технологических процессов механической и химико-термической обработки, оснащение производства высокоточным и производительным оборудованием, а также современным комплексом вычислительной техники и программных продуктов.

Разработка технологического процесса изготовления зубчатых блоков начинается и ведется параллельно с разработкой конструкции самой РРП, при этом определяется возможность их изготовления в условиях конкретного серийного производства. Для совершенствования производства зубчатых блоков требуется *разработка единой системы управления процессом изготовления деталей*, затрудняющей проявление отрицательных факторов технологической системы обработки. Основу этой системы должно составлять управление качеством обработки на последовательно выполняемых технологических операциях механической, химико-термической и финишной обработки.

Анализ типовых решений по муфтам включения. В настоящее время выделяют три вида муфт включения, применяемых в редукторах: электрическую, гидравлическую и пневматическую [15]. В судовых РРП наибольшее распространение получили гидравлические многодисковые фрикционные муфты. Данный тип муфт в наибольшей степени отвечает предъявляемым к судовым РРП требованиям по плавности включения, имеет наибольший КПД и наиболее выгодные удельные показатели по сравнению с другими типами муфт. Кроме того, такие муфты способны передавать практически любой крутящий момент.

В некоторых редукторных передачах встречаются кулачковые муфты включения. Данный тип муфт встречается в случае отсутствия ударных нагрузок (при отсутствии требования включения муфты «на ходу»). Различаются муфты сухие и муфты, работающие со смазкой. Несмотря на то, что размещение фрикционных дисков в масляной среде снижает коэффициент трения (передаваемый момент), подобное конструктивное решение дает ряд преимуществ перед сухими. В частности, проще решается задача компенсации снижения крутящего момента увеличением осевой нагрузки без опасности появления схватывания, катастрофического износа и вибрации. Более того, правильная смазка муфты способствует отводу генерируемого в процессе трения тепла и удалению продуктов износа, увеличивая, тем самым не только плавность работы, но и срок службы узла.

Принципиально в конструкции муфт включения выделяют два вида: конструкции с передачей момента через фрикционные диски с внешней детали (шлицевого венца) и с передачей момента через фрикционные диски с внутренней детали (вала) [15]. Вторая конструкция отличается меньшим осевым габаритом, простой системой распределения управляющего и смазочного масла. В данном варианте отсутствует консольная посадка поводка, более равномерным является тепло-выделение (за счет перераспределения контактных давлений), но имеется склонность к увеличению диаметрального габарита, и, как следствие, габарита всей редукторной передачи и на практике встречается чаще.

Для рассматриваемых фирм можно выделить три основных вида расположения многодисковых фрикционных гидравлических муфт включения: в отдельном корпусе, перед приводной шестерней и в корпусе приводной шестерни. Первый тип муфт используется для мощных судовых редукторных установок и в настоящее время применяется все реже в связи с тенденцией уменьшения габаритных размеров редукторов. Второй тип применяется в случае постоянной работы генератора или любого другого дополнительного отбора мощности и с точки зрения габаритных характеристик так же является не самым оптимальным решением. Третий тип муфт в конструкциях рассмотренных фирм встречается наиболее часто и позволяет максимально сократить продольный габарит редукторной передачи, при этом допускается постоянная работа привода дополнительного отбора мощности.

Ввиду стремления к сокращению диаметра фрикционных дисков (металл — металлокерамика), для поддержания необходимого усилия для их сцепления необходимо иметь высокое давление управляющего масла.

Типовые решения по корпусам. Корпуса судовых редукторных передач делятся на литые и сварные [16], при этом сварные корпуса имеют составную структуру. Литые корпуса классифицируются на алюминиевые и чугунные. Литые корпуса для судовых редукторных передач используются в основном при небольших передаваемых мощностях до 2500 кВт, а также в случае отсутствия сложных компоновочных решений (не симметричная форма, наличие наклонной поверхностей и т. п.).

Исключением является редуктор SCV фирмы Wärtsilä. Это можно объяснить наличием у данного производителя современного чугуно-литейного производства. При этом данное конструкторское решение закономерно негативно сказывается на технико-экономических показателях РРП в целом. Для мощностей свыше 2500 кВт актуальным является использование сварных составных конструкций корпуса с разъемом по осям передач. При этом необходимо учитывать, что на корпусах размещают датчики, систему трубопроводов, масляный охладитель, фильтры, насосы систем, электрооборудование, систему (пост) управления и другие устройства.

Сварные корпуса для рассматриваемого диапазона мощностей у всех выше указанных производителей имеют максимальные габариты не более 5000 × 4500 × 5000 мм. При этом данные корпуса подвергаются термическому улучшению (отжиг) для снятия остаточных напряжений после сварки. Конструкция корпуса, в том числе определяется принятой системой смазки. В конструкциях рассматриваемых РРП применяется система смазки с «мокрым» картером (автономная), которая предусматривает наличие поддона.

Результаты и их обсуждение (Results and their Discussion)

Исследования отечественного и международного опыта проектирования и производства современных судовых РРП, а также прогноз развития их показателей дали следующие результаты:

1. Общепринятыми в настоящее время конструктивными концепциями при проектировании и производстве судовых РРП и прогнозным решением на будущее является применение следующих типовых узлов: косозубых или шевронных зубчатых блоков с эвольвентным профилем зуба, стальных сварных корпусов, многодисковых фрикционных муфт включения для обеспечения реверсирования и переключения скоростей хода.

2. При разработке судовых РРП характерным является широкое применение ряда общих кинематических схем: соосных и не соосных, переборных и планетарных, суммирующих.

3. Разработка современных судовых РРП подразумевает высокий уровень автоматизации и комплексирования параметров, характеризующих текущее состояние основных узлов и механизмов (температуру подшипников и муфт включения, давления масла в системах смазки и управления).

4. В рассматриваемом диапазоне передаваемых мощностей характерны две основные группы РРП:

1-я группа — судовые РРП коммерческого назначения с передаваемой мощностью до 5000 кВт, используемые литые или сварные корпуса, составные зубчатые блоки, многодисковые гидравличе-

ские фрикционные муфты включения. Целевым направлением проектирования данного вида РРП является оптимизация жизненного цикла судна;

2-я группа — судовые суммирующие РРП специального назначения с передаваемой мощностью до 30000 кВт с использованием сварных корпусов, составных или цельных зубчатых блоков, много-дисковых гидравлических фрикционных муфт включения. Целевым направлением проектирования данного вида РРП является достижение высоких мореходных и тактических качеств кораблей флота.

5. В качестве перспективных параметров судовых РРП для обеих групп на основе проведенного анализа выбираем следующие: передаточные числа, реализованные в одной ступени от трех до восьми; модуль нормальный 10–25 мм; число ступеней от двух до пяти.

6. При проектировании и постановке судовых РРП на производство мировыми производителями используются технологии, предусматривающие высокую степень автоматизации процессов управления проектом и его стадиями.

Таким образом, сформирован следующий прогнозный уровень основных показателей современных судовых РРП:

- давление масла управления муфтой — 15–30 бар;
- передаваемый крутящий момент — до 590 кН·м;
- передаваемая суммарная мощность — до 30000 кВт;
- количество фрикционных муфт — до шести;
- количество энергетических отсеков — до трех;
- полный ресурс (зависит от назначения) — до 100000 ч.

Заключение (Conclusion)

Полученные результаты работы являются достаточными для формирования технического облика судовой РРП будущего для главных дизель-дизельных, дизель-газотурбинных и газотурбинных ГЭУ кораблей, синтеза конструктивно-технологических решений типовых узлов РРП, а также для синтеза сквозной технологии проектирования, производства судовых РРП и их типовых узлов (корпусов, зубчатых блоков, муфт включения). Результаты аналитических исследований позволяют сделать вывод о том, что судовые РРП на базе зубчатого зацепления еще в течение не менее 30 лет будут входить в состав ГЭУ в качестве устройства преобразования частоты вращения и момента источника движения.

По технико-экономической эффективности судовые РРП указанного типа превосходят другие передачи, обладая при этом высокой степенью надежности, минимальным значением виброакустических характеристик, а также позволяя реализовывать различные решения по преобразованию и суммированию энергии от различных источников движения (дизельный двигатель, газовая или паровая турбина, электродвигатель) в составе ГЭУ судна.

Благодаря использованию новых современных материалов и способов их обработки, а также современных инструментов и технологий проектирования, производства и математического моделирования, их постоянному совершенствованию и развитию, судовые РРП с зубчатыми передачами еще не достигли предела своих возможностей и являются перспективным направлением мирового тяжелого машиностроения. В данной связи особенно актуальной является проблема отсутствия единой конструкторско-технологической базы для проектирования и производства современных судовых реверс-редукторных передач для главных энергетических установок кораблей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москаленко В. А. Системный подход оценки качества главной энергетической установки корабля / В. А. Москаленко, А. Б. Дегтярюк // Актуальные проблемы морской энергетики. Материалы девятой Международной научно-технической конференции. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2020. — С. 281–285.
2. Печковский П. Г. Обоснование инновационных технических решений в области корабельной энергетики перспективных многоцелевых кораблей / П. Г. Печковский // Вопросы оборонной техники.

Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. — 2021. — № 7–8 (157–158). — С. 136–143. DOI: 10.53816/23061456_2021_7-8_136.

3. Мосейко Е. С. Исследование надежности судовых насосов по данным технического наблюдения / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 4. — С. 7–16. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-7-16.

4. Kuznetsov R. Technology for producing wear-resistant bimetal bearing based on cast aluminum / R. Kuznetsov, E. Ol'khovik, M. Radkevich, P. Kuznetsov // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2020. — Vol. 164. — Pp. 03045. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403045.

5. Кузнецов Р. В. Экспериментальное исследование теплофизических свойств материалов биметаллического подшипника для судового машиностроения / Р. В. Кузнецов, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1107–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1107-1114.

6. Мясников Ю. Н. Междисциплинарные инновационные технологии в судостроении / Ю. Н. Мясников // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № 1 (387). — С. 184–196. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-184-196.

7. Михеева Т. А. Влияние качества подготовки производства на судостроительном предприятии на качество выпускаемой продукции / Т. А. Михеева, И. Н. Лучков, Е. Г. Бурмистров // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 56. — С. 55–64.

8. Жукова С. И. Разработка метода технологического обеспечения противозадирной стойкости в прочной зоне контактирования эвольвентных цилиндрических зубчатых колес редукторов газотурбинных двигателей: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.02.08) / Жукова Светлана Ивановна; Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева. — Рыбинск, 2018. — 245 с.

9. Половинкин В. Н. Оценка целесообразности и способов разработки и создания корабельного газотурбинного двигателя 5-го поколения / В. Н. Половинкин, В. В. Барановский, Д. Ю. Колодяжный // Судостроение. — 2019. — № 1 (842). — С. 11–31.

10. ZF Friedrichshafen AG [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.zf.com/products/en/buses/products_40065.html (дата обращения: 22.06.2020).

11. Мироненко А. И. Усовершенствование редукторов производства ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» / А. И. Мироненко, В. Е. Спицын, Е. А. Гамза, Д. В. Матвеевский, С. А. Дзятко // Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Проблеми механічного приводу. — 2015. — № 35. — С. 95–100.

12. Плавник П. Г. Реверс-редукторное производство ОАО «Звезда» / П. Г. Плавник, Е. Ю. Лерман // Судостроение. — 2014. — № 2 (813). — С. 34–36.

13. Анфимов М. И. Редукторы: Конструкции и расчет / М. И. Анфимов. — М.: Машиностроение, 1972. — 463 с.

14. Безъязычный В. Ф. Технология изготовления закрытого венца блока зубчатых колес ГТД / В. Ф. Безъязычный, Е. В. Шеховцева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2013. — № 8. — С. 19–27.

15. Ряховский О. А. Справочник по муфтам / О. А. Ряховский, С. С. Иванов. — СПб.: Политехника, 1991. — 384 с.

16. Колода С. Ф. Основные этапы технологии изготовления корпусов редукторов / С. Ф. Колода // Наукові праці науково-педагогічного складу Державного вищого навчального закладу «Приазовський державний технічний університет»: електронний покажчик публікацій / уклад.: Т. В. Ткаченко, В. Ф. Ганжеєва, О. Г. Білик. — Маріуполь, 2016. — С. 66–68.

REFERENCES

1. Moskalenko, V. A., and A. B. Degtyaruk. "System approach of assessment of quality of the main power plant of the ship." *Aktual'nye problemy morskoi energetiki. Materialy devyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet, 2020. 281–285.

2. Pechkovsky, Pavel Grigorevich. "Justification of innovative technical solutions in the field of shipboard power supply of new multipurpose ships." *Defense Engineering Problems. Series 16. Technical means of combating terrorism 7–8(157–158) (2021): 136–143*. DOI: 10.53816/23061456_2021_7-8_136.

3. Moseyko, Evgeniy Sergeevich, and Evgeniy Olegovich Olkhovik. "Studying reliability of marine pump systems by using technical supervision data." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2021): 7–16. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-7-16.
4. Kuznetsov, Ruslan, Evgeniy Ol'khovik, Mikhail Radkevich, and Pavel Kuznetsov. "Technology for producing wear-resistant bimetal bearing based on cast aluminum." *E3S Web of Conferences*. Vol. 164. EDP Sciences, 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403045.
5. Kuznetsov, Ruslan V., and Evgeniy O. Olkhovik. "Experimental study of the thermophysical properties of bimetallic bearing materials for marine engineering." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1107–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1107-1114.
6. Myasnikov, Yury N. "Interdisciplinary innovative technologies in shipbuilding." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 1(387) (2019): 184–196. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-184-196.
7. Mikheeva, T. A., I. N. Luchkov, and E. G. Burmistrov. "Impact of quality of preparation of production at shipbuilding enterprise on quality of production." *Bulletin of VSAWT* 56 (2018): 55–64.
8. Zhukova, S. I. *Razrabotka metoda tekhnologicheskogo obespecheniya protivozadirnoi stoikosti v kromochnoi zone kontaktirovaniya evol'ventnykh tsilindricheskikh zubchatykh koles reduktorov gazoturbinnnykh dvigatelei*. PhD diss. Rybinsk, 2018.
9. Polovinkin, V. N., V. V. Baranovsky, and D. Yu. Kolodyazhny. "Estimating feasibility and development methods of shipboard gas-turbine motor of 5th generation." *Shipbuilding* 1(842) (2019): 11–31.
10. ZF Friedrichshafen AG. Web. 22 June 2020 <https://www.zf.com/products/en/buses/products_40065.html>.
11. Mironenko, A. I., V. E. Spitsyn, E. A. Gamza, D. V. Matveevskii, and S. A. Dzyatko. "Usovershenstvovanie reduktorov proizvodstva GP NPKG "Zorya"- "Mashproekt"." *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu KhPI. Seriya: Problemi mekhanichnogo privodu* 35 (2015): 95–100.
12. Plavnik, P. G., and E. Y. Lerman. "Reverse and reduction gear production at JSC Zvezda." *Shipbuilding* 2(813) (2014): 34–36.
13. Anfimov, M. I. *Reduktory: Konstruktsii i raschet*. Mashinostroenie, 1972.
14. Bezjazychny, Vyacheslav Feoktistovich, and Evgenia Vladimirovna Shekhovtsev. "Technological prosee of manufacturing of closed wreath of block of gear teeth in a gas turbine engine." *Izvestiya Tula State University* 8 (2013): 19–27.
15. Ryakhovskii, O. A., and S. S. Ivanov. *Spravochnik po muftam*. SPb.: Politehnika, 1991.
16. Koloda, S. F. "Osnovnye etapy tekhnologii izgotovleniya korpusov reduktorov." *Naukovi pratsi naukovopedagogichnogo skladu Derzhavnogo vishchogo navchal'nogo zakladu «Priazovs'kii derzhavnii tekhnichnii universitet»: elektronni pokazhchik publikatsii*. Edited by T. V. Tkachenko, V. F. Ganzheeva, O. G. Bilik. Mariupol', 2016. 66–68.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кузнецов Руслан Валерьевич —
канд. техн. наук, главный металлург
ПАО «Звезда»
192012, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Бабушкина, 123
e-mail: kuznetsovr@zvezda.spb.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuznetsov, Ruslan V. —
PhD, Chief Metallurgist
PJSC, Zvezda
123 Babushkina Str., St. Petersburg, 192012,
Russian Federation
e-mail: kuznetsovr@zvezda.spb.ru

Статья поступила в редакцию 31 января 2022 г.
Received: January 31, 2022.

THE USE OF FUEL CELLS IN THE ENERGY SUPPLY OF WATER TRANSPORT

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

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

The subject of this study is the analysis of the possibilities for further growth of the energy efficiency of marine power plants through the use of the fuel cells concept. It is noted that the increase in the efficiency of modern power plants using heat engines is constrained by the limitations imposed on their efficiency coefficient (efficiency) by Carnot's theorem. Currently, the prospects for increasing the efficiency of piston engines, as the main sources of energy in marine power plants, are considered as practically exhausted. In this regard, an urgent task of improvement is the search for new technical solutions that do not fall under the mentioned restrictions, which, in particular, leads to the concept of fuel elements (TE). Fuel cell technologies, unlike heat engines, use the other ways of converting the latent energy of fuel and fundamentally allow us to reach a new level of energy efficiency with an increase in efficiency by 10 % or more. The main advantages and disadvantages of the main types of fuel and energy sources and the possibility of their use as the major sources of energy in shipbuilding are considered in the paper. The most promising types of fuel cells for marine use are identified, their investment attractiveness is determined. The special attention is paid to the problems of using and storing the main fuel for thermal power plants, which is hydrogen. On the basis of the developed technologies for the use of liquefied natural gas (LNG), the comparison of individual, most significant in operation properties of hydrogen with the properties of LNG is made. The potential risks arising from the use of hydrogen as the main fuel on ships are assessed. Based on the examples of the developed projects of power plants with fuel cells, conclusions about the prospects of using fuel cells in shipbuilding are made.

Keywords: marine power plant, energy efficiency, fuel cells, hydrogen fuel, prospects for use.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "The use of fuel cells in the energy supply of water transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 14.1 (2022): 104–119. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-104-119.

УДК 621.43.074

ПРИМЕНЕНИЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

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

Предметом настоящего исследования является анализ возможностей дальнейшего роста энергоэффективности судовых энергетических установок за счет использования концепции топливных элементов. Отмечается, что повышение эффективности современных энергетических установок, использующих тепловые двигатели, сдерживается ограничениями, накладываемыми на их коэффициент полезного действия теоремой Карно. В настоящее время перспективы роста КПД поршневых двигателей в качестве основных источников энергии в судовых энергетических установках рассматриваются как практически исчерпанные. В этой связи актуальной задачей совершенствования является поиск новых технических решений, не подпадающих под указанные ограничения, который, в частности, приводит к концепции топливных элементов. Технологии топливных элементов, в отличие от тепловых двигателей, предполагают использование иных способов преобразования скрытой энергии топлива, принципиально позволяя выйти на новый уровень энергоэффективности с повышением КПД на 10 % и более. В работе рассмотрены главные преимущества и недостатки основных видов топливных элементов и возможность их применения в качестве основных источников энергии в судостроении. Выделены наиболее перспективные

виды топливных элементов для судового использования, определена их инвестиционная привлекательность. В работе уделено отдельное особое внимание проблемам использования и хранения основного вида топлива для топливных элементов, которым является водород. На основе разработанных технологий использования сжиженного природного газа (LNG) выполнено сопоставление отдельных, наиболее значимых в эксплуатации свойств водорода со свойствами LNG. Дана оценка потенциальных рисков, возникающих при использовании водорода в качестве основного топлива на судах. На примерах разрабатываемых проектов энергетических установок с топливными элементами сделаны выводы о перспективах использования топливных элементов в судостроении.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, энергоэффективность, топливные элементы, водородное топливо, перспективы использования.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Применение топливных элементов в энергообеспечении водного транспорта / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 104–119. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-104-119.

Введение (Introduction)

Выброс парниковых газов (ПГ) судовыми энергетическими установками (СЭУ) является глобальной проблемой мировой судоходной отрасли. Решению данной проблемы может способствовать как повышение энергетической эффективности СЭУ, так и использование альтернативных низкоуглеродных, углеродно-нейтральных и безуглеродных видов топлива [1]. Повышение энергоэффективности судов [2], являясь одним из постоянно разрабатываемых направлений в современном судостроении, способно внести весомый вклад в сокращение эмиссии ПГ. Однако тепловые двигатели, используемые на подавляющем большинстве судов, преобразуя тепловую энергию, полученную в результате сгорания углеводородов в работу, имеют ограничение по своему КПД в соответствии с теоремой Карно. Так, большеразмерные двухтактные малооборотные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) обеспечивают КПД, равный 50 % и более, что фактически является значением, близким к предельно достижимому. Такими двигателями оборудованы энергетические установки до 55 % транспортных судов, которые показывают максимально достижимую энергетическую эффективность. Для преодоления барьера при дальнейшем росте КПД СЭУ, устанавливаемого теоремой Карно, необходим поиск новых технических решений для СЭУ, которые будут использовать иные, в отличие от тепловых двигателей, принципы.

