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 11. № 1

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019

ББК 95

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2019. — Т. 11. — № 1. — 202 с.

ISSN (print) 2309-5180
ISSN (online) 2500-0551

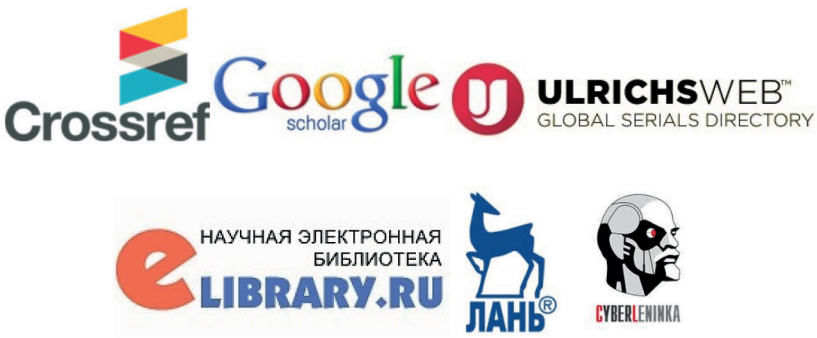
«Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации СМИ от 17 июля 2013 г. 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»; **05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»** в разделе «Информационные технологии и автоматизация на транспорте».

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.





© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 7

Смоленцев С. В., Исаков Д. В. Простая аналитическая модель движения судна 7

Ершов А. А., Мальков А. А. Использование уточненных математических моделей для решения практических задач судовождения 22

Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Зайкин Д. А. Моделирование работы морского грузового фронта 33

Никитин Е. В., Подпорин С. А. Устойчивость двухзвенной системы подвешивания с непараллельными и эластичными стропами для погрузки / выгрузки на судно крупногабаритного и тяжеловесного груза 43

Янченко А. А., Маликова Т. Е., Оськин Д. А. Экспериментальные исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы в условиях свободного порта Владивосток 57

Сампиев А. М. Применение метода Монте-Карло для оценки эффективности использования бюджета рабочего времени морского терминала 68

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 78

Гапеев А. М., Моргунов К. П. Анализ изменения основных параметров системы наполнения камеры судоходного шлюза № 7 канала имени Москвы 78

Стародубцев П. А., Халаев Н. Л., Бакланов Е. Н. Характеристики гидродинамических портретов акустических полей мелководных районов залива Петра Великого Японского моря 87

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 99

Андрианов Е. Н., Иванов А. Н. Выбор параметров передач крановых механизмов на ранней стадии проектирования 99

Ежов Ю. Е., Бардин А. К., Сидоренко В. А. Пути повышения эффективности технического обслуживания промышленного перегрузочного оборудования 113

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 121

Горшков Р. В., Жаров А. В., Скосарь В. В. Влияние концентрации наночастиц мультиграфена в теплоносителе систем охлаждения судовых и транспортных энергетических установок на его вязкость 121

Петров А. П., Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность. Ограничение выбросов серы судовыми энергетическими установками 130

Том 11. № 1

2019

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников,
д.т.н., проф.
rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырков,
д.т.н., проф.
NyrkowAP@gumrf.ru

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

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

Ф. В. Кармазинов
координатор стратегических программ ГУП «Водоканал СПб», д.т.н., проф.

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

А. И. Пошивай
заместитель руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов
д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов
директор 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.
В. В. Веселков, 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.
Т. А. Клепикова, д.ф.н.
М. А. Колосов, д.т.н.
Е. А. Королёва, д.э.н.
И. И. Костылев, д.т.н.
А. Л. Кузнецов, д.т.н.
С. Е. 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., директор РРР
А. Л. Тезиков, д.т.н.
В. И. Черненко, д.т.н.
В. Б. Чистов, д.т.н.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....146

Кузнецов С. Е., Макаров Д. М. Компьютерное моделирование распространения высокочастотного сигнала в судовой высоковольтной электроэнергетической системе 146

Самосейко В. Ф. Адаптивный алгоритм векторного управления электроприводами с асинхронными электродвигателями 156

Романовский В. В., Малышев В. А., Бежик А. С. Анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока.....169

Гельвер Ф. А., Белоусов И. В. Фильтрующие свойства электрических машин при широтно-импульсной модуляции 182