Среди эффективных источников энергии, способных заменить современные поршневые ДВС, на первом месте находятся топливные элементы (ТЭ). Данные элементы как электрохимические устройства способны напрямую преобразовывать химическую энергию топлива в электроэнергию без процесса горения, а, следовательно, их КПД не попадает под ограничения теоремы Карно, что принципиально позволяет им достигать КПД, равный 80 % и более [3].

Целью предлагаемой работы является рассмотрение аспектов возможного применения топливных элементов как основы главной и вспомогательной энергетической установки судна, оценка текущей ситуации и перспектив ее использования, а также анализ топливного потенциала технологии ТЭ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Концепция топливного элемента известна с 1839 г. Практическое применение ТЭ начинается с 1937 г., когда проф. Ф. Бэкон начал разработку своего ТЭ, создав к концу 50-х гг. XX в. топливную батарею, состоящую из 40 ТЭ мощностью 5 кВт [4]. ТЭ (рис. 1) крайне многообразны как по конструкции, так и по принципу действия.

На сегодняшний день наиболее изученным является водородно-кислородный ТЭ [5]. Электроды ТЭ изготавливаются из угля и покрываются платиной, которая выступает в роли катализатора реакций. В качестве электролита используется щелочной раствор KOH, поэтому элемент называют щелочным ТЭ (Alkaline Fuel Cells (AFC)) — рис. 2.

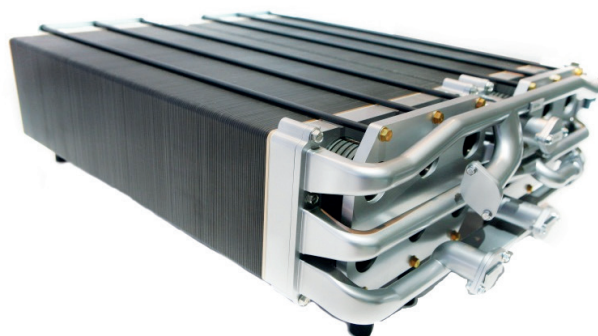


Рис. 1. Топливный элемент

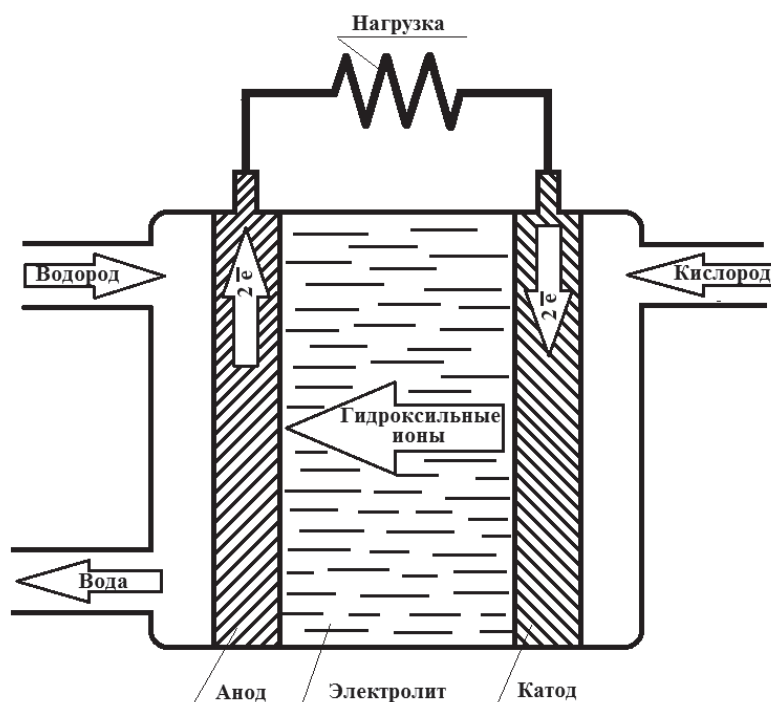


Рис. 2. Щелочной топливный элемент AFC

К катоду щелочного ТЭ подводится кислород (или воздух), который при взаимодействии с водой образует гидроксид-ионы:



К аноду подается водород, который окисляется до воды (табл. 1).



Таблица 1

Щелочные топливные элементы AFC

Электролит	КОН (стабилизированный на матрице или циркулирующий)
Реагенты	H_2 , O_2
Ион-переносчик	OH^-
Электроды	Катод: Ni (с добавками) Анод: Pt/C, Pt — CO/C, Pt — Pd/C
Анодная реакция	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Катодная реакция	$1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$
Проблемы	Образование карбонатов

В ТЭ поток электронов и ионов поддерживает баланс заряда и вещества в электролите. Образующаяся в результате реакции вода частично разбавляет электролит. Поток электронов во внешней цепи представляет собой электрический ток, используемый для совершения работы. Размыкание цепи, так же, как и прекращение движения ионов (подачи топлива или кислорода), останавливает работу топливного элемента. Электродвижущая сила АФС составляет 1–1,5 В, а высокая плотность тока достигается в элементах, работающих при повышенной температуре (около 250 °С) и высоком давлении 20 бар и более (современные ТЭ способны эффективно работать при более низких значениях температуры и давления). Для получения высоких напряжений элементы объединяются в последовательно соединенную батарею ТЭ, а для увеличения тока ТЭ соединяют параллельно, возможна также комбинация соединений.

Возникает аналогия между рассматриваемым топливным элементом и щелочным аккумулятором. Отличительной чертой ТЭ служит то, что он не способен аккумулировать энергию, как это происходит в гальваническом элементе, а работает только при подаче вещества извне, в то время как в реакционную зону гальванического элемента ограниченное количество активного вещества вводится в процессе изготовления или зарядки аккумулятора.

Наличие щелочного раствора несколько ухудшают эксплуатационные свойства АФС ввиду конструктивных требований к герметизации. Поэтому более широкое распространение получают ТЭ с протонообменной мембраной (Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC)). В этих элементах вместо жидкого электролита между электродами расположена полимерная ионообменная (протонообменная) мембрана, которая пропускает протоны, а электроны движутся по внешней цепи, образуя постоянный ток. Такой элемент не требует герметизации корпуса, так как не имеет жидкой фракции в своей активной зоне. Образующаяся в процессе работы вода не растворяет электролит и может быть легко удалена. Принцип действия ТЭ PEMFC показан на рис. 3, характеристики приведены в табл. 2.

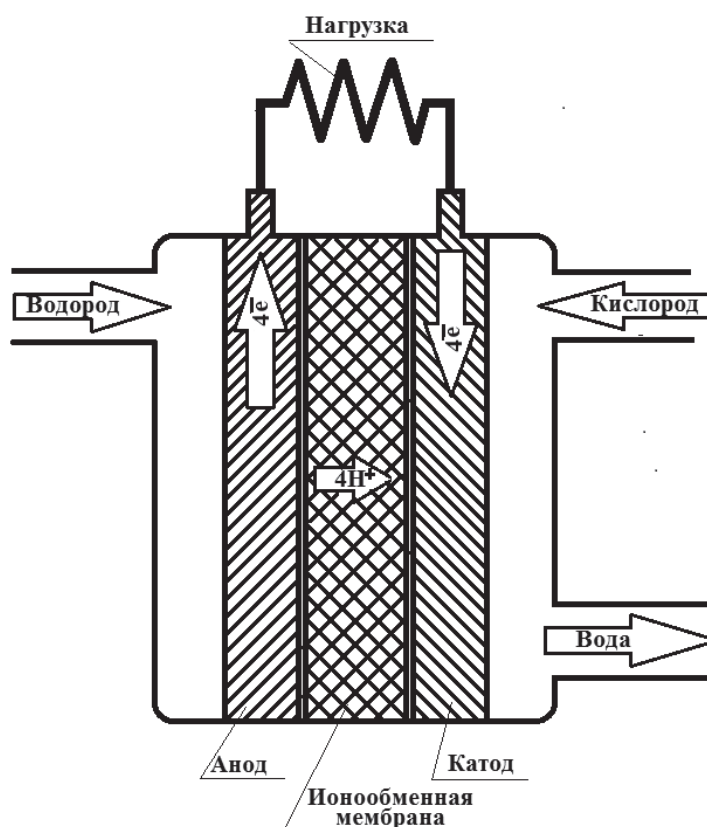


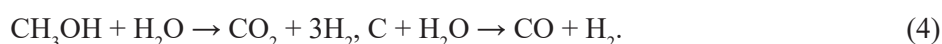
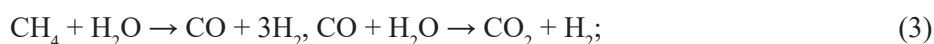
Рис. 3. Топливный элемент PEMFC с протонообменной мембраной

Таблица 2

Водородные ТЭ PEMFC с H⁺ проводящей мембраной

Электролит	Ионообменная мембрана (поликислота)
Реагенты	H ₂ , воздух (O ₂)
Ион-переносчик	H ⁺
Электроды	Катод: Pt/C Анод: Pt/C, Pt — Ru/C
Анодная реакция	H ₂ → 2H ⁺ + 2ē
Катодная реакция	1/2O ₂ + 2H ⁺ + 2ē → H ₂ O
Проблемы	Отравление анодной платины монооксидом углерода, гидратация – дегидратация

Помимо чистого водорода в качестве топлива в ТЭ могут быть использованы природные углеводородные топлива, но с приемлемой скоростью в топливном элементе может окисляться лишь водород, а в специальных видах ТЭ — монооксид углерода и метанол. Поэтому природные виды углеводородных топлив предварительно конвертируются в блоке подготовки топлива в водород и другие газы, например, по реакциям для метана и метанола:



Продукты конверсии подаются в ТЭ. Поскольку реальный КПД ТЭ (40...65 %) ниже 100 %, при их работе выделяется тепло, которое может быть использовано либо для теплофикации, либо для генерации дополнительной электрической энергии с помощью паровых или газовых турбин. Рабочие температуры топливных элементов с протонообменной мембраной могут достигать 200 °С и более. Такие элементы классифицируются как среднетемпературные, а применительно к PEMFC — как высокотемпературные (HT PEMFC).

Топливные элементы, способные работать на метаноле, выделяют в отдельную группу и называют *метанольные ТЭ* (Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)) — табл. 3 и рис. 4.

Таблица 3

Метанольные топливные элементы DMFC с H⁺ проводящей мембраной

Электролит	Ионообменная мембрана (поликислота)
Реагенты	CH ₃ OH, воздух (O ₂)
Ион-переносчик	H ⁺
Электроды	Катод Pt/C Анод Pt-Ru/C (Os, Rh ...)
Анодная реакция	CH ₃ OH + H ₂ O → CO ₂ + 6H ⁺ + 6ē
Катодная реакция	3/2O ₂ + 6H ⁺ + 6ē → 3H ₂ O
Проблемы	Гидратация — дегидратация

Отдельный интерес представляют топливные элементы на фосфорной кислоте (с фосфорнокислым электролитом) (Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)). Мощность созданных установок с батареями таких ТЭ достигает 11 МВт, топливные элементы этого типа могут использовать дисциplinные виды углеводородных топлив без содержания серы. При умеренной рабочей температуре до 200 °С, в фосфорнокислых ТЭ реализуется эффективность до 80 %. В табл. 4 приведены основные параметры элемента, на рис. 5 — его структура.

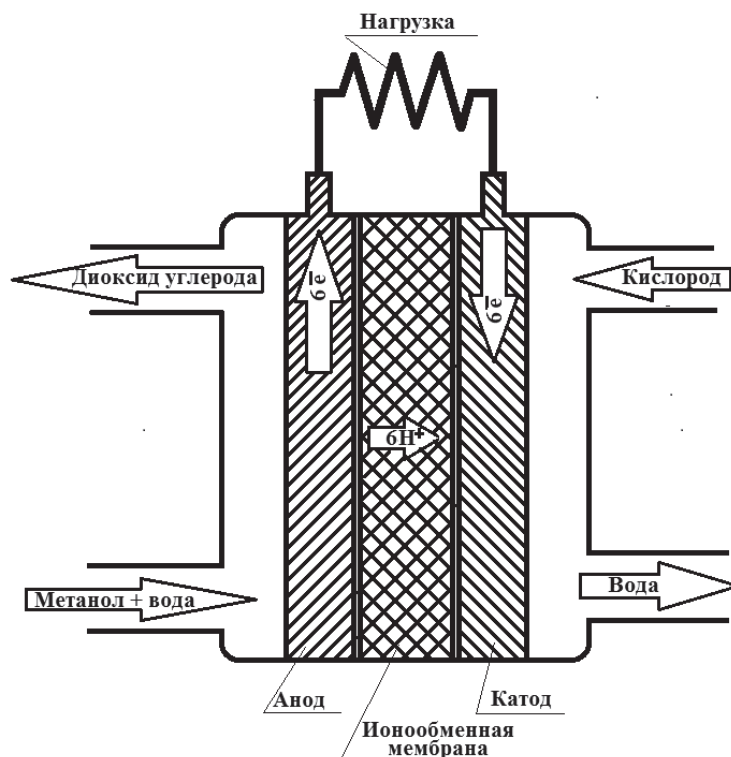


Рис. 4. Метанольный топливный элемент DMFC

Таблица 4

Топливный элемент PAFC на фосфорной кислоте

Электролит	H ₃ PO ₄ (на твердом носителе SiC или др.)
Реагенты	H ₂ , воздух (O ₂)
Ион-переносчик	H ⁺
Электроды	Катод Pt/C, Pt – WO ₃ /C Анод Pt/C, Pt – Ru/C
Анодная реакция	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻
Катодная реакция	1/2O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O
Проблемы	Очень агрессивный электролит, разрушение электродов, отравление CO (не так критично при высоких температурах)

Все рассмотренные ранее топливные элементы относятся к низкотемпературным и среднетемпературным ТЭ, общей отличительной чертой которых является использование в качестве катализатора весьма дорогостоящей платины. Вследствие этого недостатками являются:

- высокая стоимость ТЭ;
- ограниченное количество катализатора ввиду дефицита природных запасов платины;
- платиновые электроды, резко снижающие свою активность («отравляются») под воздействием примесей — каталитических ядов, например, монооксида углерода, соединений серы и др.

Кроме рассмотренных низкотемпературных и среднетемпературных ТЭ, известны высокотемпературные элементы, которые включают два типа ТЭ. Первый тип имеет электролит из расплава карбонатов лития и натрия, находящихся в порах керамической матрицы. В качестве материалов электродов используются: для катода — оксиды никеля и лития; для анода — никель, легированный хромом. Во втором типе высокотемпературных элементов используется твердый электролит на основе оксидов циркония и иттрия, в качестве анода — никель, модифицированный оксидом циркония, в качестве катода — окисные полупроводниковые соединения [6], [7].

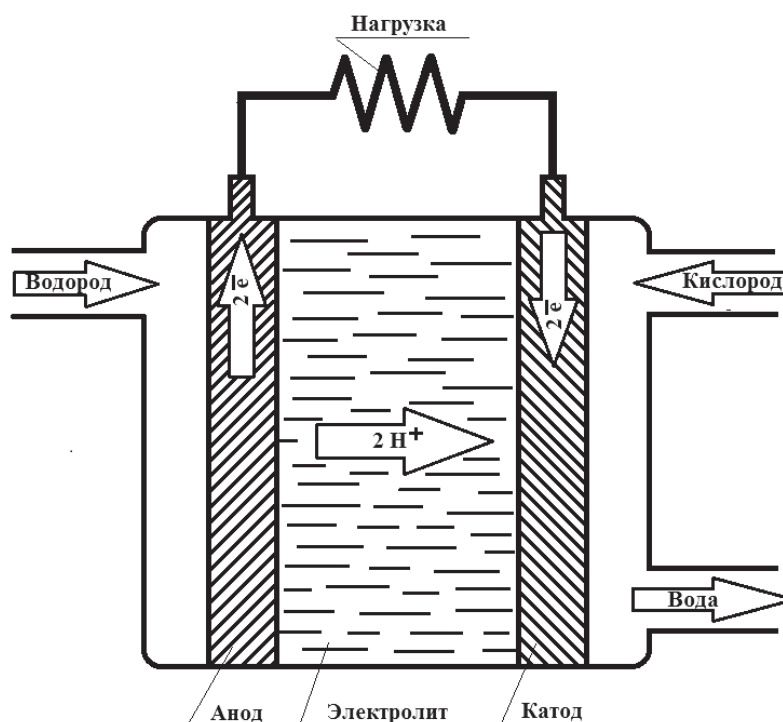


Рис. 5. Топливный элемент РАFC
с кислотным электролитом фосфорной кислоты

Топливные элементы на расплавах карбонатов или жидкометаллические карбонатные ТЭ (Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)), работая при высоких температурах, способны использовать топливо более низкого качества с достижением эффективности, равной 60 %. Переносчиком заряда в этих ТЭ являются ионы оксида углерода CO_3^{2-} , реакции и принцип действия MCFC показаны в табл. 5 и на рис. 6.

Таблица 5

Топливные элементы MCFC на расплавах карбонатов

Электролит	LiKCO_3 , LiNaCO_3 на матрице $\text{LiAlO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$
Реагенты	Ископаемый метан, синтезированные газы (H_2 , CO и др), O_2
Ион-переносчик	CO_3^{2-}
Электроды	Катод NiO , LiFeO_2 и др. Анод $\text{Ni} - \text{Al}$, $\text{Ni} - \text{Cr}$
Анодная реакция	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\bar{e}$
Катодная реакция	$1/2\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\bar{e} \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$
Проблемы	Попадание частиц NiO в электролит, работа с горючими газами при высоких температурах

Второй тип высокотемпературных топливных элементов используют в качестве электролита твердую непористую керамическую композицию и называются *твердооксидными* ТЭ (Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)). Такой состав обеспечивает ТЭ прочную конструкцию. Высокие развиваемые рабочие температуры (до 1000°C) позволяют использовать любые виды углеводородных топлив без предварительной обработки, однако требуют длительного времени для запуска. КПД производимой электрической энергии является самым высоким из всех ранее рассмотренных ТЭ и составляет не менее 70 %, а в перспективе в доведенных до полного совершенства конструкциях может составлять до 90 %. Параметры твердооксидного ТЭ приведены в табл. 6, принцип работы показан на рис. 7.

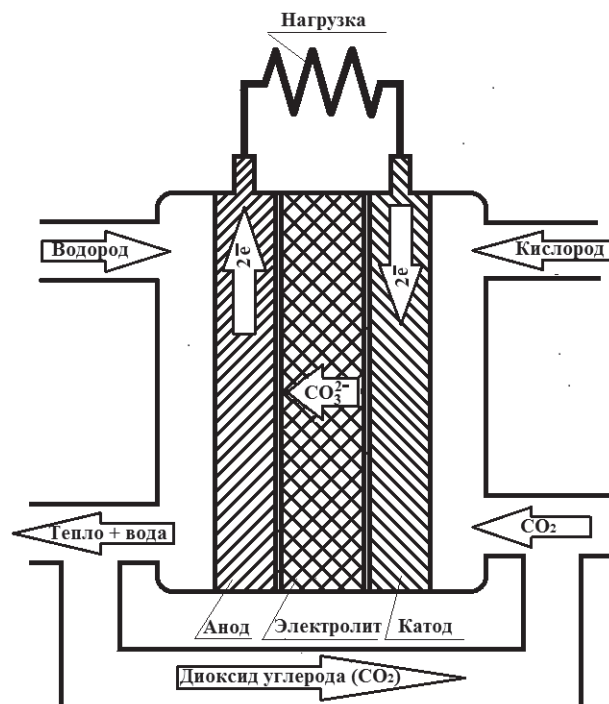


Рис. 6. Принцип жидкометаллического топливного элемента MCFC

Таблица 6

Топливные элементы SOFC на твердых оксидах

Электролит	ZrO_2, CeO_2, Y_2O_3
Реагенты	Ископаемый метан, синтезированные газы (H_2 , CO и др.), O_2 или воздух
Ион-переносчик	O_2^{2-}
Электроды	Катод $LaSrMnO_3$, лантанидные перовскиты и др. Анод Ni (+NO) и др.
Анодная реакция	$2H_2 + O_2^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$
Катодная реакция	$O_2 + 2e^- \rightarrow O_2^{2-}$
Проблемы	Долгосрочная стабильность материалов, работа с горючими газами при высоких температурах

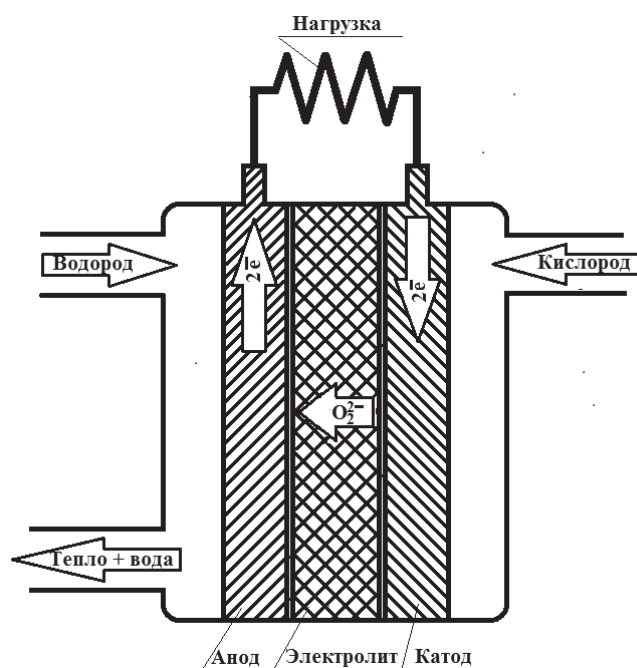


Рис. 7. Принцип действия твердооксидного топливного элемента SOFC

Для сопоставления свойств всех рассмотренных ранее топливных элементов сведем их основные параметры в табл. 7.

Таблица 7

Различные виды топливных элементов

Вид ТЭ	Щелочные (AFC)	Водородные с H ⁺ мембраной (PEMFC)	Метанольные с H ⁺ мембраной (DMFC)	ТЭ на H ₃ PO ₄ (PAFC)	ТЭ на расплавах карбонатов (MCFC)	ТЭ на твердых окислах (SOFC)
Применение	Космос, транспорт, автономные системы			Стационарные установки, комбинированное получение электроэнергии и тепла		
Рабочие температуры, °C	60–90	60–90 (200)	90–120	160–220	600–700	800–1000
Мощность, кВт	5–150	5–250	5	50–11000	100–2000	100–250
КПД, %	До 70	≈50	≈50	50–70	До 70	До 70 и более

Принципиально, что реакции в топливных элементах не обязательно должны быть реакциями окисления углеводов. В перспективе могут быть задействованы и другие электрохимические реакции, которые позволят осуществить эффективное непосредственное получение электричества, например, из цинка, натрия, магния и др. [8]. Таким образом, ТЭ являются устройствами высокой энергоэффективности. В существующих ТЭ 60–70 % и более энергии топлива непосредственно преобразуется в электричество, в то время как для современных теплоэнергетических установок с тепловыми двигателями КПД находится на уровне 40 % (с учетом КПД электрического генератора). Это отличие обусловлено тем, что процесс преобразования энергии в ТЭ не имеет промежуточной стадии генерации теплоты, и для электрохимического способа не существует ограничения цикла Карно. Такое выгодное отличие топливных элементов от тепловых двигателей постоянно вызывает интерес производителей энергетического оборудования [9], [10].

Кроме того, ТЭ перекрывают широкий диапазон мощностей, обеспечивают экологическую безопасность установок, бесшумность их работы и возможность параллельной генерации тепловой энергии. Однако широкое распространение ТЭ в современной энергетике сдерживается их высокой стоимостью и недостаточным ресурсом, который составляет порядка 8000 ч. Также немаловажной проблемой является утилизация отработавших ТЭ. Для нужд транспортных энергетических установок топливные элементы выявляют еще один недостаток — низкую динамику изменения генерируемой мощности. Пути преодоления этого недостатка представляются в виде создания дополнительных систем накопительных аккумуляторов, отдающих необходимое количество электроэнергии в переходных процессах.

Топливные элементы ранее использовались в основном для специальных целей, таких как аэрокосмическая и питание пропульсивного комплекса подводных кораблей ВМФ [11]. В современном машиностроении технология ТЭ достигла определенного уровня развития и находится в коммерческом использовании в таких приложениях, как вилочные погрузчики, резервные генераторы / источники бесперебойного питания, а также комбинированные теплоэнергетические системы. Топливные элементы находят коммерческое применение в легковых, автобусных, грузовых и железнодорожных транспортных средствах. Масштабное производство топливных элементов для грузовых и легковых автомобилей было объявлено ведущими изготовителями в апреле 2019 г. [12]. Тестирование возможности использования ТЭ для применений в качестве СЭУ проводилось в течение последнего десятилетия, однако топливные элементы в судостроении все еще находятся на начальных стадиях внедрения.

Учитывая специфику конфигурации судовых систем, которые должны иметь соответствующую конструкцию для использования произведенной электроэнергии, в настоящее время определено в общей сложности 23 проекта для судового применения ТЭ. Они включают оценку

потенциала использования топливных элементов, разработку правил, технико-экономическое обоснование и испытание топливных элементов на судах. Европейским агентством по безопасности на море проверены семь технологий ТЭ и сделан вывод о том, что твердооксидный топливный элемент (SOFC), топливный элемент с протонообменной мембраной (PEMFC) и высокотемпературный HT-PEMFC являются наиболее перспективными для морского использования [13]. Несмотря на то, что между указанными технологиями существует много общего, они имеют различия по важным аспектам, таким как сложность установки, варианты топлива, допуск на примеси в топливе и общая эффективность, включая рекуперацию отработанного тепла. Сравнение их характеристик приведено в табл. 8.

Таблица 8

Перспективы применения топливных элементов в судостроении

Топливные элементы		PEMFC	HT-PEMFC	SOFC
Технические характеристики	Типичное применение	Морские (каботажные, трамповые и т. п.) и вспомогательные суда		
	Мощность	< 400 кВт	< 30 кВт	> 100 кВт
	Срок службы элемента	Умеренный	Неизвестно	Умеренный
	Эффективность производства электроэнергии, КПД	50–60 %		~60 %
	Рабочая температура	50–90 °С	140–200 °С	500–1000 °С
	Способность к изменению нагрузки	Высокая	Средняя	Низкая
	Чувствительность к примесям в топливе	Высокая	Низкая	Низкая
	Апробированность технологии	Высокая	Низкая	Умеренная
	Энергетическая плотность элемента	Высокая	Высокая	Умеренная
Потенциальная экологическая безопасность при работе на водороде		100%-е отсутствие выбросов вредных веществ		
Относительная стоимость (среди прочих топливных элементов)		Низкая	Умеренная	Высокая
Гибкость в использовании топлива	Ископаемое	Только водород	Водород, сжиженный природный газ, морской газойль, метанол	
	Не ископаемое	Только водород	Водород, сжиженный биогаз, биодизельное и другие виды биотоплива	
Текущее использование	Суда на водороде по заказам	В перспективе планируется постройка новых паромов		

Ранее отмечалось, что в настоящее время ТЭ являются дорогостоящим вариантом по сравнению с традиционными преобразователями энергии. Это связано со значительно более высокими капитальными затратами. Также могут оказаться достаточно высокими эксплуатационные расходы в зависимости от используемого топлива. Первоначальные инвестиционные затраты варьируются от 2000 до 6000 долл. США на 1 кВт генерируемой ТЭ энергии, в то время как традиционные дизельные энергетические установки имеют аналогичные затраты практически на порядок меньше. Самыми дешевыми являются топливные элементы PEMFC, стоимость которых составляет около 1500–2860 долл. США / кВт при стоимости установки 510 000 долл. США [13]. Так, например, в рамках проекта SF-BREEZE в США была изучена экономическая целесообразность высокоскоростного пассажирского парома, работающего исключительно на водородных топливных элементах, где стоимость топливного элемента PEMFC составляла 2500 долл. США за 1 кВт. В настоящее время капитальные затраты при постройке судна оцениваются в 1,5–3,5 раза выше, чем сопоставимого по цене дизельного парома.

Расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание альтернативной СЭУ на топливных элементах оценивается в два–восемь раз больше, чем для сопоставимого дизеля из-за высоких текущих затрат на замену батарей. Кроме того, если сравнить стоимость самого дорогого жидкого низкосернистого топлива, потребляемого энергетической установкой, то она окажется в три–пять раз ниже, чем в настоящее время стоимость невозобновляемого сжиженного водорода (LH_2), используемого для аналогичных целей¹.

Дополнительные экономические проблемы возникают при замене ячеек ТЭ как наиболее изнашиваемой части установки. Некоторые эксперты оценивают такие расходы в 50–60 % капитальных затрат на топливный элемент. Существуют значительные различия в доступных данных, указывающих интервалы замены ТЭ. Большинство исследований свидетельствуют о том, что жизненный цикл энергетической установки с ТЭ составляет 20–30 лет, тогда как срок службы элементов активной зоны ТЭ в настоящее время составляет два–три года, и некоторые производители стремятся увеличить ресурс до семи лет. Так, согласно проведенным исследованиям Shell², ожидаемая продолжительность жизни для двух наиболее перспективных технологий составляет 60 000 ч для топливных элементов PEMFC и до 90 000 ч для твердооксидных топливных элементов.

Несмотря на то, что, как отмечалось ранее, топливные элементы способны использовать различные углеводородные топлива, основным видом топлива для наиболее перспективных ТЭ является водород. Водород в современной энергетике рассматривается как самый экологичный вид носителя энергии, использование которого не нарушает углеродный баланс атмосферы, поскольку единственным продуктом окисления водорода является вода. При этом, в отличие от достаточно широко используемого в качестве топлива природного газа (LNG), водород обладает специфическими свойствами, существенно отличающимися от свойств метана как основного компонента природного газа, включая низкую плотность водорода, низкую энергию воспламенения, широкий диапазон воспламеняемости и потенциальную взрывоопасность. В табл. 9 представлено сопоставление отдельных наиболее значимых в эксплуатации параметров водорода и метана [14], [15].

Таблица 9

Сопоставление свойств водорода H_2 и метана CH_4

Свойство	Водород	Метан	Риски, потенциально возникающие в эксплуатации при использовании водорода в качестве топлива
Плотность газа при нормальных условиях	0,0827 кг/м ³	0,659 кг/м ³	Несмотря на высокую «летучесть» водорода, способствующую высокой рассеиваемости водорода в случае утечки, истекающая струя водорода может распространяться дальше, чем для метана (см. в таблице далее).
Концентрационные пределы топливовоздушной смеси, способной к воспламенению при 25 °C, 101,3 кПа	4–75 % об.	5–17 % об.	При образовании водородного облака воспламеняющийся объем окажется существенно больше, чем у аналогичного облака метана
Температура самовоспламенения	585 °C	537 °C	Риски отсутствуют
Минимальная энергия активации для воспламенения	0,017 мДж	0,27 мДж	Несмотря на более высокую температуру самовоспламенения водородной топливовоздушной смеси по сравнению с метановой, воспламенение водородной смеси при достижении температуры происходит легче и быстрее

¹ Sandia, 'Feasibility of the SF-BREEZE: a Zero-Emission, Hydrogen Fuel Cell, High-Speed Passenger', Sandia report, SAND2016–9719, September 2016, accessed at <https://energy.sandia.gov>. Sandia.

² Shell (2017), 'Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H₂', Shell/Wuppertal Hydrogen Study, accessed at <https://epub.wupperinst.org>.

Таблица 9
(Продолжение)

Температура кипения при нормальном давлении	–253 °С	–161 °С	Системы хранения водорода (в случае хранения в сжиженном состоянии (LH_2)) устанавливают более жесткие требования к организации объемов для хранения, чем сжиженный природный газ (LNG). При этом необходимо учитывать, что LH_2 , в отличие от LNG, способен конденсировать кислород в воздухе, что, в свою очередь, может быть связано с малоизученными криогенными эффектами
Низшая теплотворная способность	120 кДж/г	50 кДж/г	Учитывая низкую плотность водорода, для газов, находящихся при равном давлении, энергия, выделяемая для водорода, составляет около 85 % от энергии, выделяемой для метана. Исходя из этого, параметр дополнительных рисков не создаст
Максимальная скорость горения в воздухе при нормальных условиях	265–325 см/с	37–45 см/с	Высокая скорость распространения пламени для водорода приведет к более резкому по сравнению с метаном росту давления в замкнутых объемах
Детонационная способность, измеряемая в минимальной массе тетрила	0,8 г	16 000 г	Более высокая по сравнению с метаном склонность водорода к развитию детонационных процессов способна с учетом высокой скорости распространения пламени (см. ранее), значительно увеличить интенсивность взрыва, особенно в замкнутых объемах
Коэффициент ламинарной диффузии при нормальных условиях	0,61 см ² /с	0,16 см ² /с	Незначительное влияние на дисперсию, в которой преобладает турбулентная диффузия. Более важным фактором являются высокая скорость потока и низкая плотность водорода, связанные с большей длиной водородных импульсных струй по сравнению с истечением метана
Скорость звука при нормальных условиях	1 294 м/с	446 м/с	Способствует увеличению объемного расхода водорода по сравнению с метаном при возникновении утечек в надкритическом режиме истечения, однако водород, обладая более высокой скоростью звука, имеет меньшую плотностью. Поэтому параметры компенсируют друг друга, что приводит к одинаковому импульсу струи при истечении метана и водорода в равных условиях
Эффект Джоуля – Томсона при снижении давления	Вызывает небольшое повышение температуры	Вызывает снижение температуры	Ограничивает скорость bunkеровки при использовании сжатого водорода в обеспечении сдерживания температуры в резервуаре хранения. Однако влияние незначительно, так как повышение температуры составляет несколько кельвинов

Таблица 9
(Окончание)

Адиабатная температура горения	2 045 °С	1 875 °С	Водородное пламя может быть более горячим
Доля теплоты, передаваемая излучением пламени в окружающую среду	17–25 %	23–33 %	Не вызывает риски (указанные диапазоны являются ориентировочными и варьируются в зависимости от скорости тепловыделения. Существуют ограниченные крупномасштабные данные по водороду). Чистые смеси водорода и воздуха горят несветящимся, почти невидимым, бледно-голубым горячим пламенем и несмотря на то, что пламя водорода может достигать более высоких температур (до 2130 °С), чем другие газы, доля тепла, передаваемая излучением при горении водорода, обычно ниже).

Исходя из данных, приведенных в табл. 9, следует отметить, что наибольшие риски использования водорода в качестве основного судового топлива в основном обусловлены следующими факторами:

- большим диапазоном воспламеняемости водорода (это означает, что большая часть истекающего газа может быть воспламенена);
- более низкой энергией активации водорода и, как следствие, более интенсивным воспламенением водорода (для высоких концентраций);
- меньшими расстояниями горения, необходимыми для инициирования перехода горения водорода от дефлаграции (процесс дозвукового горения, когда передача энергии от зоны реакции в направлении движения фронта происходит в основном за счет конвективной передачи, иное название — конвективное горение) к детонации, когда горение происходит со сверхзвуковой скоростью, а передача энергии — за счет разогрева реагентов от внутреннего трения при прохождении ударной волны;
- более высоким давлением взрыва при взрыве водорода.

Отдельные проблемы связаны со способами хранения запасов водорода на борту судна. Водород может храниться в газообразном сжатом (до 350 или 700 бар) или в жидком криогенном состоянии. Хранение его в баллонах под большим давлением сопряжено не только с увеличенным числом рисков, но и с крайне громоздкими системами хранения, способными выдерживать такие давления. Кроме того, сжатый водород обладает очень низкой энергетической плотностью (менее 5 МДж на литр при 350 бар), в то время как сжиженный водород (LH_2) имеет энергоплотность, практически в два раза большую. Поэтому в разрабатываемых проектах предпочтение отдается криогенным системам хранения [16]. Как следствие, использование водорода на судах требует специальных резервуаров и бункеровочных систем. Стоимость бортовых систем хранения топлива может быть значительной и, несмотря на то, что системы хранения LH_2 разрабатываются для использования на судах, опыт использования их на водном транспорте очень ограничен. Ожидается, что резервуары для хранения LH_2 на судах будут стоить дороже, чем резервуары для сжиженного природного газа, поскольку сжиженный водород необходимо хранить при гораздо более низкой температуре. Это обуславливает более высокие требования к теплоизоляции и системе резервуаров. Также при проектировании необходимо учитывать тот факт, что диапазон температур состояния водорода в жидкой фазе составляет всего 20 °С, что, в свою очередь, вызывает определенные сложности поддержания водорода в криогенном жидком состоянии и минимизации

выкипания по сравнению с криогенным жидким природным газом. Кроме того, температуры жидкого водорода оказываются ниже, чем температуры сжижения или даже затвердевания обычных попутных газов (кислород, азот и др.). Такие эффекты могут вызывать специфические проблемы при захлаживании резервуаров хранения и всего процесса бункеровки в целом.

Крайне важной проблемой использования водородных ТЭ является регулирование и безопасность. Конкретные требования к видам топлива и технологиям отсутствуют. В настоящее время они не включены в «Международный кодекс по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки (Кодекс IGF)». В соответствии с ч. А этого кодекса необходимо использовать альтернативный подход к проектированию, чтобы продемонстрировать эквивалентный уровень безопасности. Это потребует обширного и очень дорогостоящего процесса проектирования и утверждения. Несомненно, водородные системы можно сделать такими же безопасными, как системы на природном газе. Однако неблагоприятное воздействие водорода означает, что для получения системы, уровень безопасности которой эквивалентен уровню безопасности обычных углеводородных систем, могут потребоваться различные по своей сути безопасные конструкции и более высокий уровень мер предосторожности с превентивными и смягчающими мерами.

Международное сертификационное и классификационное общество DNV выпустило правила классификации для установок на топливных элементах¹, которые содержат требования к проектированию и устройству энергетических установок на топливных элементах и помещений, в которых находятся такие установки. Они охватывают все элементы установки, от первичной подачи топлива до системы отвода отработавших газов. Правила DNV не распространяются непосредственно на другие установки для использования водорода в качестве топлива. Существующие правила класса могут упростить альтернативный процесс проектирования при условии, что правила признаны соответствующей администрацией. В сотрудничестве с Норвежским морским управлением в 2018 г. DNV подготовлено резюме применимых правил для судов на топливных элементах в Норвегии. Таким образом, несмотря на потенциально высокую энергоэффективность ТЭ мощным сдерживающим фактором широкого распространения технологии ТЭ в судостроении до настоящего времени являются высокие инвестиционные и эксплуатационные затраты, а также проблемы, связанные с использованием водорода в судовых условиях. В этой связи технологию топливных элементов следует рассматривать как высокоэнергоэффективную технологию будущего.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Исчерпание потенциала возможностей повышения топливной экономичности поршневыми ДВС побуждает к поиску новых альтернативных решений для энергетических установок. Технология топливных элементов, не попадающая под ограничения теоремы Карно можно рассматривать как альтернативный ДВС, перспективный высокоэкономичный источник энергии для судовой отрасли.

2. Среди всего многообразия видов топливных элементов наибольший интерес для судовых энергетических установок представляют низкотемпературные и высокотемпературные топливные элементы с протонообменной мембраной (PEMFC и HT PEMFC соответственно), а также топливные элементы на твердых оксидах (SOFC), способные обеспечить достижение КПД в 60 %, а в перспективе до 70 % и более.

3. Наиболее привлекательным реагентом для питания топливных элементов является водород, который представляется самым экологичным видом топлива. Однако технологии хранения и использования водорода в качестве основного топлива в СЭУ в современном судостроении пока не имеют достаточного распространения и апробации.

¹ https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Five-lessons-to-learn-on-hydrogen-as-ship-fuel.html?utm_campaign=MA_21Q3_ART_Ind_350_Hydrogen_Fuel_Handbook&utm_medium=email&utm_source=Eloqua

4. Несмотря на то, что в автомобильной отрасли топливные элементы находят все более широкое распространение, опыт их использования в судостроении пока является недостаточным, технология находится на стадии апробации и формирования нормативной базы.

5. Отсутствие нормативной базы не может рассматриваться как основной сдерживающий фактор внедрения технологии ТЭ в судостроительной отрасли. В настоящее время основным препятствием для внедрения является весьма высокая инвестиционная стоимость энергетических установок с ТЭ, которая почти на порядок выше, чем стоимость дизельных энергетических установок. При этом ТЭ пока не обеспечивают требуемые ресурсные показатели и влекут высокие эксплуатационные расходы и риски.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Живлюк Г. Е. Перспективные технологии водного транспорта для ограничения парникового эффекта / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 730–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.
2. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
3. Коровин М. И. Топливные элементы и электрохимические установки / М. И. Коровин. — М.: Издательство МЭИ, 2005. — 280 с.
4. Сборник нормативно-методических материалов. Книга двадцать вторая. НД № 2–139902–27. — СПб.: Российский регистр судоходства, 2013. — 10 с.
5. Лебедева М. В. Топливные элементы — характеристика, физико-химические параметры, применение / М. В. Лебедева, Н. А. Яштулов. — М.: Мир науки, 2020. — 63 с.
6. Kupecki J. Modeling, Design, Construction, and Operation of Power Generators with Solid Oxide Fuel Cells / J. Kupecki. — Springer, Cham, 2018. — 261 p.
7. Липилин А. С. ТОТЭ и энергосистемы на их основе: состояние и перспективы / А. С. Липилин // Электрохимическая энергетика. — 2007. — Т. 7. — № 2. — С. 61–72.
8. Moorman C. E. Renewable Energy and Wildlife Conservation (Wildlife Management and Conservation) / C. E. Moorman, S. M. Grodsky, S. Rupp. — Johns Hopkins University Press, 2019. — 271 p.
9. Мельник Г. В. Топливные элементы / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2007. — № 1 (227). — С. 50–54.
10. Staffell I. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system / I. Staffell, D. Scamman, A. V. Abad, P. Balcombe, P. E. Dodds, P. Ekins, N. Shah, K. R. Ward // Energy & Environmental Science. — 2019. — Vol. 12. — Is. 2. — Pp. 463–491. DOI: 10.1039/C8EE01157E.
11. Лоскутников А. А. Термодинамический облик комбинированных энергоустановок на базе ГТУ и ТОТЭ / А. А. Лоскутников, И. М. Горюнов, Ф. Г. Бакиров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королёва (Национального исследовательского университета). — 2011. — № 3–1 (27). — С. 370–379.
12. Wang J. Techno-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization / J. Wang, H. Wang, Y. Fan // Engineering. — 2018. — Vol. 4. — Is. 3. — Pp. 352–360. DOI: 10.1016/j.eng.2018.05.007.
13. Saito N. The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies. Master Diss. / N. Saito. — Malmö, Sweden: World Maritime University, 2018. — 97 p.
14. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. — 2-е изд. — М.: Мир, 1985. — 520 с.
15. Klebanoff L. Comparison of the safety-related physical and combustion properties of liquid hydrogen and liquid natural gas in the context of the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry / L. E. Klebanoff, J. W. Pratt, C. B. LaFleur // International Journal of Hydrogen Energy. — 2017. — Vol. 42. — Is. 1. — Pp. 757–774. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.024.
16. Lindstad E. Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements / E. Lindstad, T. I. Bø // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2018. — Vol. 63. — Pp. 276–290. DOI: 10.1016/j.trd.2018.06.001.