Григорьев А. В., Малышев С. М., Зайнуллин Р. Р. Судовая электростанция с вентильными дизель-генераторами переменной частоты вращения 193

CONTENST

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 7

Smolentsev S. V., Isakov D. V. A simple analytical model of ship movement 7

Ershov A. A., Malkov A. A. Use of clarified mathematical models for practical problems of navigation 22

Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Zaykin D. A. Simulation of the sea cargo front operation 33

Nikitin Y. V., Podporin S. A. Stability analysis of two-link suspension system with elastic and non-parallel secondary slings for bulky and heavy cargo loading / unloading 43

Yanchenko A. A., Malikova T. E., Oskin D. A. Experimental studies of the impact of a container terminal zoning on its operation efficiency under the conditions of the free port Vladivostok 57

Sampiev A. M. Monte-Carlo simulation for the efficiency assessment of marine terminal working time budget using 68

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 78

Gapeev A. M., Morgunov K. P. Analysis of changes in the basic parameters of the system of filling the chamber of the ship lock № 7 of the Moscow Canal 78

Starodubtsev P. A., Khalaev N. L., Baklanov E. N. Characteristics of the hydrodynamic portraits of acoustic fields of the shallow areas of Peter the Great Bay of Sea of Japan 87

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 99

Andrianov E. N., Ivanov A. N. Selection of the crane mechanism transmission parameters at early design stage 99

Ezhov Y. E., Bardin A. K., Sidorenko V. A. The ways to improve the efficiency of industrial transshipping equipment maintenance 113

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES 121

Gorshkov R. V., Zharov A. V., Skosar V. V. Influence of the multigraphen nanoparticles concentration in the heat carrier of ship and transport propulsion plants cooling systems on its viscosity 121

Petrov A. P., Zhivljuk G. E. Environmental safety. Limitation of sulfur emissions by the ship power plants 130

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 146

Kuznetsov S. Y., Makarov D. M. Computer simulation of a high-frequency signal propagation in the ship's high-voltage electro-energy system 146

Volume 11. № 1

2019

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.
NyrkowAP@gumrf.ru

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

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

F. V. Karmazinov
Strategic Program Coordinator of SUE "Vodokanal of St. Petersburg", doctor of technical Sciences, Prof.

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

A. I. Poshivay
Deputy Head of the Federal Agency of Sea and River Transport

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

M. Yusupov
director 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
V. V. Veselkov, 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
T. A. Klepikova, doctor of philosophical 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
S. Ye. 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, General Director of FSI Russian River Register
A. L. Tezikov, doctor of technical Sciences
V. I. Chernenko, doctor of technical Sciences
V. B. Chistov, doctor of technical Sciences

Samosejko V. F. The adaptive algorithm of the vector control of electrical drives with the induction motors..... 156
Romanovskiy V. V., Malishev V. A., Bezhik A. S. Special structure of the electrical propulsion plant with DC-grid system..... 169
Gelver F. A., Belousov I. V. The filtering properties of electrical machines at width-pulse modulation..... 182
Grigoryev A. V., Malyshev S. M., Zaynullin R. R. Ship electric power plant with valve diesel-generators of variable rotation speed..... 193

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21

A SIMPLE ANALYTICAL MODEL OF SHIP MOVEMENT

S. V. Smolentsev, D. V. Isakov

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

The problem of synthesis of the vessel trajectory is discussed in the paper. The solution of this problem is important for the development of automatic ship control systems. In particular, it is solved in the system of automatic collision avoidance systems. One of this system components is the ship's movement modeling subsys-tem. This subsystem synthesizes the prediction of the movement trajectory of both own vessel and target ships in the water area. An analytical model of the vessel movement when maneuvering the course and speed is proposed in the paper. The trajectory of the vessel movement when maneuvering the course is divided into four segments. Each segment is characterized by a set of parameters. The values of these parameters for each particular vessel should be determined in advance. This requires the identification of model parameters. The proposed model of vessel dynamics during speed maneuver is the result of analytical solution of the differential equations of the vessel movement during deceleration or acceleration. Using this model, it is possible to obtain the parameters of the vessel's movement at any time after the start of the speed maneuver. Previously, the authors have proposed a kinematics model of the vessel movement during maneuvering. However, this model was integrating - to obtain the parameters of the vessel's movement at a given time, the parameters for the intermediate positions of the vessel with a fixed step were necessary to calculate. The advantage of the proposed model is that it allows analytically calculating the vessel motion parameters for any given moment of time, which lets to find solutions faster, especially in case of processing a large number of trajectories. The identification issues of model parameters are considered. The method to identify the vessel's dynamics model parameters according to the data from the maneuvering booklet is used. The maneuvering booklet contains the information on the vessel behavior when performing the standard maneuvers the course and the speed. Its presence on the vessel is required in accordance with IMO Resolution A.601 (15).