REFERENCES

1. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. "Advanced water transport technologies for limiting the greenhouse effect." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 730–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.
2. Ivanchenko, A.A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivljuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
3. Korovin, M. I. *Toplivnye elementy i elektrokhimicheskie ustanovki*. M.: Izdatel'stvo MEI, 2005.
4. *Sbornik normativno-metodicheskikh materialov. Kniga dvadtsat' vtoraya. ND № 2–139902–27*. SPb.: Rossiiskii registr sudokhodstva, 2013.
5. Lebedeva, M.V., and N. A. Yashtulov. *Toplivnye elementy — kharakteristika, fiziko-khimicheskie parametry, primeneniye*. M.: Mir nauki, 2020.
6. Kupecki Jakub. *Modeling, Design, Construction, and Operation of Power Generators with Solid Oxide Fuel Cells*. Springer, Cham, 2018.
7. Lipilin, A. S. "TOTE i energosistemy na ikh osnove: sostoyaniye i perspektivy." *Elektrokhimicheskaya energetika* 7.2 (2007): 61–72.
8. Moorman, Christopher E., Steven M. Grodsky, and Susan Rupp. *Renewable Energy and Wildlife Conservation (Wildlife Management and Conservation)*. Johns Hopkins University Press, 2019.
9. Mel'nik, G.V. "Toplivnye element." *Dvigatelsestroenie* 1(227) (2007): 50–54.
10. Staffell, Iain, Daniel Scamman, Anthony Velazquez Abad, Paul Balcombe, Paul E. Dodds, Paul Ekins, Nilay Shah, and Kate R. Ward. "The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system." *Energy & Environmental Science* 12.2 (2019): 463–491. DOI: 10.1039/C8EE01157E.
11. Loskutnikov, A. A., I. M. Gorjunov, and F. G. Bakirov. "Thermodynamic shape of the combined power installations, based on GTU and solid oxide fuel cells." *Vestnik of the Samara State Aerospace University* 3–1(27) (2011): 370–379.
12. Wang, Junye, Hualin Wang, and Yi Fan. "Techno-economic challenges of fuel cell commercialization." *Engineering* 4.3 (2018): 352–360. DOI: 10.1016/j.eng.2018.05.007.
13. Saito, Naohiro. The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies. Master Diss. Malmö, Sweden: World Maritime University, 2018.
14. Kukhling, Kh. *Spravochnik po fizike: Per. s nem.* 2nd ed. M.: Mir, 1985.
15. Klebanoff, L.E., J. W. Pratt, and C. B. LaFleur. "Comparison of the safety-related physical and combustion properties of liquid hydrogen and liquid natural gas in the context of the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry." *International Journal of Hydrogen Energy* 42.1 (2017): 757–774. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.024.
16. Lindstad, Elizabeth, and Torstein Ingebrigtsen Bø. "Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 63 (2018): 276–290. DOI: 10.1016/j.trd.2018.06.001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivljuk, Grigorij E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Petrov, Aleksandr P. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2021 г.
Received: December 7, 2021.

ASSESSMENT OF SHIP MECHANICAL SYSTEMS RELIABILITY FOR ARCTIC SHIPPING

E. S. Moseyko¹, E. O. Olhovik²

¹ — “Iceberg” Central Design Bureau, St. Petersburg, Russian Federation

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

When designing marine mechanical systems, their reliability is calculated according to the technical conditions of its constituent elements with an estimated service life. As a rule, the estimated and actual operational terms do not coincide, for a number of reasons, including due to the peculiarities of the ship systems operation. Thus, forecasting the service life of new marine equipment, taking into account the impact of external cyclic loads and the marine corrosive environment, is a complex multipurpose task, for which it is necessary to consider all stages of the life cycle from design to the moment of termination of their operation. The operational stage of the life cycle of marine mechanical systems is considered in the paper. Such data will contribute to the refinement of reliability calculations and the development of regulations for maintenance, repair and instrumental diagnostics of ship equipment. Durability criteria, namely, service life, operating time, frequency of repairs are chosen as reliability indicators. Accidents on ships that occurred at sea and inland waterways are affected; the procedure for extending the service life during the classification survey in operation is reflected. During the actual operation of the vessel, industry design organizations participate in the inspection of the vessels technical condition to extend the terms of their safe operation, organize technical control and supervision. Repair, maintenance or replacement of ship equipment is carried out in accordance with the prescribed regulations or in case of an unforeseen failure. The implementation of technical monitoring can provide current information on the actual condition of ship mechanical systems, which can reduce the technical and economic costs of their maintenance. This line of research may be important for vessels of the Arctic navigation area, which are characterized by increased requirements for the vessels survivability.

Keywords: accidents, system life cycle, service life, repair, technical inspection.

For citation:

Moseyko, Evgeniy S, and Evgeniy O. Olhovik. “Assessment of ship mechanical systems reliability for arctic shipping.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 120–128. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-120-128.

УДК 621.78/79:629

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СУДОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО СУДОХОДСТВА

Е. С. Мосейко¹, Е. О. Ольховик²

¹ — АО «Центральное конструкторское бюро «Айсберг»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Темой исследования является оценка надежности механических систем в процессе их проектирования, выполняемая по данным технических условий составляющих ее элементов и расчетного срока службы. Как правило, расчетный и фактический эксплуатационный сроки не совпадают по ряду причин, в том числе ввиду особенностей эксплуатации судовых систем. Таким образом, прогнозирование срока службы нового судового оборудования с учетом воздействия внешних циклических нагрузок и морской коррозионной среды — это сложная комплексная задача, для решения которой необходимо рассматривать все этапы жизненного цикла: от проектирования до момента прекращения их эксплуатации. В работе рассматривается эксплуатационный этап жизненного цикла судовых механических систем. Приведенные данные будут способствовать уточнению расчетов надежности и развитию регламентов по техническому обслуживанию, ремонту и инструментальной диагностике судового оборудования. В качестве показателей надежности

были выбраны критерии долговечности: срок службы, наработка, периодичность проведения ремонта. Рассмотрены аварийные случаи на судах, произошедшие на море и внутренних водных путях, отражен порядок продления срока службы при классификационном освидетельствовании в эксплуатации. Во время фактической работы судна отраслевые проектные организации участвуют в освидетельствовании технического состояния судов для продления сроков их безопасной эксплуатации, организуют технический контроль и надзор. Работы по ремонту, обслуживанию или замене судового оборудования производятся в соответствии с назначенными регламентами или в случае непредвиденного выхода из строя. Отмечается, что выполнение технического мониторинга может являться действующей информацией о фактическом состоянии судовых механических систем, что позволит снизить технико-экономические затраты на их содержание. Данное направление исследований может быть важным для судов арктического района плавания, для которых характерными являются повышенные требования к живучести судов.

Ключевые слова: аварийные случаи, жизненный цикл системы, срок службы, ремонт, техническое освидетельствование.

Для цитирования:

Мосейко Е. С. Оценка надежности судовых механических систем для арктического судоходства / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 120–128. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-120-128.

Введение (Introduction)

Развитие транспортного коридора Северного морского пути РФ является важной задачей на период до 2030 г., при этом запланированный грузооборот стремительно будет возрастать до 80 млн т в год. Для обеспечения поставленных задач конструкторские бюро и судостроительные заводы проектируют и строят новые транспортные суда, ледоколы, суда технического обслуживания и др. На этапе выпуска конструкторской документации судовых механических систем закладывается их надежность по данным технических условий входящих элементов. Однако в условиях циклических нагрузок и воздействия коррозионной среды прогнозирование срока службы для новой техники это является весьма сложной комплексной задачей.

В научной литературе, в частности в работе [1], исследованы способы хранения текущих параметров технологических процессов с учетом анализа всех имеющихся приборно-измеряемых данных *методом функциональной диагностики*. Объективный приборный контроль и автоматическое прогнозирование опасных тенденций ухудшения технического состояния судового оборудования обеспечит возможность своевременного планирования текущих задач эксплуатации, включая использование судов по прямому назначению и проведение ремонтно-восстановительных работ по фактическому состоянию техники.

В работе [2] выполнен обзор и анализ стратегий технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования. Предложена стратегия и описан путь повышения эффективности технического обслуживания и ремонта оборудования роторного типа, в частности перегрузочных машин, путем использования стационарной системы мониторинга фактического состояния оборудования.

Целью данной работы является анализ этапа жизненного цикла судового оборудования в период его эксплуатации. В качестве объектов исследования были выбраны элементы, входящие в судовые механические системы электронасосов для перекачки моторного масла, дизельного топлива, охлаждения забортной и пресной воды, а также обслуживания энергетических установок.

Повышение надежности судового оборудования осуществляется за счет увеличения ресурса входящих элементов на стадиях проектирования и изготовления. В связи с этим возникает потребность в моделировании долговечности изделия по различным технологическим и конструктивным параметрам. Возможна также оценка сопротивления внешним нагрузкам (например, триботехнического характера) путем проведения прямых экспериментов [3]. Для этого необходима достоверная информация об уровне надежности системы и механизмов, позволяющая своевременно предпринять эффективные меры по обеспечению требуемой долговечности [4]. Тем не менее целесообразным является техническое обслуживание и ремонт, выполняемые по «состоянию», по результатам проведения безразборной диагностики и методов прогнозирования остаточного ресурса работы [5]. Как правило,

новая серия судов снабжается дополнительными устройствами и приборами для более эффективной и надежной эксплуатации. Возникает необходимость совершенствования технологических процессов во внеэксплуатационный период и судоремонта.

Недостаточное техническое обслуживание судового оборудования может привести к выходу его из строя, что на сегодняшний день можно предотвратить следующими способами: проведением инструментальной диагностики элементов систем; поддерживающим ремонтом независимо от текущего технического состояния; классификационным освидетельствованием в эксплуатации. Также порядок осуществления технического мониторинга может обеспечить органов управления разных уровней и отраслевых организаций действующей информацией о техническом состоянии судов для принятия решения об их дальнейшей эксплуатации.

Задача оценки технического состояния судовых систем тесно связана с прогнозированием их функциональной надежности, в том числе более сложных механических систем, представленных в работе [6]. После выполнения анализа основных видов и причин нарушений работоспособности судовых механических систем входящие элементы нуждаются в соответствующем обслуживании и контроле. Сравнительные полученные результаты подтверждены приведенными далее статистическими данными. По данным Управления государственного морского и речного надзора Федеральной службы по надзору в сфере транспорта, анализ технических аварийных случаев, произошедших на море на судах РФ в период 2014–2020 гг., представлен в табл. 1. Аварийные случаи, произошедшие на море РФ и внутренних водных путях по видам судов, показаны в табл. 2. При этом в выборке статистических данных не учитывались навигационные аварийные случаи при потере остойчивости, посадки на мель, столкновении судов и др.

В работе [7] выполнен анализ причин аварийности в зоне ответственности Дальневосточного управления государственного морского надзора, рассмотрены некоторые аспекты эксплуатации судовых энергетических установок, приведен сравнительный статистический анализ аварийности в период 2014–2017 гг. В работе [8] рассмотрены аварийные случаи с дизельными ледоколами. Выделены факторы риска эксплуатации, проанализирована зависимость количества аварийных ситуаций дизельных ледоколов по годам, представлены наиболее опасные факторы для аварий, а именно: недостаточная прочность конструкций, сложные ледовые условия, человеческий фактор, случаи нарушения правил эксплуатации морского транспорта.

За последние десятилетия в Арктике зарегистрированы аварийные случаи на основе сбора эмпирических данных за период 2004–2017 гг. В работе [9] рассмотрены инциденты, произошедшие вдоль Северного морского пути РФ до введения в действие «Международного кодекса судов, эксплуатирующихся в полярных водах» (далее — «Полярный кодекс»). В качестве результатов исследования определены основные причины выявленных аварийных случаев, произошедших в Российской Арктике, и приведена их классификация в соответствии со стандартами Международной морской организации (англ. International Maritime Organization, IMO). В работе [10] предлагается создание механизма государственного контроля арктических портов для решения потенциальных проблем, связанных с внедрением «Полярного кодекса».

Таблица 1

Аварийные случаи, произошедшие на море на судах РФ в период 2014–2020 гг., шт.

Виды технических АС	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	Технические АС от общего количества, %						
	48	52	35	53	44	46	50
	Количество технических АС, шт.						
Повреждения механизмов и систем	18	27	21	32	30	20	20
Повреждение корпуса	2	7	1	3	1	4	2
Взрывы, пожары	2	4	5	7	9	4	4
Потеря остойчивости	—	—	2	3	6	3	4
Всего технических АС	22	38	29	45	46	31	30

Таблица 2

**Аварийные случаи, произошедшие на море на судах РФ и ВВП
в период 2014–2020 гг., шт.**

Виды судов	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Пассажирское судно	Общее	Общее	1	1	5	3	2
Исследовательское судно			–	–	–	2	1
Танкер			9	7	14	5	9
Сухогруз			18	15	24	18	12
Буксир			10	14	13	9	3
Ледокол	44	67	–	1	3	1	1
Рефрижератор			1	–	–	2	–
Самоходный плавкран			1	–	2	1	1
Земснаряд			1	–	1	1	–
Маломерное судно			1	2	1	3	–
Рыбопромысловое судно	5	12	35	38	36	21	30
Другие			1	2	4	1	1
<i>Всего</i>	49	79	82	84	103	67	60

Методы и материалы (Methods and Materials)

В ч. VIII «Правил классификации и постройки морских судов» РМРС даны рекомендации по обеспечению производительности насосов для судовых механических систем. Операции по ремонту, техническому обслуживанию или замене судового оборудования производятся в соответствии с назначенными регламентами или в случае непредвиденного выхода из строя.

Срок службы судна до плановых и полного ремонтов устанавливается в соответствии с техническим заданием на проектирование. На стадии проекта судна закладывается ресурс основного и вспомогательного оборудования с учетом эксплуатационно-ремонтного этапа жизненного цикла. В свою очередь, прогнозируемый график отображает периодичность и продолжительность событий эксплуатации и плановых ремонтов судна в течение всего срока его службы (табл. 3). Проектное обоснование надежности выпускается на основании нормативно-технических документов и в качестве основных показателей содержит долговечность и ремонтпригодность отдельных элементов судовых механических систем. Тем не менее иногда устанавливаемые при проектировании теоретический, а при изготовлении технологический уровни надежности судового оборудования в реальных условиях не подтверждаются.

Таблица 3

Фрагмент событий эксплуатационно-ремонтного цикла судна

Событие	Периодичность по истечению, лет	Продолжительность, мес.
Техническое обслуживание	2–4	0,5
Текущий ремонт	2–3	3,0
Заводской (средний) ремонт	4–6	12,0
Доковый ремонт	10–12	2,0
Классификационное освидетельствование	5	1,0

В «Полярном кодексе» даны рекомендации для судов, эксплуатирующихся при низких температурах воздуха. Судовые системы и оборудования жизнеобеспечения должны сохранять полную работоспособность при полярной рабочей температуре в течение максимального расчетного времени с учетом обледенения или скопления снега [11]. При более детальном изучении этого документа видно, что положения не распространяются на все типы рыболовецких и небольших грузовых судов, несмотря на то, что аварии с участием судов данного типа могут не наносить такой вред окружающей среде, как с участием, например, нефтяных танкеров. При этом морские международные организации обращают внимание на актуализацию «Полярного кодекса» [12] и решение других экологических проблем арктического судоходства, предложенных в работе [13].

Во время фактической эксплуатации судна одной из функций конструкторских бюро или сторонней отраслевой организации может быть участие в освидетельствовании технического состояния с целью продления сроков службы судна. Также при продлении сроков службы с разной периодичностью и объемом освидетельствования судна необходимо руководствоваться «Правилами классификационных освидетельствований судов в эксплуатации» РМРС.

Результаты (Results)

Техническое освидетельствование рассматривается как внеэксплуатационный период жизненного цикла судна. Обеспечение существующей информацией о фактическом состоянии судовых механических систем является важной функцией управления контролем качества. Требования к качеству отражены в нормативно-технических документах и отраслевых стандартах.

На подготовительном этапе технического освидетельствования судна отраслевая организация подготавливает «Программу обследования технического состояния», устанавливающую номенклатуру работ и критерии допустимости продления срока службы. По результатам освидетельствования назначенная комиссия выпускает «Решение о продлении срока службы». После оценки существующего положения судна утверждается «Акт освидетельствования технического состояния» судового оборудования с указанием в нем выполненных мероприятий для продления срока службы или ограничений по эксплуатации в случае необходимости.

Перечень основных проверок, выполняемых при обследовании судовых механических систем:

- наличие и комплектность эксплуатационной документации (формуляры, паспорта, технические описания и инструкции по эксплуатации, вахтенные журналы);
- техническое состояние труб, сварных соединений, крепежных изделий (отсутствие механических, технологических и коррозионных повреждений и дефектов);
- техническое состояние и регулировка запорной, предохранительной, автоматической арматуры, наличие на них пломб;
- техническое состояние контрольно-измерительных приборов, наличие документов и клейм об их поверке;
- техническое состояние судового оборудования, входящего в систему (по паспортам и формулярам определяется наличие остаточного ресурса, устанавливается возможность и целесообразность в случае обнаружения неисправностей, ремонта или агрегатной замены).

Тем не менее отраслевым организациям, осуществляющим продление межремонтных интервалов, необходимо обратить внимание на актуализацию нормативно-технической документации по следующим вопросам:

- учет статистических данных технического состояния судового оборудования критериев долговечности в части назначенных сроков службы;
- дополнение технических терминов в действующих положениях, касающихся применения современных композитных материалов в судоремонте.

В качестве сокращения затрат подтверждается необходимость применения данных изменений к вновь проектируемым судам и определение возможности применения к старым проектам.

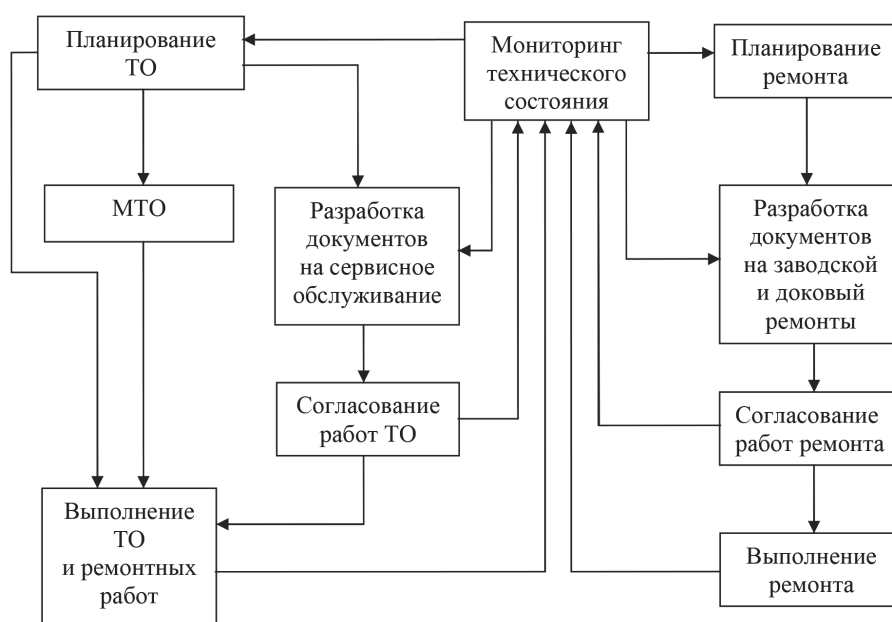
При проектировании нового судна необходимо учитывать опыт эксплуатации и оценок технического состояния с продлением межремонтных интервалов. Таким образом, возникает необходимость формирования возможной базы данных с описанием элементов судовых механических систем с фактической и плановой степенью износа и в перспективе выпуска программного обеспечения, которое при обработке базы данных будет выдавать предупреждения о комплексных показателях надежности.