The proposed model of vessel dynamics allows one to obtain the vessel motion parameters at any given time after the maneuver start or to calculate the arrival time at a given point of the maneuver trajectory. It can be used in the vessels collision avoidance systems and any other control systems where to predict the vessel movement during maneuvering is necessary.

Keywords: simulation, vessel trajectory, analytical model, maneuvering booklet

For citation:
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.

УДК 656.61.052

ПРОСТАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА

С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков

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

В статье рассматривается задача синтеза траектории движения судна, решение которой является актуальным для построения систем автоматического управления судном. В частности, она решается в системе автоматического расхождения судов. Одним из компонентов этой системы является подсистема моделирования движения судов, с помощью которой строится прогноз траектории движения

как собственного судна, так и судов-целей в акватории. Предложена аналитическая модель движения судна при маневрировании курсом и скоростью. Траектория движения судна при маневре курсом разбивается на четыре сегмента, каждый из которых характеризуется набором параметров. Значения этих параметров для каждого конкретного судна должны быть определены заранее. Для этого необходима идентификация параметров модели. Предложенная модель динамики судна при маневре скоростью является результатом аналитического решения дифференциальных уравнений движения судна при торможении или разгоне. При помощи этой модели можно получить параметры движения судна на любой момент времени после начала маневра скоростью. Ранее авторами была предложена кинематическая модель движения судна при маневрировании. Однако эта модель была интегрирующей (для получения параметров движения судна в заданный момент времени необходимо было рассчитывать параметры для промежуточных положений судна с заданным шагом). Преимущество предложенной модели состоит в том, что она позволяет аналитически рассчитать параметры движения судна для любого заданного момента времени, что позволяет быстрее находить решения, особенно в случае обработки большого количества траекторий. Рассмотрены вопросы идентификации параметров модели динамики судна. Использована методика идентификации параметров модели по данным из маневренного буклета. Маневренный буклет содержит информацию о поведении судна при выполнении стандартных маневров курсом и скоростью. Его наличие на судне обязательно в соответствии с Резолюцией ИМО А.601(15).

Предложенная модель динамики судна позволяет получать параметры движения судна в любой заданный момент времени после начала маневра или рассчитать время прихода в заданную точку траектории маневра. Она может быть использована в системах предупреждения столкновений судов и любых других системах управления, в которых необходимо прогнозировать движение судна при маневрировании.

Ключевые слова: моделирование, траектория движения судна, аналитическая модель, маневренный буклет.

Для цитирования:
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.

Введение (Introduction)

Одной из важных задач при построении систем автоматизации управления судном является задача прогнозирования движения судна в течение заданного промежутка времени. В частности, такая задача стоит в автоматической системе расхождения судов, разработанной авторами на кафедре автоматики и вычислительной техники ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова [1]. Важным компонентом этой системы является подсистема моделирования движения судов, с помощью которой строят прогноз траектории движения как собственного судна, так и судов-целей в акватории.

Проблеме разработке математических моделей движения судна посвящено большое количество работ, как отечественных, так и зарубежных. В частности, в работах Юдина [2], [3] рассматриваются различные модели динамики, и вводится понятие коэффициентов влияния на эти модели. В статье [4] обсуждаются вопросы контроля динамики судна на основе судовой интеллектуальной системы управления. В работе [5] рассматриваются нелинейная и линейная модели движения судна в различных режимах маневрирования, а также анализируются методы решений системы нелинейных дифференциальных уравнений движения судна. В статье [6] приводится обзор различных моделей динамики судна, основанных на интегрировании уравнений движения с учетом гидродинамики, а в статье [7] рассматриваются вычислительные аспекты интегрирования уравнений динамики в системе Simulink. Работа [8] посвящена вопросам идентификации модели динамики судна на основе маневра типа Zigzag.