Предлагаемая теоретическая модель судового оборудования (например, электронасоса) выявляет отклонения в работе по сигналам, поступающим на сервер. Далее данные поступают в контроллер, где происходит согласование диапазонов сигнала с блоком обработки. Необходимо использовать сравниваемые параметры температуры, давления, вибрации, напряжения тока и др. После

преобразования значения укладываются в показатели надежности, далее присваивается уровень технического состояния электронасоса («исправно», «требуется ремонт», «аварийное состояние»).

Для установления порядка осуществления технического мониторинга необходимо решение следующих вопросов:

- периодичность фиксирования технического состояния средствами диагностирования;
- порядок привлечения отраслевых организаций к диагностированию и определению состава участников технического мониторинга;
- установление форм учета технического состояния;
- установление порядка передачи результатов технического мониторинга (виды носителей информации, периодичность передачи информации по каналам связи).



Общая схема функционирования
системы технического обслуживания и ремонта судов

При этом появляется необходимость технического мониторинга для дальнейшего сбора информации отраслевыми организациями, занимающимися проектированием, эксплуатацией и ремонтом по учету технического состояния судов. В качестве одного из направлений авторского надзора конструкторским бюро и судостроительным заводом возможно осуществление технического мониторинга. Общая схема функционирования системы технического обслуживания и ремонта приведена на рисунке.

Обсуждение (Discussion results)

«Правилами классификационных освидетельствований судов в эксплуатации» РМРС предусмотрено для ответственных элементов судовых систем техническое обслуживание с полной или частичной разборкой объекта технического наблюдения. Это приводит к значительным экономическим потерям в процессе эксплуатации судов по прямому их назначению, которое в большинстве случаев заменяется на инструментальную диагностику (например, контроль вибрации, температуры и др.).

Сравнивая полученные результаты исследования с результатами, полученными другими авторами, можно отметить работу [14], где представлены фактические наблюдения по идентификации критических нарушений работоспособности нескольких взаимосвязанных судовых систем с использованием технологии искусственных нейронных сетей и гибридных методов моделирования.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы

1. Судовое оборудование нуждается в соответствующем техническом обслуживании, диагностике элементов механических систем, поддерживающем ремонте, проводимом по «состоянию», и техническом освидетельствовании в эксплуатации.
2. Выполненный анализ аварийных случаев и оценка показателей надежности судовых механических систем в процессе освидетельствования их технического состояния свидетельствуют о необходимости совершенствования в организации технологических процессов во внеэксплуатационный период. При этом жизненный цикл судового оборудования может увеличиваться с учетом их фактического состояния.
3. Порядок осуществления технического мониторинга обеспечивает управление на различных уровнях предприятий промышленности действующей информацией о техническом состоянии судов при принятии решения об их дальнейшей эксплуатации. Требуется выпуск положений по организации мониторинга технического состояния, которые необходимо учесть в нормативно-технических документах.
4. Для судов, эксплуатирующихся в полярных арктических водах, также необходимо использование методов оценки рисков выхода из строя механического оборудования, развитие системы оценки предупреждения отказов и т. п. Такие данные будут также способствовать развитию регламентов по техническому обслуживанию, ремонту и инструментальной диагностике, выполняемых морскими операторами в области арктического судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковтун Н. Л. Имитационный статистический анализ параметров технологических процессов на судах для прогнозирования надежности техники / Н. Л. Ковтун // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 215–225. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-215-225.
2. Ежов Ю. Е. Пути повышения эффективности технического обслуживания промышленного перегрузочного оборудования / Ю. Е. Ежов, А. К. Бардин, В. А. Сидоренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 113–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-113-120.
3. Кузнецов Р. В. Экспериментальное триботехническое исследование порошкового подшипника для судового машиностроения / Р. В. Кузнецов, Е. О. Ольховик // Морская радиоэлектроника. — 2020. — № 1 (71). — С. 52–55.
4. Клименко Н. П. Анализ отказов и оценка надежности центробежных насосов / Н. П. Клименко, В. В. Попов, А. С. Шаратов // Вестник Харьковского национального технического ун-та сельского хозяйства им. Петра Василенко. — 2015. — Вып. 143. — С. 147–151.
5. Мосейко Е. С. Исследование надежности судовых насосов по данным технического наблюдения / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 4. — С. 7–16. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-7-16.
6. Тормашев Д. С. Оценка технического состояния и прогнозирование функциональной надежности насосов систем судовых дизелей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Д. С. Тормашев. — Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2012. — 24 с.
7. Друзь И. Б. Безопасность функционирования судовых энергетических установок возрастных судов в зоне ответственности ДВУ Госморнадзора / И. Б. Друзь [и др.] // Вестник Инженерной школы Дальневосточного Федерального университета. — 2018. — № 4 (37). — С. 41–52. DOI: 10.5281/zenodo.2008657.
8. Темникова А. А. Анализ факторов риска эксплуатации дизельных ледоколов / А. А. Темникова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 1. — С. 42–50.
9. Fedi L. Mapping and analysis of maritime accidents in the Russian Arctic through the lens of the Polar Code and POLARIS system / L. Fedi, O. Fauray, L. Etienne // Marine Policy. — 2020. — Vol. 118. — Pp. 103984. DOI: 10.1016/j.marpol.2020.103984.

10. Todorov A. Russia's implementation of the Polar Code on the Northern Sea Route / A. Todorov // *The Polar Journal*. — 2021. — Vol. 11. — Is. 1. — Pp. 30–42. DOI: 10.1080/2154896x.2021.1911044.
11. International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/polar-code.aspx> (дата обращения: 06.01.2022).
12. Sun Z. The development of the Polar Code and challenges to its implementation / Z. Sun, R. Beckman // *Global Commons and the Law of the Sea*. — Brill Nijhoff, 2018. — Pp. 303–325. DOI: 10.1163/9789004373334_021.
13. Protection of the Arctic Marine Environment (PAME) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://pame.is/document-library/pame-reports-new/pame-ministerial-deliverables/2021–12th-arctic-council-ministerial-meeting-reykjavik-iceland/793-assr-1-the-increase-in-arctic-shipping-2013–2019/file> (дата обращения: 06.01.2022).
14. Lazakis I. Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks / I. Lazakis, Y. Raptodimos, T. Varelas // *Ocean Engineering*. — 2018. — Vol. 152. — Pp. 404–415. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.11.017.

REFERENCES

1. Kovtun, Nikolay L'vovich. "Simulation statistical analysis of parameters of engineering processes on vessels for prediction of reliability of equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 215–225. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-215-225.
2. Ezhov, Yuri E., Aleksey K. Bardin, and Vladimir A. Sidorenko. "The ways to improve the efficiency of industrial transshipping equipment maintenance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 113–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-113-120.
3. Kuznetsov, R. V., and E. O. Olkhovik. "Experimental tribotechnical study of powder bearing for marine engineering." *Marine Radio-electronics* 1(71) (2020): 52–55.
4. Klimentenko, N. P., V. V. Popov, and A. S. Sharatov. "Analiz otказov i otsenka nadezhnosti tsentrobezhnykh nasosov." *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo tekhnicheskogo un-ta sel'skogo khozyaistva im. Petra Vasilenko* 143 (2015): 147–151.
5. Moseyko, Evgeniy Sergeevich, and Evgeniy Olegovich Olkhovik. "Studying reliability of marine pump systems by using technical supervision data." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2021): 7–16. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-7-16.
6. Tormashev, D. S. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya i prognozirovaniye funktsional'noi nadezhnosti nasosov sistem sudovykh dizelei. Abstract of PhD diss. Novorossiisk: GMU im. adm. F. F. Ushakova, 2012.
7. Druz, Ivan, Igor Turishchev, Mihail Gomzyakov, and Oleg Moskalenko. "Safe operation of main power plants of aging ships as a subject of control and supervision by the far eastern directorate for state maritime supervision." *FEFU: School of Engineering Bulletin* 4(37) (2018): 41–52. DOI: 10.5281/zenodo.2008657.
8. Temnikova, Alyona Aleksandrovna. "Analysis of the risk factors of exploitation of diesel icebreakers." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2015): 42–50.
9. Fedi, Laurent, Olivier Faury, and Laurent Etienne. "Mapping and analysis of maritime accidents in the Russian Arctic through the lens of the Polar Code and POLARIS system." *Marine Policy* 118 (2020): 103984. DOI: 10.1016/j.marpol.2020.103984.
10. Todorov, Andrey. "Russia's implementation of the Polar Code on the Northern Sea Route." *The Polar Journal* 11.1 (2021): 30–42. DOI: 10.1080/2154896X.2021.1911044.
11. International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code). Web. 6 Jan. 2022. <<https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/polar-code.aspx>>.
12. Sun, Zhen, and Robert Beckman. "The development of the Polar Code and challenges to its implementation." *Global Commons and the Law of the Sea*. Brill Nijhoff, 2018. 303–325. DOI: 10.1163/9789004373334_021.
13. Protection of the Arctic Marine Environment (PAME). Web. 6 Jan. 2022 <<https://pame.is/document-library/pame-reports-new/pame-ministerial-deliverables/2021–12th-arctic-council-ministerial-meeting-reykjavik-iceland/793-assr-1-the-increase-in-arctic-shipping-2013–2019/file>>.
14. Lazakis, Iraklis, Y. Raptodimos, and T. Varelas. "Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks." *Ocean Engineering* 152 (2018): 404–415. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.11.017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мосейко Евгений Сергеевич —

инженер-технолог отдела технологии, экономики
производства, нормирования материалов
АО «Центральное конструкторское бюро
«Айсберг»

199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Большой пр., 36

e-mail: evgeniy-moseyko@mail.ru

Ольховик Евгений Олегович —

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Moseyko, Evgeniy S. —

Process Engineer of the Department of Technology,
Industrial Economy and Materials Rationing
“Iceberg”

Central Design Bureau

36 Bol'shoi Ave., St. Petersburg, 199034,
Russian Federation

e-mail: evgeniy-moseyko@mail.ru

Olhovik, Evgeniy O. —

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: olhovikeo@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 января 2022 г.

Received: January 11, 2022.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-129-139

MATHEMATICAL MODEL OF RANDOM PROCESSES OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

V. A. Dorovskoy, E. G. Zinchenko, K. S. Chernobai

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

The probabilistic-statistical description operates with the concepts and terms of probability theory and mathematical statistics, such as the mean value, variance or standard deviation, probability density, standard error. The purpose of the research is to build a mathematical model of random processes in automatic control systems. When modeling noise impacts, it is advisable to simulate noise as the normal white noise, which has a constant spectral density. The values of this spectral density can be obtained in practice from the spectrum of the random component of the control error and the complex transmission coefficients of the automatic control systems through the control and disturbance channels. As a result, the automatic control systems developer and the technologist are interested in the value of the root-mean-square control error. But to determine it, it is more convenient to use the spectral-temporal description of the automatic control systems. The peculiarity of noise (random processes) is that it is impossible to explicitly write down the dependence of their magnitude as a function of time, since the noise values change in different ways at each time interval. But you can specify some average values, named above, which give a fairly detailed idea of the noise as a whole. The noises often encountered in engineering practice are ergodic, such that the ensemble averaging coincides with the time averaging. Therefore, the statistical characteristics of such noises can be obtained by averaging their observed values over time.

Keywords: mathematical model, random processes, automatic control system.

For citation:

Dorovskoy, Vladimir A., Elena G. Zinchenko, and Kirill S. Chernobai. "Mathematical model of random processes of automatic control systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 129–139. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-129-139.

УДК 681.5

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В СТРУКТУРЕ СЭУ

В. А. Доровской, Е. Г. Зинченко, К. С. Чернобай

Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь, Российская Федерация

Целью исследования является построение математической модели случайных процессов систем автоматического регулирования. Отмечается, что при моделировании шумовых воздействий полезной является модель шума в виде нормального белого шума, имеющая постоянную спектральную плотность. Значения этой спектральной плотности можно получить на практике по спектру случайной составляющей ошибки регулирования и комплексным коэффициентам передачи системы автоматического регулирования по каналам управления и возмущения. В итоге разработчика системы автоматического регулирования и технолога интересует значение среднеквадратической ошибки регулирования, для определения которой удобнее пользоваться спектрально-временным описанием системы автоматического регулирования. Подчеркивается, что особенность шумов (случайных процессов) состоит в том, что записать в явном виде зависимость их величины как функции времени невозможно, поскольку на каждом временном интервале значения шума изменяются различным образом, однако можно указать некоторые усредненные значения, дающие достаточно подробное представление о шуме в целом. Акцентируется внимание на том, что часто

встречающиеся в инженерной практике шумы являются эргодическими, т. е. такими, у которых усреднение по ансамблю совпадает с усреднением по времени. Поэтому статистические характеристики таких шумов можно получить при помощи усреднения по времени их наблюдаемых значений.

Ключевые слова: математическая модель, случайные процессы, система автоматического регулирования.

Для цитирования:

Доровской В. А. Математическая модель случайных процессов систем автоматического регулирования в структуре СЭУ / В. А. Доровской, Е. Г. Зинченко, К. С. Чернобай // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 129–139. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-129-139.

Введение (Introduction)

Вероятностно-статистическое описание оперирует понятиями и терминами теории вероятностей и математической статистики, такими как среднее значение, дисперсия или стандартное отклонение, плотность вероятности и среднеквадратическая ошибка. Детерминированный (определенный) сигнал представляет собой достаточно гладкий сигнал, значение которого известно или можно с некоторой точностью предсказать на некоторый интервал времени вперед и его поведение аналогично поведению идентичного сигнала в течение определенного промежутка времени. Это может быть полностью известный заранее сигнал (например, синусоидальный) с заданными частотой, амплитудой и начальной фазой или ступенчатый с известным моментом времени, когда происходит его изменение с определенной величиной ступени, и др. Шум представляет собой случайное изменение некоторой физической величины.

Предсказать значение шума даже на небольшой интервал вперед можно только с некоторой степенью вероятности и то не всегда. Аддитивная помеха — это шум, прибавляющийся, например, посредством механизма *принципа суперпозиции*, к детерминированному сигналу, несущему информацию, и искажающий его. Шумы (случайные процессы) описываются двумя взаимно связанными, но, на первый взгляд, существенно отличающимися способами: это спектрально-временное описание и вероятностно-статистическое описание шумов [1]–[3].

Спектрально-временное описание, основанное на наблюдении поведения шума, с течением времени ориентировано на определении таких характеристик случайного процесса, как средняя мощность, корреляционная функция и спектральная плотность. Вероятностно-статистическое описание оперирует понятиями и терминами теории вероятностей и математической статистики, такими как среднее значение, дисперсия или стандартное отклонение, плотность вероятности, среднеквадратическая ошибка.

Целью исследования является построение математической модели случайных процессов систем автоматического регулирования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Спектрально-временное описание шумов. Наглядным представлением поведения шума с течением времени является осциллограмма (рис. 1). Значения шума первого источника изменяются сравнительно быстро, второго источника медленнее, а третьего еще медленнее. Четвертый источник выдает сигнал с медленно и в небольших пределах изменяющимися по случайному закону частотой, амплитудой и начальной фазой, близкий к синусоидальному, поэтому он называется *узкополосным*.

Сигналы первых трех источников шума получены фильтрацией нормального белого шума НЧ фильтрами Баттерворта 2-го порядка с усилением, равным единице, и полосами пропускания 100 рад/с, 10 рад/с и 5 рад/с. Узкополосный шум получен пропусканием белого нормального шума через колебательное звено с постоянной времени, равной 0,5 с, и декрементом затухания, равным $7,07 \cdot 10^{-4}$, или (что то же самое) с резонансной частотой 2 рад/с и высокой добротностью, равной 1414.

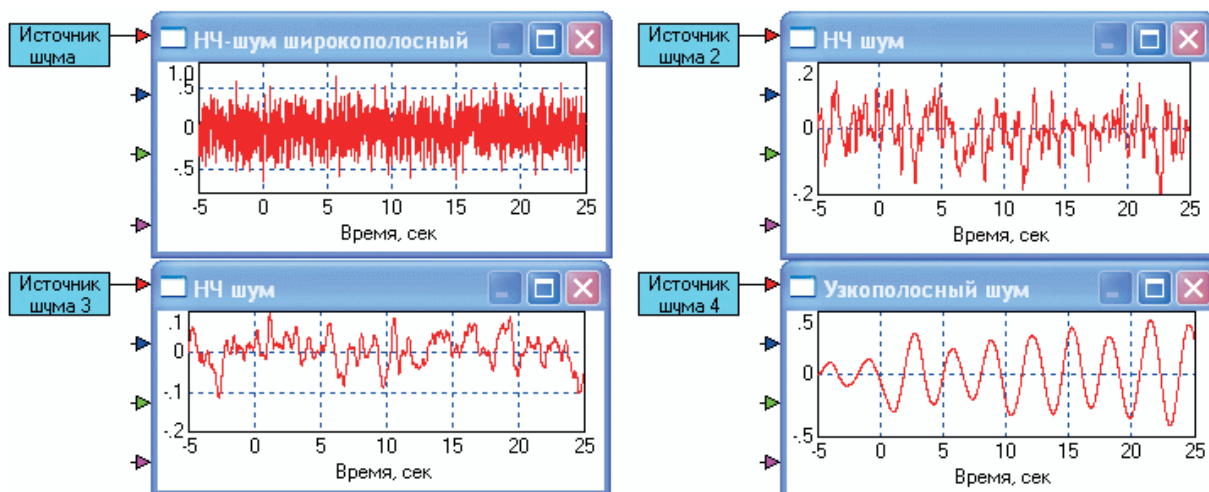


Рис. 1. Примеры осциллограмм узкополосного (источник 4) и низкочастотных шумов

Как видно, осциллограмма позволяет приблизительно оценить максимальные значения шумов, а также характерное время их изменения, хоть и весьма приблизительно [4]–[7]. Следует отметить, что на осциллограммах приведены так называемые *конкретные реализации шумов*, которые на другом интервале времени будут выглядеть похоже, но все-таки иначе. Важной численной оценкой шума является его мощность, которая не зависит от конкретной наблюдаемой реализации шума. Мощность шума вычисляется как среднее за достаточно длительный период наблюдения от квадрата шума. Именно по такой формуле вычисляется средняя мощность любого, в том числе шумового напряжения на сопротивлении величиной 1 Ом:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt. \quad (1)$$

Мощность шума, если он представляет собой электрическую величину, можно измерить ваттметром (рис. 2).

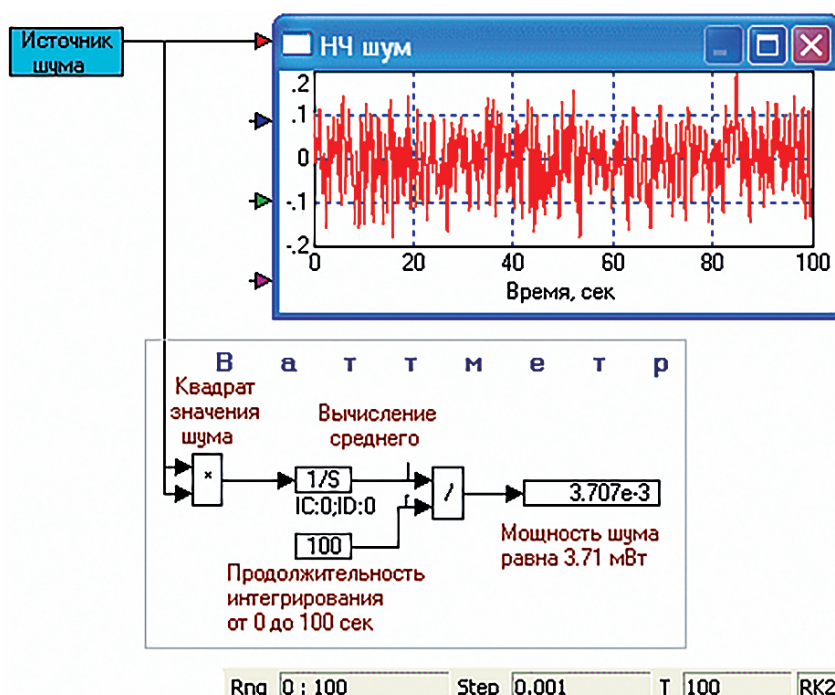


Рис. 2. Измерение мощности шума моделью ваттметра

Мощность шумов следует понимать в обобщенном смысле. Если управляемой величиной являются электрические напряжение или ток, то это традиционная мощность. Однако, если, например, управляемой величиной является температура, то термин «мощность» может употребляться здесь только в том смысле, что ее значение вычисляется как среднее за некоторый период времени от квадрата значений шумов температуры.

Взаимосвязь отстоящих по времени значений шума можно описать так называемой *автокорреляционной функцией* $B(\tau)$:

$$B(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \eta(t) \eta(t - \tau) dt, \quad (2)$$

где $\eta(t)$ — реализация случайного процесса;

$\eta(t - \tau)$ — смещенная по времени на величину τ копия реализации случайного процесса;

T — достаточно протяженный временной интервал, на котором проявляются все основные особенности шума.

Смысл корреляционной функции состоит в том, что среднее значение определяется за достаточно большой интервал времени от произведения сигнала и его копии, смещенных по времени на некоторую величину. Когда смещение равно нулю, то корреляционная функция равна средней мощности шума. Пока смещение сравнительно мало, корреляционная шума функция убывает с его ростом, а при больших значениях смещения, когда теряется корреляция между значениями шума и его смещенной копии, корреляционная функция близка к нулю. Покажем на рис. 3 получение корреляционной функции на примере детерминированного сигнала, для которого она может быть вычислена так же, как для случайного [5], [7]–[9].