Авторы в данной работе исходят из условия, что модели, которые можно использовать в системе расхождения, должны быть простыми как в вычислительном плане, так и по количеству параметров. Это связано с тем, что в системе приходится в реальном времени необходимо рассчитывать траектории движения множества встречных судов, а также принимать во внимание большое количество вариантов собственных маневров для расхождения. Параметры этих моделей должны быть легко определяемыми из основных данных о маневренности судна.

Таким образом, сложные гидродинамические модели судов не применимы в данной ситуации. Авторами в статье [9] была предложена простая кинематическая модель динамики судна при маневрировании курсом и скоростью. Однако эта модель имеет интегрирующий характер, то есть для получения параметров движения судна в заданный момент времени необходимо объединить уравнения движения от момента начала маневра до данного момента. Это, безусловно, препятствует быстрому расчету траекторий множества судов.

В данной статье предложена аналитическая модель динамики судна при маневрировании курсом и скоростью, позволяющая рассчитать параметры движения судна в произвольный момент времени без необходимости интегрирования уравнений движения. Количество параметров аналитической модели больше, чем кинематической. Однако все эти параметры могут быть найдены из «Маневренного буклета судна» (далее — МБ).

В соответствии с Резолюцией IMO A.601(15) “Provision and Display of Manoeuvring Information on Board Ships” («Представление на судах информации о маневренных характеристиках») [10] и MSC.137 (76) от 5 декабря 2002 г. «Стандарты маневренных качеств судна» [11], а также Циркулярным письмом Комитета по безопасности на море MSC.1053 от 5 декабря 2002 г. «Пояснительные записки к стандартам маневренных качеств судна» [12] маневренные качества судна должны оцениваться по характеристикам маневренности, полученным при ходовых испытаниях и быть подтверждены компьютерными вычислениями на основе математического моделирования. Одним из документов, который должен быть на судне в соответствии с этой Резолюцией, является МБ. В этом документе представлена информация о поведении судна при выполнении стандартных маневров курсом и скоростью. Принципы создания моделей динамики судов по данным МБ изложены в работе [13] и в данной статье они получили дальнейшее развитие.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В статье использованы следующие обозначения:

K — курс судна град.;

V — скорость судна, м/с;

w — угловая скорость судна, град./с;

a — ускорение судна, м/с^2;

t — время, с;

δ — угол перекладки руля, град.;

φ — угол поворота, град.;

β — угол дрейфа, град.;

R — радиус поворота, м;

Y — координата в направлении по ДП судна, м;

X — координата в направлении перпендикулярном ДП судна, м;

S — расстояние по траектории движения судна, м.

Модель динамики судна при маневре изменения курса

Упрощенная математическая модель динамики судна на повороте. При выполнении маневра изменения курса судно движется по сложной траектории,с переменными значениями параметров движения: ускорения, линейной и угловой скоростей, угла дрейфа и т. п. Причем как траектория, так и указанные параметры движения зависят от начальной скорости движения судна, угла перекладки руля при повороте, глубины под килем, гидрометеообстановки и других условий. Информация о траектории движения судна при повороте представлена в МБ (рис. 1).

Упрощенная модель динамики судна строится на основе следующих предположений:

1. Траектории движения судна и параметры этого движения одинаковы для маневров поворота влево и вправо (кроме тех судов, в МБ которых приведены данные по обоим маневрам).

2. Начальное значение курса $K_0 = 0$.

3. Начальные координаты: $X_0 = 0$, $Y_0 = 0$.

4. Угол дрейфа для заданного угла перекладки руля δ на эволюционном участке траектории возрастает от 0 до значения β, а затем он постоянный.

5. Траектория движения судна при повороте на 360° состоит из четырех участков (рис. 2):
A0 — движение по прямой на расстояние S_0;
A1 — движение по дуге окружности $\varphi \in [0 \ldots 90°]$ радиусом R_1;
A2 — движение по дуге окружности $\varphi \in [90 \ldots 180°]$ радиусом R_2;
A3 — движение по дуге окружности $\varphi \in [180 \ldots 360°]$ радиусом R_3.
6. На каждом участке параметры модели (ускорение и угловая скорость) постоянны.