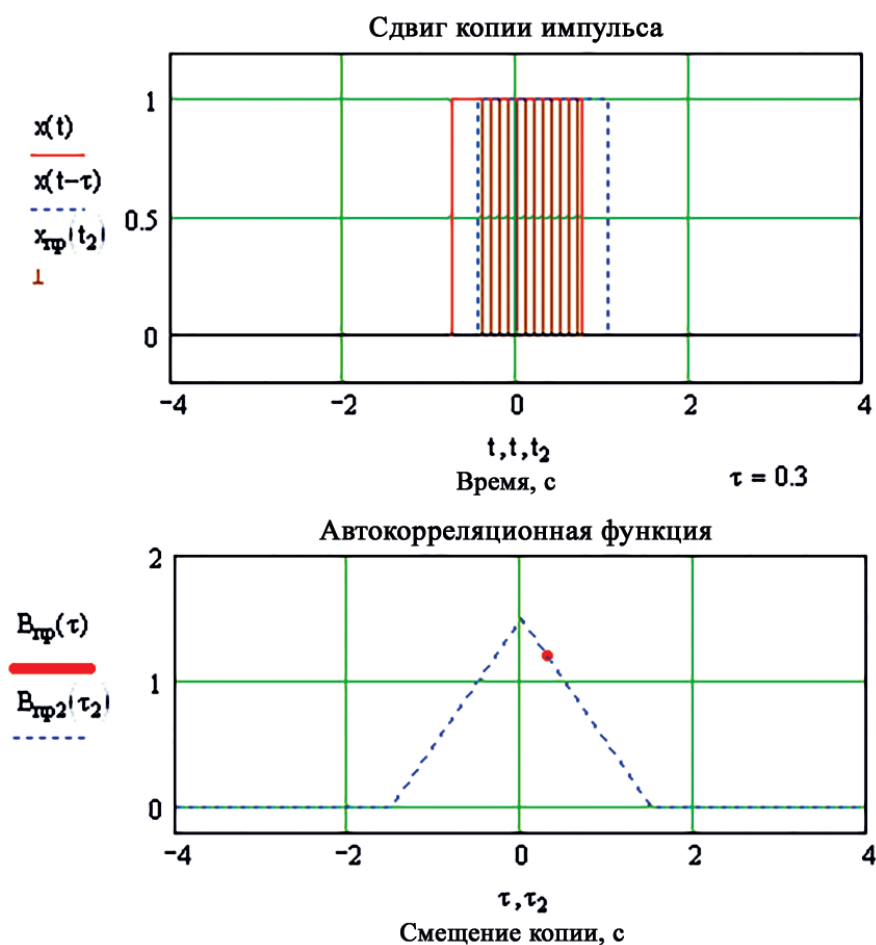


Рис. 3. Вычисление корреляционной функции прямоугольного импульса с амплитудой, равной единице, и длительностью 1,5 с

Значение корреляционной функции равно площади перекрытия импульсов, так как их амплитуды равны единице, следовательно, оно растет и убывает по линейному закону при изменении величины смещения. Значение корреляционной функции в нуле равно энергии сигнала, поскольку оно равно интегралу от квадрата амплитуды импульса, а деленное на длительность импульса дает его мощность [9], [10]. Автокорреляционная функция выходного сигнала источника шума, осциллограмма которого приведена на рис. 1, имеет вид рис. 4.

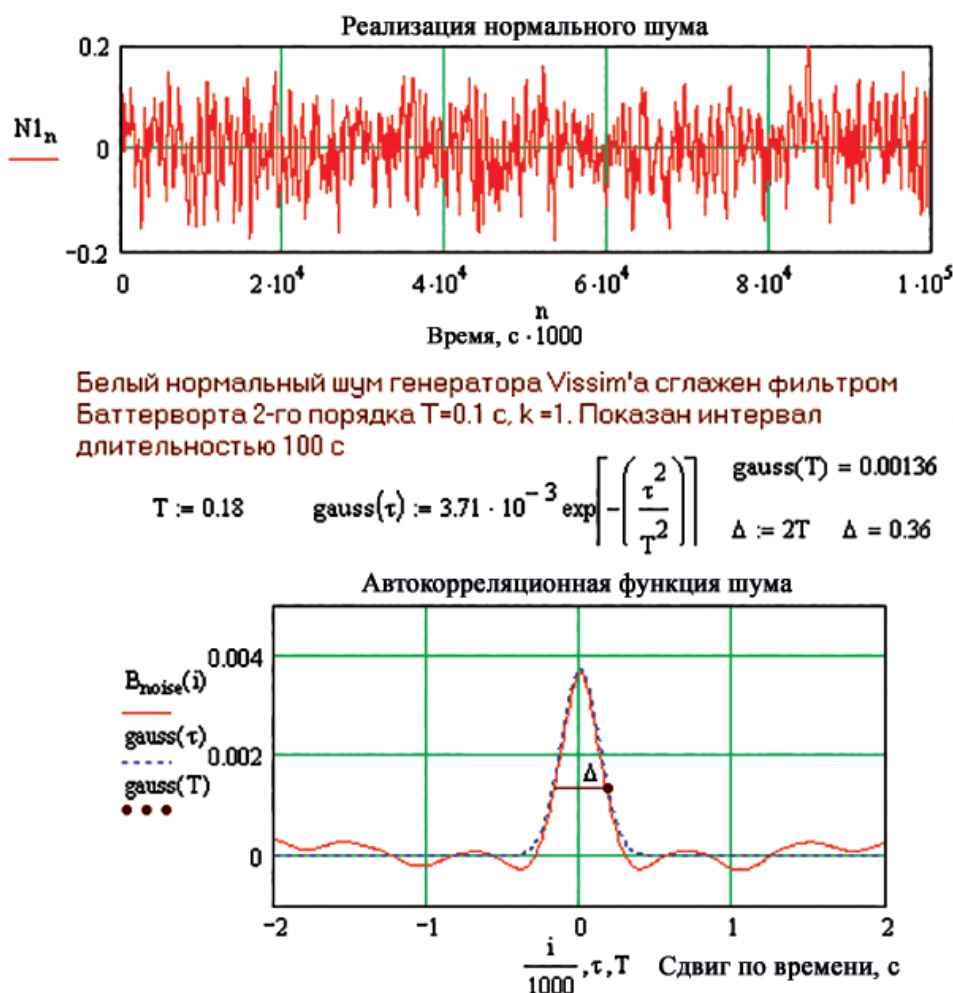


Рис. 4. Автокорреляционные функции:
а — реальной выборки шума (красная линия);
б — идеального нормального гауссова шума (синий пунктир)

Значение корреляционной функции в нуле равно мощности шума. Ширина корреляционной функции — это условная величина, которая может быть определена, например, на уровне, когда значение корреляционной функции уменьшается по сравнению с максимальным в e раз (или в 2 раза). Для вычисления автокорреляционной функции шума, приведенного на рис. 4, было использовано 100 000 его отсчетов, взятых на интервале, равном 100 с. Как видно из данного рисунка, при этом значения корреляционной функции за пределами пика не равны нулю, а имеют некоторые, значительно меньшие, чем максимум, ненулевые значения.

Корреляционная функция идеального гауссова шума условно вычисляется на бесконечном интервале интегрирования. Автокорреляционная функция шума характеризует интервал, на котором шум еще «помнит» о своем предыдущем поведении. Ширина Δ функции определяет интервал этой «памяти». Преобразование Фурье автокорреляционной функции дает его энергетический спектр, т. е. спектральную плотность шума [11]–[13].

$$\text{gauss}(\tau) \text{ fourier, } \tau \rightarrow 1.1836446816347036030 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-8.100000000000000000 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2)$$

$$S(\omega) := 1.18364468 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-8.10 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2)$$

$$\omega_0 := \frac{1.7}{T} \quad \omega_0 = 9.44444$$

$$S(0) = 0.00118 \quad S(\omega_0) = 0.00057$$

$$P := \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{50} S(\omega) d\omega$$

$$P = 0.00371$$

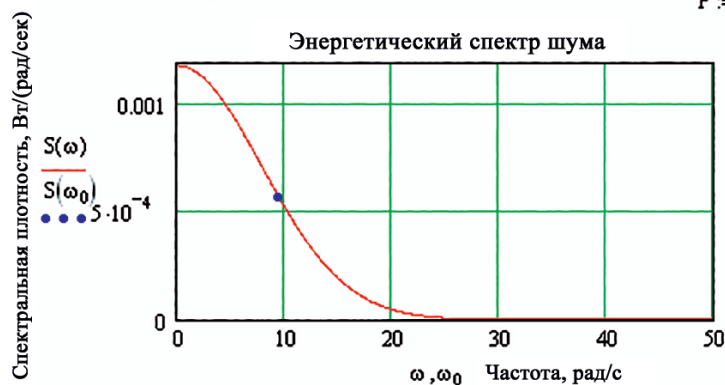


Рис. 5. Энергетический спектр (спектральная плотность) низкочастотного шума

Ширина спектра НЧ шумов разного вида обратно пропорциональна ширине автокорреляционной функции с коэффициентом порядка единицы (рис. 5). Его ширина обратно пропорциональна ширине автокорреляционной функции шума, а интеграл от спектральной плотности равен мощности шума. Ширина спектра обычно определяется на уровне, равном половине максимального значения спектра. Мощность шума может быть найдена интегрированием спектральной плотности по частоте (равенство Парсевал).

Выполним сравнение значения интеграла $P = 0,00371$ с результатом измерения, выполненного ваттметром, приведенного на рис. 2. Белый шум — удобная математическая модель для описания шумовых воздействий на САР, в том числе шумов в задании и возмущении, спектральная плотность которого постоянна на всех частотах, т. е. модель шума описывается всего одним параметром — спектральной плотностью N_0 .

На практике всегда можно взять достаточно широкополосный шум, спектр которого значительно шире полосы пропускания системы, на которую подается шум. При этом реальный шум можно считать белым (рис. 6). В данном случае спектральная плотность на всех частотах одинакова.

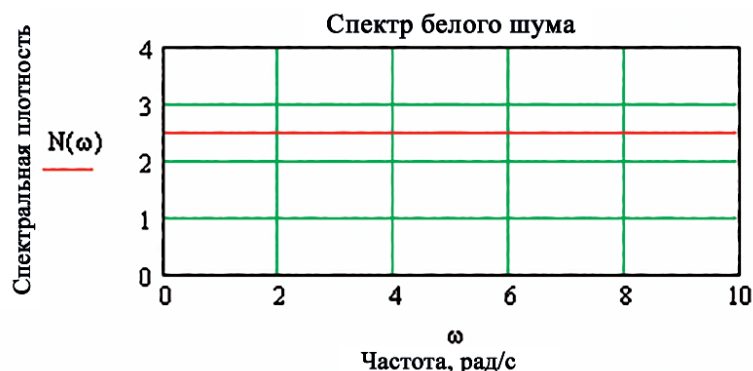


Рис. 6. Энергетический спектр (спектральная плотность) белого шума

Это значение показывает, какая мощность содержится в полосе частот, равной 1 рад/с [Вт/(рад/с)]. Временную модель белого шума можно представить себе в виде «тесной» последовательности дельта-функций, имеющих разные площади и знаки. Корреляционная функция белого шума представляет собой дельта-функцию, умноженную на величину спектральной плотности:

$$N(\omega) := N; N(\omega) \text{ invfourier}, \omega \rightarrow N \cdot \text{Dirac}(t). \quad (3)$$

Таким образом, корреляционная функция показывает, насколько быстро изменяются значения шума с течением времени. Мощность шума характеризует максимальное значение его автокорреляционной функции. Спектральная плотность шума характеризует его быстроту изменения с течением времени и мощность.

Ошибки слежения. Весьма значимым для понимания механизма влияния шумов на функционирование системы автоматического регулирования (САР) является случай аддитивных помех в сигнале задания. Причины таких помех многочисленны, в частности ими могут быть шумы каналов связи, по которым задание передается к САР. Рассмотрим две одинаковые САР, имеющие разные коэффициенты усиления контура (рис. 7). Нижняя САР (синяя переходная функция) имеет в пять раз меньшее быстродействие, чем верхняя.

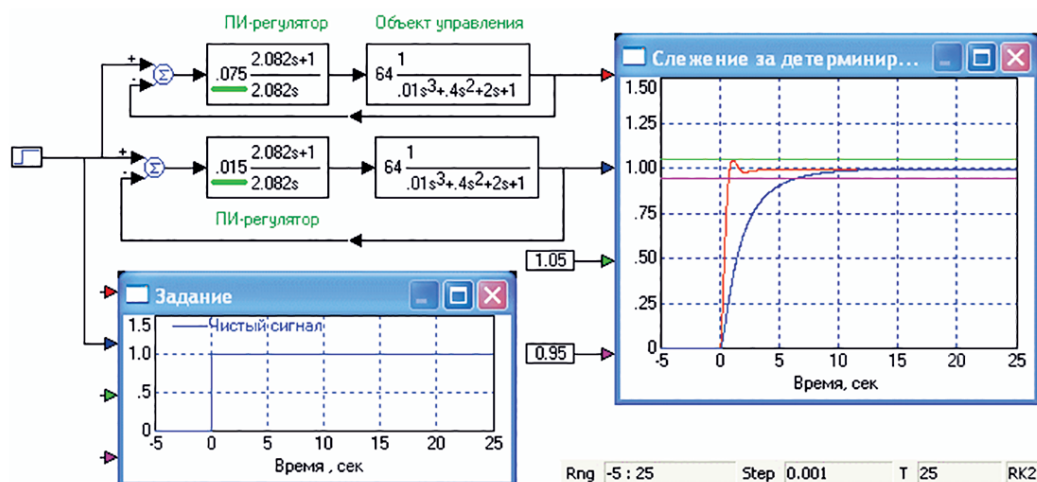


Рис. 7. Реакция САР на детерминированный, ступенчатый сигнал

В отсутствие шумов в задании качество верхней САР лучше, поскольку ее быстродействие выше в пять раз. Однако при наличии шумов картина поведения САР в установившемся режиме меняется (рис. 8).

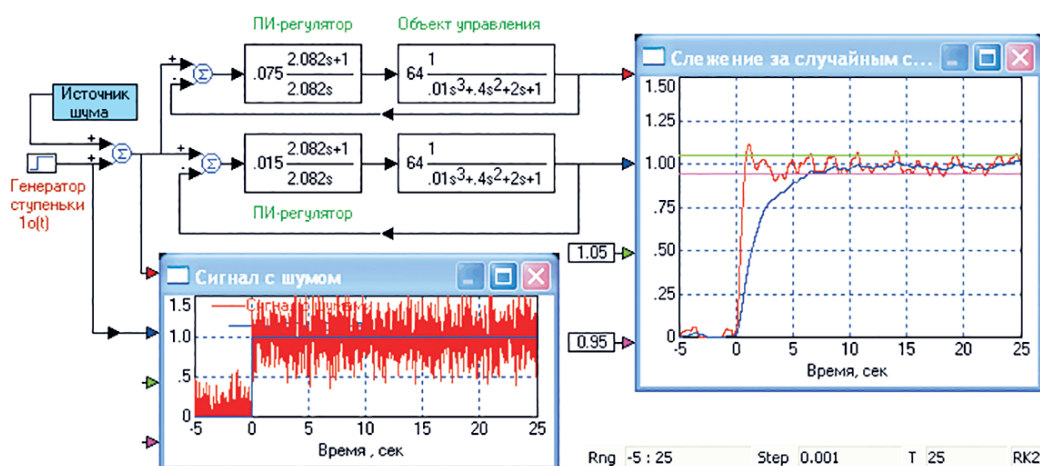


Рис. 8. Реакция САР на детерминированный ступенчатый сигнал, отягощенный шумами

Видно, что шумы на входе очень велики, их выбросы имеют тот же порядок, что и величина отслеживаемого сигнала. Шумы существенно сглаживаются системами автоматического регулирования, которые в данном случае можно рассматривать как фильтры нижних частот, причем

ошибки в установившемся режиме нижней, более инерционной САР, меньше. Увеличение времени наблюдения показывает, что иногда появляются особенно большие выбросы ошибок. Более инерционная САР в данном случае является более предпочтительной в отношении точности слежения, но это достигается ценой уменьшения в пять раз быстродействия.

Шумы приводят к случайным блужданиям управляемой величины, причем у более быстродействующей, более широкополосной верхней САР, эти блуждания имеют больший диапазон, чем у нижней, более медленной, инерционной. Быстрая САР успевает отслеживать и относительно быстрые компоненты шума, а медленная, более инерционная САР — не успевает, сглаживает их. Эти случайные блуждания управляемой величины и есть абсолютные значения ошибок слежения. Отметим, что шумы в задании зачастую на практике могут быть отфильтрованы еще до подачи задания на САР, причем технология может позволить использовать для этого значительно более узкополосный, по сравнению с САР, фильтр. Это также является одной из причин, объясняющей, почему задача стабилизации, т. е. компенсации влияния шумов в возмущении на управляемую величину, является более значимой на практике, чем задача слежения за заданием на фоне аддитивного шума [5], [9], [14].

Ошибки стабилизации. В практике управления технологическими объектами более значимой является задача стабилизации, при которой САР компенсирует влияние возмущения и его случайных изменений на управляемую величину. Зачастую возмущение является случайной величиной, поскольку оно определяется рядом непредсказуемых и случайных факторов. На рис. 9 показана связь быстродействия САР и ее способность компенсировать влияние возмущений шумового характера на управляемую стабилизируемую величину (верхняя САР осуществляет стабилизацию с меньшими ошибками (синяя линия), чем более инерционная нижняя САР (красная линия), хотя выигрыш в точности и невелик).

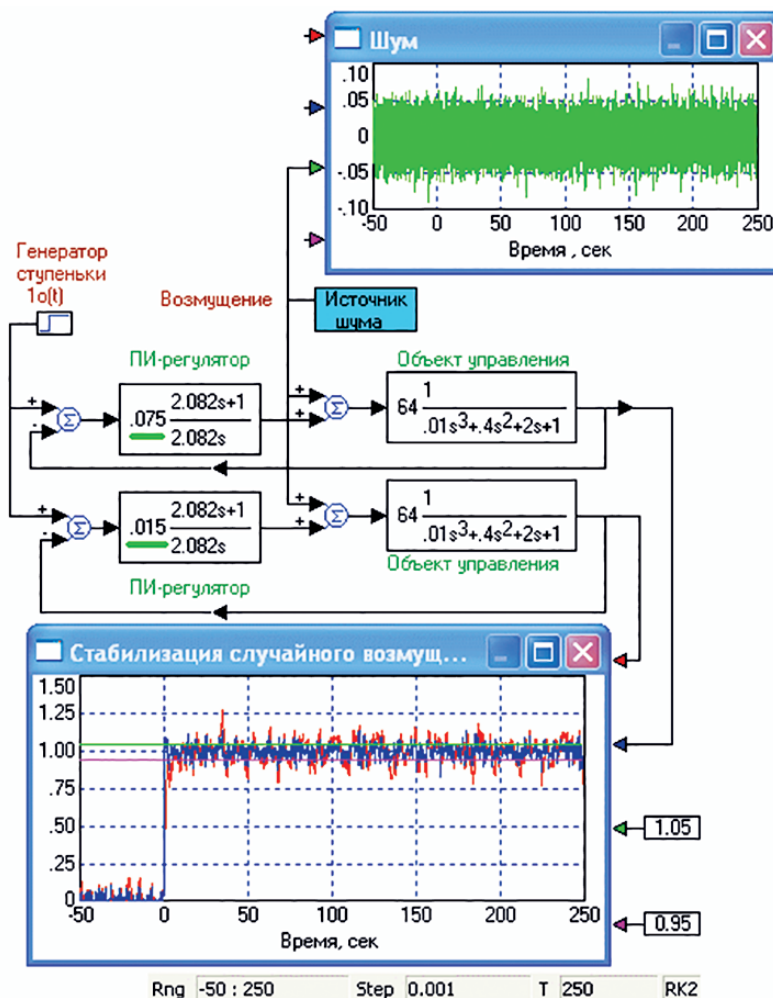


Рис. 9. Верхняя САР, имеющая большее быстродействие

Как видно, в отношении стабилизации ситуация обратная. Быстрая САР успевает погасить, компенсировать большую часть шумов, в отличие от медленной инерционной САР, поэтому ее ошибки стабилизации больше по величине, чем быстрой САР. Таким образом, для повышения качества слежения за сигналом задания, отягощенном аддитивными шумами, следует сужать полосу пропускания САР с управлением по отклонению, уменьшать ее быстродействие, в то время как для повышения качества САР в режиме стабилизации в условиях наличия шумовой составляющей в возмущении следует увеличивать ее быстродействие. Следовательно, при проектировании САР, если задание и возмущение сопровождаются шумами, приходится находить разумный компромисс при выборе оптимального быстродействия.

Переход к комбинированной САР с управлением по отклонению и возмущению существенно улучшает качество стабилизации [15] (рис. 10). Комбинированная САР компенсирует случайные изменения возмущения значительно лучше.

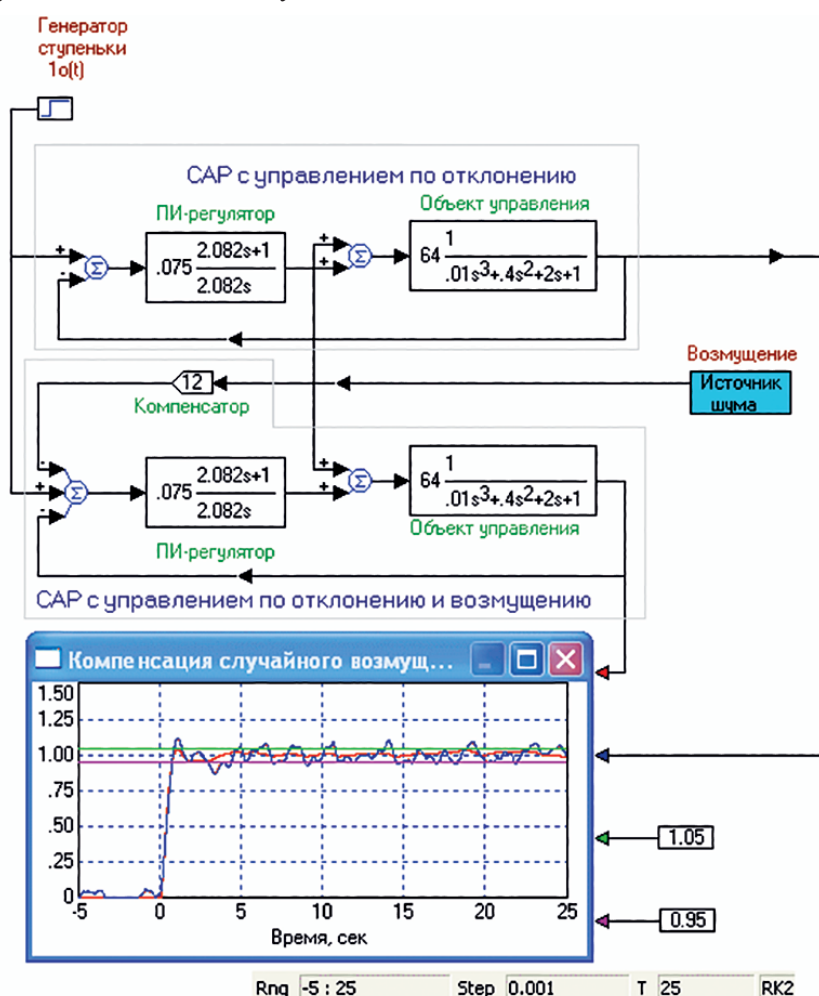


Рис. 10. САР с управлением по отклонению и САР с комбинированным управлением по отклонению и возмущению в режиме слежения и стабилизации

Заключение (Conclusion)

Целью математического описания реакции САР на случайные воздействия является оценка точности слежения и стабилизации, а также выработка мер по минимизации ошибок регулирования, обусловленных шумами. В первом приближении инженера интересуют всего несколько величин, достаточно просто и в то же время подробно характеризующих влияние шумов на САР. Это прежде всего мощность шумов на выходе САР. Квадратный корень из мощности шумов дает один из главных показателей качества САР — среднеквадратическую ошибку регулирования, которая

характеризует диапазон, в котором будет находиться реальная ошибка в процессе регулирования с известной вероятностью.

Мощность шумов следует понимать в обобщенном смысле. Если управляемой величиной являются электрические напряжение или ток, то это традиционная мощность. Но, если, например, управляемой величиной является температура, то термин «мощность» может употребляться здесь только в том смысле, что ее значение вычисляется как среднее за некоторый период времени от квадрата значений шумов температуры. Кроме того, разработчика и технолога может интересовать скорость изменения ошибок регулирования. Например, для сравнительно широкополосных шумов в управляемой величине каждую секунду в течение времени, равном 0,001 с, ошибка превышает допустимые пределы, а остальное время она находится в этих пределах. Для медленных шумов ошибка может даже заметно не измениться за одну секунду. Поэтому в данном случае следует сделать вывод о том, например, что в течение одной секунды из тысячи ошибок выходит за допустимые пределы, а остальное время остается допустимой. Скорость изменения во времени ошибки регулирования может характеризоваться либо шириной автокорреляционной функцией выходных шумов, т. е. случайных блужданий управляемой величины, либо шириной их спектра.

При моделировании шумовых воздействий полезной является модель шума в виде нормального белого шума, имеющая постоянную спектральную плотность, значения которой можно получить на практике по спектру случайной составляющей ошибки регулирования и комплексным коэффициентам передачи САР по каналам управления и возмущения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин [и др.]. — М.: Наука, 1970. — 392 с.
2. Петров К. Э. Компараторная структурно-параметрическая идентификация моделей скалярного многофакторного оценивания / К. Э. Петров, В. В. Крючковский. — Херсон: Олди-плюс, 2009. — 294 с.
3. Павловский Ю. Н. Теория факторизации и декомпозиции управляемых динамических систем и ее приложения / Ю. Н. Павловский // Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика. — 1984. — № 2. — С. 45–57.
4. Павлов В. В. Начала теории эргатических систем / В. В. Павлов. — Киев: Наукова думка, 1975. — 240 с.
5. Овезгельдыев А. О. Синтез и идентификация моделей многокритериального оценивания и оптимизации / А. О. Овезгельдыев, Э. Г. Петров, К. Э. Петров. — К.: Наукова думка, 2002. — 163 с.
6. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р. Р. Ягера. — М.: Радио и связь, 1986. — 409 с.
7. Пивкин В. Я. Нечеткие множества в системах управления / В. Я. Пивкин, Е. П. Бакулин, Д. И. Кореньков; под ред. Ю. Н. Золотухина. — М.: Fuzzy Technologies Lab, 1999. — 176 с.
8. Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений / В. О. Никифоров. — СПб.: Наука, 2003. — 282 с.
9. Нариньяни А. С. Недоопределенность в системе представления и обработки знаний / А. С. Нариньяни // Техническая кибернетика. — 1986. — № 5. — С. 3–28.
10. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. — М.: Мир, 1973. — 332 с.
11. Лоскутов А. Ю. Основы теории сложных систем / А. Ю. Лоскутов, А. С. Михайлов. — М.: НИЦ «Регулярная и стохастическая динамика», 2007. — 620 с.
12. Аронсон Э. Теория диссонанса: прогресс и проблемы / Э. Аронсон // Современная зарубежная социальная психология. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — С. 111–126.
13. Osadchiy A. Signal Processing Algorithm Based on Discrete Wavelet Transform / A. Osadchiy, A. Kamenev, V. Saharov, S. Chernyi // Designs. — 2021. — Vol. 5. — Is. 3. — Pp. 41. DOI: 10.3390/designs5030041.
14. Kramar V. Analysis Technology and Cathodic Protection for Hull Structures of Ships and Floating Facilities / V. Kramar, A. Rodkina, O. Ivanova, S. Chernyi, A. Zinchenko // Inventions. — 2021. — Vol. 6. — Is. 4. — Pp. 74. DOI: 10.3390/inventions6040074.
15. Zhilenkov A. Application of Artificial Intelligence Technologies to Assess the Quality of Structures / A. Zhilenkov, S. Chernyi, V. Emelianov // Energies. — 2021. — Vol. 14. — Is. 23. — Pp. 8040. DOI: 10.3390/en14238040.

REFERENCES

1. Pontryagin, L. S., et al. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov*. M.: Nauka, 1970.
2. Petrov, K.E., and V. V. Kryuchkovskii. *Komparatornaya strukturno-parametricheskaya identifikatsiya modelei ska-lyarnogo mnogofaktornogo otsenivaniya*. Kherson: Oldi-plyus, 2009.
3. Pavlovskii, Yu. N. "Teoriya faktorizatsii i dekompozitsii upravlyaemykh dinamicheskikh sistem i ee prilozheniya." *Engineering Cybernetics* 2 (1984): 45–57.
4. Pavlov, V. V. *Nachala teorii ergaticheskikh sistem*. Kiev: Naukova dumka, 1975.
5. Ovezgel'dyev, A.O., E. G. Petrov, and K. E. Petrov. *Sintez i identifikatsiya modelei mnogokriterial'nogo otsenivaniya i optimizatsii*. K.: Naukova dumka, 2002.
6. Yager, R. R., ed. *Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostei. Poslednie dostizheniya*. M.: Radio i svyaz', 1986.
7. Pivkin, V. Ya., E. P. Bakulin, and D. I. Koren'kov. *Nechetkie mnozhestva v sistemakh upravleniya*. Edited by Yu. N. Zolotukhin. M.: Fuzzy Technologies Lab, 1999.
8. Nikiforov, V. O. *Adaptivnoe i robustnoe upravlenie s kompensatsiei vozmushchenii*. SPb.: Nauka, 2003.
9. Narin'yani, A. S. "Nedopredelennost' v sisteme predstavleniya i obrabotki znaniy." *Tekhnicheskaya kibernetika* 5 (1986): 3–28.
10. Mesarovic, M., D. Macko, and Y. Takahara. *Theory of hierarchical multilevel systems*. Academic Press New York and London, 1970.
11. Loskutov, A. Yu., and A. S. Mikhailov. *Osnovy teorii slozhnykh sistem*. M.: NITs «Regulyarnaya i stokhasticheskaya dinamika», 2007.
12. Aronson, E. "Dissonance theory: Progress and problems." *Theories of cognitive consistency: A sourcebook*. Edited by R. P. Abelson, E. Aronson, W. J. McGuire, T. M. Newcomb, M. J. Rosenberg, and P. H. Tannenbaum. Chicago, IL: Rand McNally, 1968. 5–27.
13. Osadchiy, Andrey, Aleksandr Kamenev, Vladimir Saharov, and Sergei Chernyi. "Signal Processing Algorithm Based on Discrete Wavelet Transform." *Designs* 5.3 (2021): 41. DOI: 10.3390/designs5030041.
14. Kramar, Vadim, Anna Rodkina, Olga Ivanova, Sergei Chernyi, and Anton Zinchenko. "Analysis Technology and Cathodic Protection for Hull Structures of Ships and Floating Facilities." *Inventions* 6.4 (2021): 74. DOI: 10.3390/inventions6040074.
15. Zhilenkov, Anton, Sergei Chernyi, and Vitalii Emelianov. "Application of Artificial Intelligence Technologies to Assess the Quality of Structures." *Energies* 14.23 (2021): 8040. DOI: 10.3390/en14238040.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Доровской Владимир Алексеевич — доктор технических наук, профессор Керченский государственный морской технологический университет 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: esiap@mail.ru

Зинченко Елена Геннадьевна — инженер Керченский государственный морской технологический университет 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: eltel85@bk.ru

Чернобай Кирилл Сергеевич — аспирант Научный руководитель: Доровской Владимир Алексеевич Керченский государственный морской технологический университет 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: aspirantchernobai@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dorovskoy, Vladimir A. — Dr. of Technical Sciences, professor Kerch State Maritime Technological University 82 Ordzonikidze Str., Kerch, 298309, Russian Federation
e-mail: esiap@mail.ru

Zinchenko, Elena G. — Engineer Kerch State Maritime Technological University 82 Ordzonikidze Str., Kerch, 298309, Russian Federation
e-mail: eltel85@bk.ru

Chernobai, Kirill S. — Postgraduate Supervisor: Dorovskoy, Vladimir A. Kerch State Maritime Technological University 82 Ordzonikidze Str., Kerch, 298309, Russian Federation
e-mail: aspirantchernobai@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22 января 2022 г.
Received: January 22, 2022.

DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODEL OF A DC VOLTAGE SOURCE BASED ON A CAPACITIVE STORAGE

S. Yu. Trudnev, A. A. Marchenko

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

The operation of capacitive electronic storage devices of high power density in the discharge mode through a booster voltage regulator is discussed in the paper. This technical solution is proposed as a separate DC voltage source, which allows it to be used in the autonomous systems that have an alternative way of generating energy. The various booster voltage stabilizers operation, the basis of which is transistor switches, is also analyzed. The features of a step-up voltage regulator operation and the shortcomings of various circuit solutions for stabilizing the output voltage on pulsed sources are determined. The element base of the proposed circuit solution is considered in detail and the physical relationship between the elements of the circuit is described. A technical solution for the joint operation of a capacitive power source of high power density through a switching voltage stabilizer is proposed. A mathematical model of a capacitive electric energy storage device and a step-up voltage regulator based on transistor switches has been developed. Based on the mathematical model, a simulation model of the proposed system was developed and studied in the MATLAB modeling environment. The characteristics of the output voltage dependence on the operating time, as well as the load current, are investigated. The positive effect of the source and the voltage stabilizer joint work on the active load is revealed. Recommendations on the use of such systems are given. Generalized conclusions concerning the conducted research are made.

Keywords: capacitive storage, voltage stabilizer, filling factor, simulation, inductor, key, model, electrical energy.

For citation:

Trudnev, Sergey Yu., and Aleksey A. Marchenko. "Development of a computer model of a DC voltage source based on a capacitive storage device." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 140–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-140-149.

УДК 621.3

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ

С. Ю. Труднев, А. А. Марченко

ФГБОУ ВО «КамчатГТУ», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

В статье рассмотрена работа емкостных электронных накопителей высокой удельной мощности в режиме разряда через бустерный стабилизатор напряжения. Данное техническое решение предложено в виде отдельного источника постоянного напряжения, позволяющего применять его в автономных системах, имеющих альтернативный способ получения энергии. Проанализирована также работа различных бустерных стабилизаторов напряжения, основу работы которых составляют транзисторные ключи. Определены особенности работы повышающего стабилизатора напряжения и недостатки различных схемных решений по стабилизации выходного напряжения на импульсных источниках. Подробно рассмотрена элементная база предложенного схемного решения и описана физическая взаимосвязь между элементами схемы. Предложено техническое решение совместной работы емкостного источника питания высокой удельной мощности через импульсный стабилизатор напряжения. Разработана математическая модель емкостного накопителя электрической энергии и повышающего стабилизатора напряжения на базе транзисторных ключей. На основании математической модели разработана и исследована имитационная модель предложенной системы в среде моделирования MATLAB. Исследованы характеристики зависимости выходного напряжения от времени работы, а также ток нагрузки. Выявлен положительный эффект совместной работы источника и стабилизатора напряжения на активную

нагрузку. Даны рекомендации по применению таких систем. Сделаны обобщенные выводы, касающиеся проведенного исследования.

Ключевые слова: емкостной накопитель, стабилизатор напряжения, скважность, моделирование, дроссель, ключ, модель, электрическая энергия.

Для цитирования:

Труднев С. Ю. Разработка компьютерной модели источника постоянного напряжения на основе емкостного накопителя / С. Ю. Труднев, А. А. Марченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 140–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-140-149

Введение (Introduction)

Накопители электрической энергии имеют большое количество модификаций: от бумажных конденсаторов до полимерных аккумуляторов. В течение последних 20 лет спрос на автономные устройства (мобильные телефоны, планшеты, ноутбуки, альтернативные источники) значительно вырос, в связи с этим накопители электрической энергии претерпели большие изменения не только по параметрам емкости, массы, габаритов, но и по конструкции, а также по исполнению. До сих пор происходит модернизация накопителей, поскольку возможности автономных потребителей растут, а значит, растет их энергопотребление и, соответственно, разрабатываются все новые и новые накопители электрической энергии с увеличенной удельной мощностью и емкостью [1]–[4]. Одним из таких источников являются современные суперконденсаторы. Модификаций суперконденсаторов насчитывается большое количество: от бумажных до электролитических, но сопоставляя их с широко применяемой аккумуляторной батареей (данные приведены в таблице), можно сделать вывод о том, что суперконденсаторы занимают промежуточное значение.

Сравнительная характеристика накопителей

Параметры	Традиционные конденсаторы	Суперконденсаторы	Аккумуляторные батареи
1. Постоянная времени разряда RC , с	Менее 0,1	0,1 ... 10	Сотни и тысячи
2. Удельная энергия, кДж/кг	До 0,5 (обычно 0,1 ... 0,2)	0,5 ... 70	> 100
3. Удельная мощность, кВт/кг	Десятки (в пиковом режиме)	До 17 (пиковая — 0,8 ... 2)	0,1 ... 0,5
4. Срок службы циклов, заряд–разряд	Млн	Млн	До 2000

Традиционные конденсаторы не накапливают достаточного количества энергии для того, чтобы обеспечить даже в небольшие промежутки времени маломощный потребитель, ввиду небольшой емкости и высоких токов саморазряда. Несмотря на то, что аккумуляторные батареи обладают высокой емкостью и низким саморазрядом, они имеют ограниченное количество циклов заряд–разряд и невысокую удельную мощность. Исходя из этого можно предположить целесообразность применения суперконденсаторов в качестве источников питания.

Однако стабильная работа потребителей зависит непосредственно от параметров выходного напряжения источника, от которого они работают [5]–[7]. Суперконденсатор относится к классу накопителей с высокой удельной мощности и в режиме разряда ток на нем необходимо ограничивать. Недостатком является спадающее выходное напряжение, поэтому для того, чтобы обеспечить суперконденсатор стабильным регулируемым выходным сигналом, необходимо подключать его через стабилизатор напряжения [6]–[9] и токовый ограничитель.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Повышающий стабилизатор постоянного напряжения. Данный источник относится к импульсным источникам питания (ИИП) [1]–[4], которые работают за счет периодического прерывания постоянного напряжения, поступающего на вход. На рис. 1 приведена принципиальная схема ИИП. Элементом прерывания сигнала ИПП является управляемый ключ Sw (транзистор).

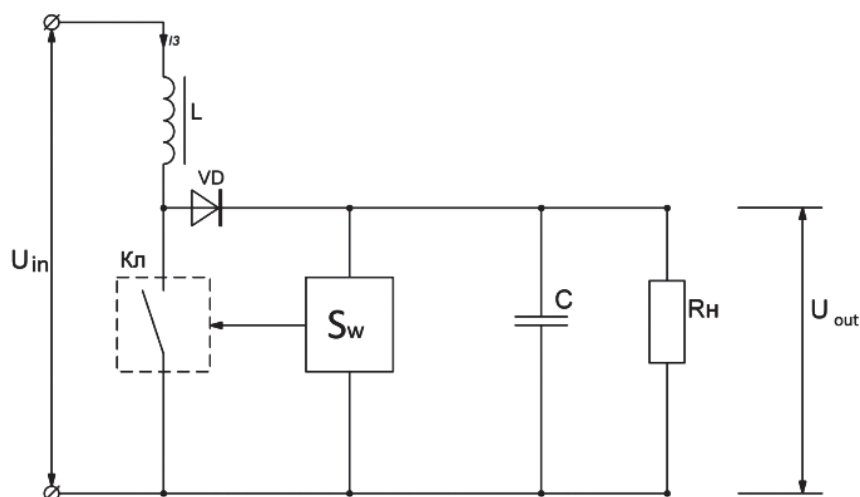


Рис. 1. Принципиальная схема повышающего ИИП

Постоянное переключение ключа на замыкание и размыкание создает на дросселе скачкообразное изменение напряжения, в результате чего возникает импульсный ток. На выходе схемы создается пульсирующее напряжение, значение которого растет гораздо выше входного. Соотношение длительности замкнутого состояния к длительности открытого состояния ключа определяется частотой работы воздействия на ключ.

Идентификация параметров емкостного накопителя. Рассмотрим схему разряда конденсатора (рис. 2), которая будет служить источником входного напряжения U_{in} .

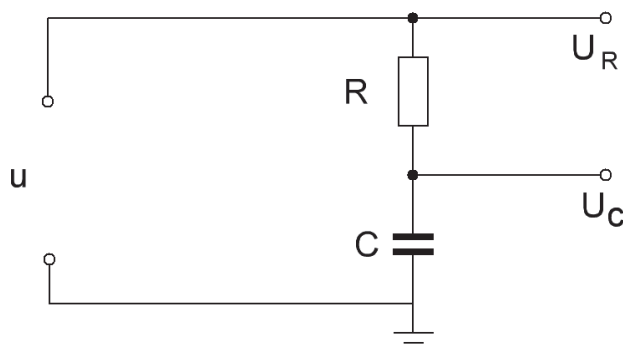


Рис. 2. Схема разряда емкостного накопителя

Разряд конденсатора регулируется через сопротивление R . Опишем математическую модель разряда емкостного накопителя. Исходя из принципиальной схемы на рис. 2, по закону Кирхгофа запишем

$$iR + U_C = u. \quad (1)$$

Напряжение на конденсаторе будет изменяться в зависимости от параметров заряда q и емкости конденсатора C :

$$U_C = \frac{q}{C}, \quad (2)$$

ток будет зависеть от изменения заряда во времени:

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (3)$$

Тогда

$$R \frac{dq}{dt} + U_c = u; \quad (4)$$

$$RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = u. \quad (5)$$

Напряжение заряженного емкостного накопителя не изменяется, поэтому выполним его замену:

$$U = U_c - u; \quad (6)$$

$$RC \frac{dU}{dt} + U = 0; \quad (7)$$

$$\int RC \frac{dU}{U} = \int dt. \quad (8)$$

Проинтегрировав уравнение, получим

$$U_c(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{CR}\right). \quad (9)$$

Параметр неопределенного коэффициента будет зависеть от начальных условий принципиальной схемы и равен начальному напряжению U_0 . Тогда

$$U(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{CR}\right), \quad (10)$$

После получения математической модели разряда емкостного накопителя можно перейти к разработке его компьютерной модели.

Идентификация параметров бустерного стабилизатора. Основными элементами, от которых будет зависеть работа стабилизатора напряжения, являются дроссель L , конденсатор C , диод VD и транзисторный ключ.

1. Определение параметров дросселя L

Бустерный стабилизатор работает по двум фазам: заряд дросселя и его разряд на нагрузку. При разряде дросселя в цепь отдается мощность

$$P_n = i_n U_n = \frac{i U_n}{2}, \quad (11)$$

где U_n — напряжение, В;

i_n — ток нагрузки, А.

Ток нагрузки зависит от значения тока заряда дросселя, ограниченного током i_3 , изменяемого линейно по закону:

$$i_3 = \frac{t_3 U_n}{L}. \quad (12)$$

После преобразований получим

$$L_{\max} = \frac{U_n t_3^{\max} U_n}{2 P_n}. \quad (13)$$

Исходя из формулы (13) видно, что значение L ограничивается мощностью нагрузки, поэтому значение индуктивности дросселя должно быть небольшим.

На рис. 3 дан график амперной характеристики дросселя. Поскольку ток i_0 не изменяется, максимальный ток:

$$i_L^{\max} = i_0 + \frac{U_n^{\min} t_3^{\max}}{L_{\min}}. \quad (14)$$

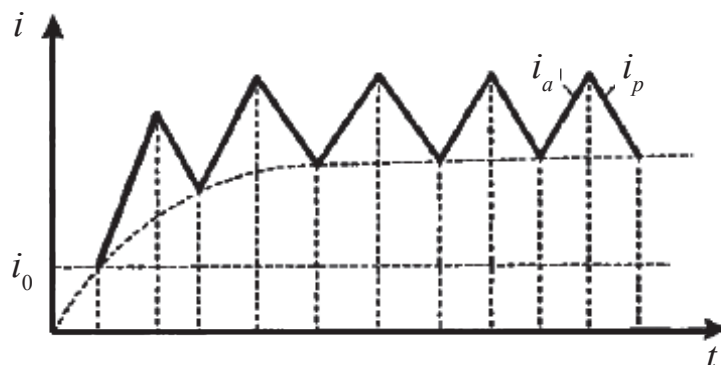


Рис. 3. Ток разряда дросселя

Пренебрегая током, получим

$$L_{\min} = \frac{U_n^{\min} t_3^{\max}}{i_L^{\max}}, \quad (15)$$

где $i_L^{\max} = 2i_n i_n^{\max}$.

Анализируя математическую модель зависимости индуктивности L , можно сделать вывод о том, что величина индуктивности дросселя имеет не только максимальный, но и минимальный порог и ограничивается параметрами транзисторного ключа в схеме стабилизатора. Мощность транзистора определяется формулой, исходя из его технических характеристик, согласно данным, приведенным в работах [1], [5]:

$$I_{VT} = i_L \sqrt{\frac{\gamma}{2}}, \quad (16)$$

Максимальная мощность стабилизатора определяется минимальным значением дросселя и мощностью транзисторного ключа. При определении параметров дросселя необходимо соблюдение следующих условий:

- максимальное значение $L_{\max}$ зависит от $t_3^{\max}$, U_n , f , P_n , $U_n^{\min}$;
- минимальное значение $L_{\min}$ зависит от $U_n^{\min}$, $t_3^{\max}$, i_n ;
- значение L рекомендуется минимальным.

2. Определение параметров емкости C

Выходное напряжение формируется импульсами ключа и дросселя. В связи с этим в схеме стабилизатора наблюдается большое количество пульсаций, для устранения которых необходим емкостной фильтр C . Величина конденсатора будет зависеть от разряда дросселя L :

$$\Delta U_Q = \frac{Q}{C}, \quad (17)$$

где Q — величина заряда дросселя во время первой фазы;

C — значение емкости конденсатора.

Величину заряда дросселя определим по формуле

$$Q = t_p i_p, \quad (18)$$

Зарядный ток определяется по формуле

$$i_3 = \frac{t_3 U_H}{LC}. \quad (19)$$

Тогда уровень пульсаций

$$\Delta U_Q = \frac{U_H t_3 t_p}{LC}. \quad (20)$$

Пренебрегая потерями, рассчитаем коэффициент пульсаций:

$$K_H = \frac{\Delta U_Q}{U_H} = \frac{U_H t_3 t_p}{U_H LC}, \quad (21)$$

Находим C :

$$C = \frac{U_H t_3 t_p}{U_H L K_H}, \quad (22)$$

Как видно из формулы (22), значение конденсатора не будет иметь порогового значения и задается в основном значением индуктивности дросселя.

3. Определение параметров диода VD

В качестве рабочего блокирующего диода в схеме стабилизатора используется диод Шоттки, технические характеристики которого зависят от рабочего тока и обратного напряжения.

4. Транзисторный ключ

В качестве транзисторного ключа бустерной схемы стабилизатора могут применяться полевые транзисторы *MOSFET* или биполярный транзистор *IGBT* [8], [10]. Технические характеристики транзистора будут определяться мощностью стабилизатора и значением индуктивности дросселя.

В процессе разработки компьютерной модели емкостного накопителя в большинстве случаев используются специализированные блоки пакета *Sim Power Systems*, расположенные в библиотеке *Extra Library*. Однако при анализе уравнения (10) составляем компьютерную модель накопителя при помощи функциональных элементов Clock, Fcn, Constant, Product пакета *Simulink* (рис. 4). Для моделирования постоянная времени $\tau = 2900$ с, напряжение заряда накопителя $U_0 = 100$ В.

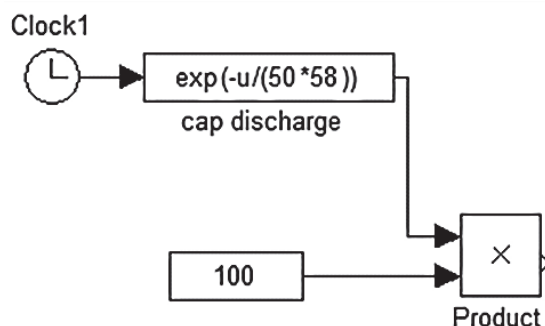


Рис. 4. Компьютерная модель емкостного накопителя

При запуске компьютерной модели с указанными характеристиками была получена осциллограмма выходного напряжения (рис. 5), из которой видно, что напряжение при разряде емкостного элемента изменяется экспоненциально, снижаясь более чем на 60 %.

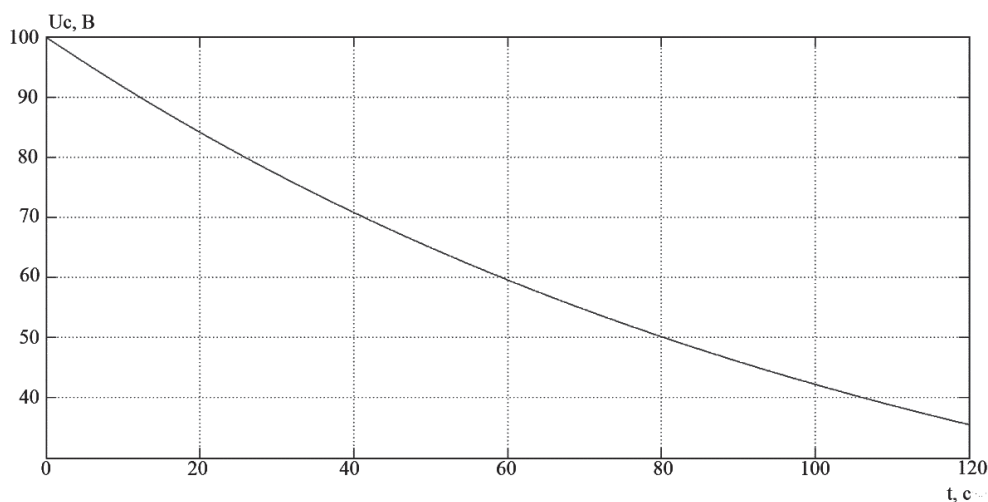


Рис. 5. Выходные характеристики емкостного элемента

Результаты (Results)

При создании модели полупроводниковых преобразователей в роли систем управления можно использовать специализированные блоки пакета *Sim Power Systems*, расположенные в библиотеке *Control Blocks*. В некоторых случаях, когда ни один из готовых блоков не подходит, можно сложить систему из функциональных элементов пакета *Simulink*, задав математическую зависимость согласно физическому закону, по которому работает система.

Рассмотрим различные варианты реализации систем управления на примерах моделей нескольких наиболее распространенных преобразующих устройств.

Системы управления на основе Simulink-моделей. Компьютерная схема ИПП с IGBT приведена на рис. 6.

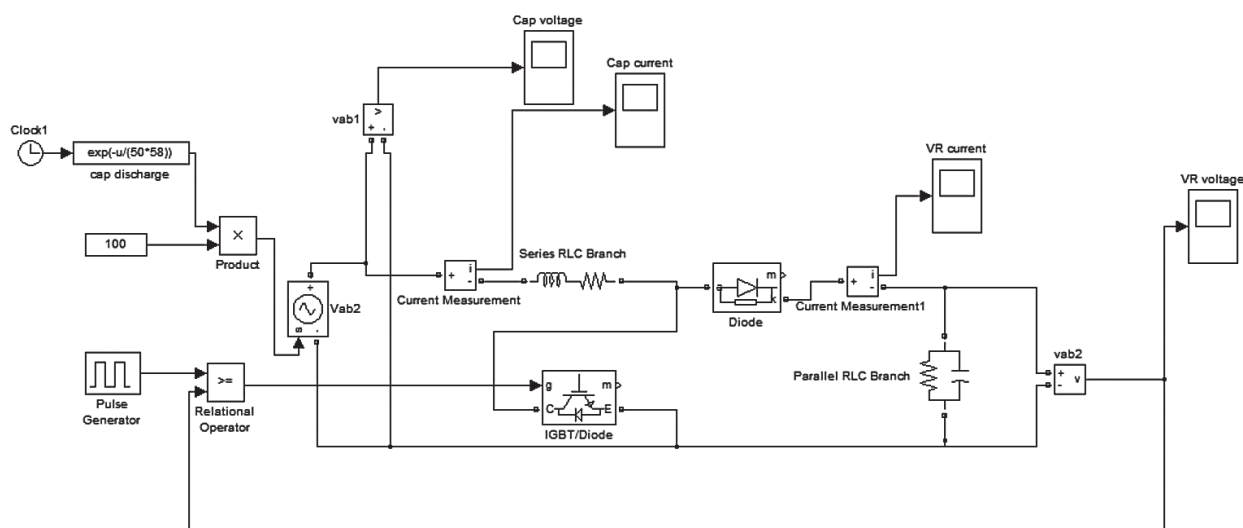


Рис. 6. Модель повышающего стабилизатора напряжения

В схеме рассматривается вариант преобразователя, в котором необходимо стабилизировать напряжение на выходе в пределах 210–240 В при спадающем напряжении на входе. В таком варианте в системе управления используется блок *Pulse Generator* [6], [7], который создает импульсы заданной частоты и ширины блок *Relational Operator*, выполняющий функцию обратной связи

с выходным напряжением и обрезает импульс, подаваемый на полупроводниковый ключ. В окне настройки блока задается период *Peroid* и ширина импульсов *Pulse Width*. Далее вычисляется частота f как величина, обратная периоду T , скважность сигнала задается в процентах в зависимости от периода. Тогда коэффициент определяется следующим образом:

$$\gamma = \frac{t_i}{t_i + t_n} = \frac{t_i}{T}, \quad (23)$$

где t_i — длительность импульса;

t_n — длительность паузы.

Зависимость исходного напряжения U_{out} при заданном входном U_{in} рассчитывается согласно выражению:

$$\gamma = 1 - \frac{U_{in}}{U_{out}}. \quad (24)$$

В данном случае $\gamma = 0,4$. Следовательно, 40 % длительности всего периода транзистор находится в ведущем состоянии. Значение Phase Delay дает задержку генерирования определенного количества импульсов, на модели установлено значение «0». На рис. 7 показан ток дросселя и напряжение на нагрузке. Приведенные результаты моделирования показывают, что исходное напряжение U_{out} поддерживается стабилизатором на уровне 230 В при спадающем входном напряжении U_{in} = от 100 В до 30 В, что подтверждает работоспособность имитационной модели.

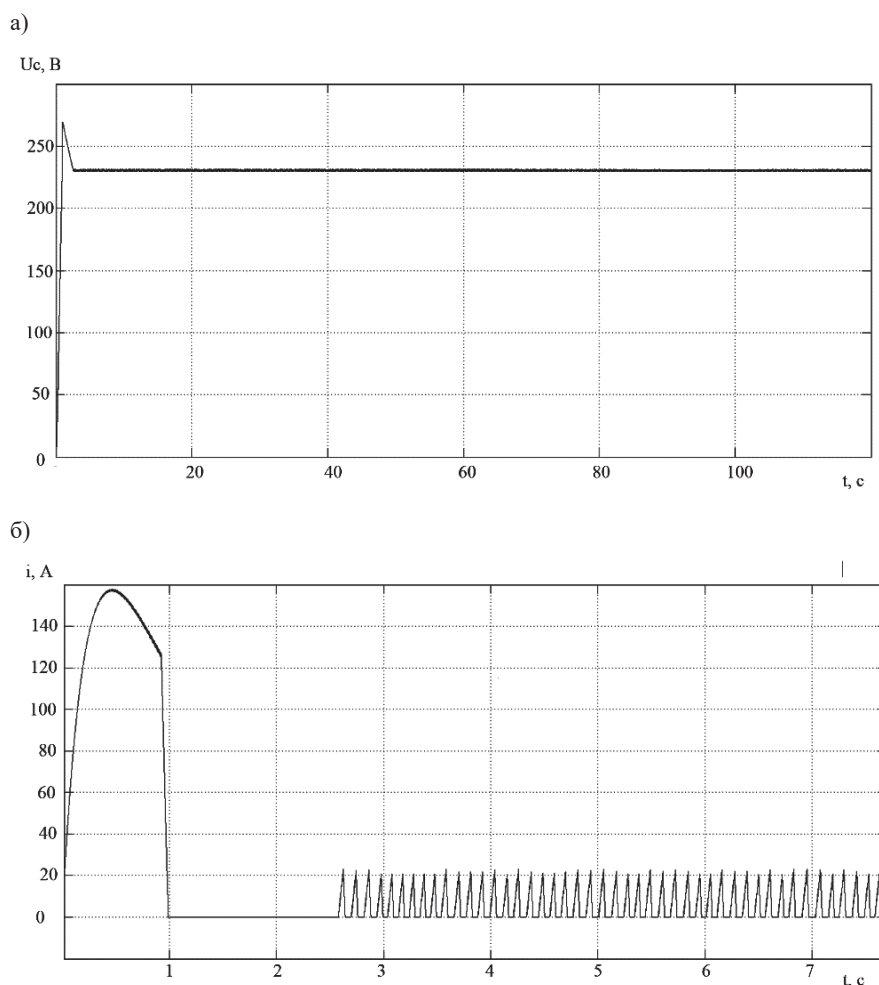


Рис. 7. Осциллограммы выходного сигнала:
а — напряжение на конденсаторе; б — ток дросселя

Выводы (Summary)

Современные средства моделирования позволяют разработать компьютерную модель любого электронного или электротехнического прибора либо сложной системы. В ходе проведенных исследований были сформулированы дополнительные выводы:

1. Математический анализ теоретических положений и физических законов электротехники и электроники дают возможность смоделировать источник постоянного напряжения на основе мощного емкостного накопителя при помощи различных прикладных программ, в том числе среды моделирования *Matlab*.

2. Создание компьютерных моделей позволяет исследовать работу различных дорогостоящих или массогабаритных устройств и систем электроники, не прибегая к созданию реальных макетов, что дает возможность адекватно оценить недостатки и преимущества от устройства до сложного технического комплекса.

3. Разработанные компьютерные модели в дальнейшем могут быть использованы в учебном процессе обучающимися по электротехническим специальностям при изучении современных систем электроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приходько В. М. Оценка интегральных характеристик электропотребления в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями / В. М. Приходько, И. В. Приходько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 838–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-838-848.

2. Григораш О. В. Стабилизаторы напряжения постоянного тока / О. В. Григораш, М. А. Попучиева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2017. — № 129. — С. 1043–1056. DOI: 10.21515/1990-4665-129-074.

3. Баранов А. М. Сравнительный анализ современных стабилизаторов напряжения / А. М. Баранов // NovaInfo.Ru. — 2016. — Т. 2. — № 49. — С. 15–18.

4. Икромов М. М. Обзор стабилизатора напряжения на основе транзисторов в системах электроснабжения / М. М. Икромов, М. Я. Ибайдуллаев, Р. Ч. Каримов // Universum: технические науки. — 2021. — № 4–4 (85). — С. 89–92. DOI: 10.32743/UniTech.2021.85.4-4.89-92.

5. Григорьев А. В. Решение проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями / А. В. Григорьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 753–763. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-753-763.

6. Межаков О. Г. Математическая модель понижающего преобразователя напряжения / О. Г. Межаков // Молодой ученый. — 2015. — № 5 (85). — С. 171–176.

7. Norkhadzhayevich R. A. Operating mode of the stabilizer of current on active and inductive loading / R. A. Norkhadzhayevich, K. R. Choriyeovich // European science review. — 2015. — № 9–10. — С. 140–143.

8. Choriyeovich K. R. Research of the stabilizer of current taking into account the highest harmonics in systems of power supply / K. R. Choriyeovich // European science review. — 2015. — № 9–10. — С. 144–146.

9. Приходько В. М. Резонансные явления в электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями при питании судов с берега / В. М. Приходько, М. Л. Ивлеев, И. В. Приходько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3. — С. 28–34.

10. Балыкшов А. Ионисторы / А. Балыкшов // Электронные компоненты-Украина. — 2005. — № 11. — С. 91–97.

REFERENCES

1. Prikhodko, Valentin M., and Irina V. Prikhodko. “Estimation of integral characteristics of energy consumption in marine power systems with semiconductor converters.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 838–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-838-848.

2. Grigorash, Oleg Vladimirovich, and Maria Alexandrovna Popuchieva. "DC voltage stabilizers." *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University* 129 (2017): 1043–1056. DOI: 10.21515/1990-4665-129-074.

3. Baranov, A.M. "Sravnitel'nyi analiz sovremennykh stabilizatorov napryazheniya." *NovaInfo.Ru* 2.49 (2016): 15–18.

4. Ikromov, Muslimbek, Mahmudjon Ibaydullaev, and Rakhmatillo Karimov. "Overview of voltage stabilizer based on transistors in power supply systems." *Universum: tekhnicheskije nauki* 4–4(85) (2021): 89–92. DOI: 10.32743/UniTech.2021.85.4-4.89-92.

5. Grigoryev, Andrey V. "Solving the problem of electromagnetic compatibility in electric power systems with semiconductor converters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 753–763. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-753-763.

6. Mezhaikov, O. G. "Matematicheskaya model' ponizhayushchego preobrazovatelya napryazheniya." *Molodoi uchenyi* 5(85) (2015): 171–176.

7. Norkhadzhayevich, Rasulov Abdulkhay, and Karimov Rakhmatillo Choriyeovich. "Operating mode of the stabilizer of current on active and inductive loading." *European science review* 9–10 (2015): 140–143.

8. Choriyeovich, Karimov Rakhmatillo. "Research of the stabilizer of current taking into account the highest harmonics in systems of power supply." *European science review* 9–10 (2015): 144–146.

9. Prihod'ko, V. M., M. L. Ivlev, and I. V. Prihod'ko. "The resonant phenomena in electrical power systems with semiconductor converters at platny of vessels from the coast." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (2013): 28–34.

10. Balykshov, A. "Ionistory." *Elektronnye komponenty-Ukraina* 11 (2005): 91–97.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Труднев Сергей Юрьевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»
683003, Российская Федерация,
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35
e-mail: trudnev@mail.ru

Марченко Алексей Александрович —

кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»
683003, Российская Федерация,
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35
e-mail: Marchenko_alx@inbox.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Trudnev, Sergey Yu. —

PhD, associate professor
Kamchatka State Technical University
35 Klyuchevskaya Str., Petropavlovsk-Kamchatsky,
683003, Russian Federation
e-mail: trudnev@mail.ru

Marchenko, Aleksey A. —

PhD
Kamchatka State Technical University
35 Klyuchevskaya Str., Petropavlovsk-Kamchatsky,
683003, Russian Federation
e-mail: Marchenko_alx@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2022 г.

Received: February 3, 2022.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 14. № 1

2022 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 28.02.22. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 18,75. Тираж 500 экз. Заказ № /22

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7