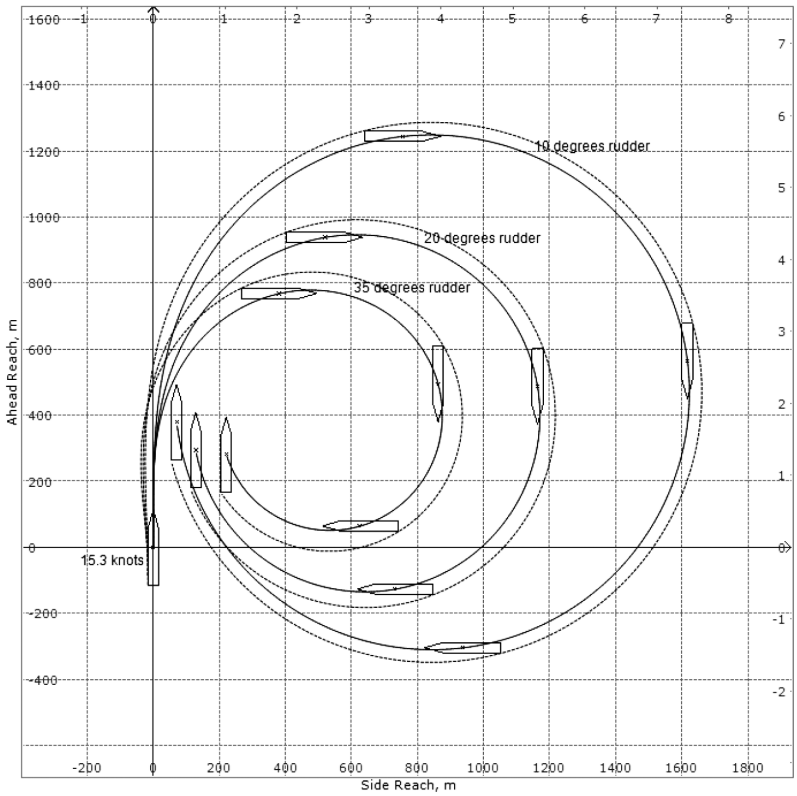


Рис. 1. Данные из МБ: поворот на правый борт

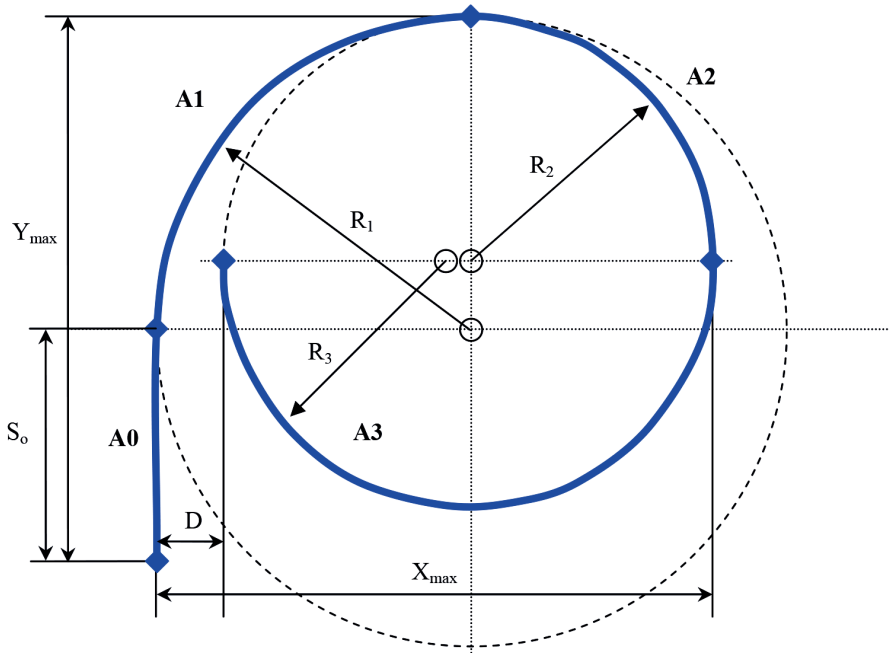


Рис. 2. Модель траектории движения судна при повороте на 360°

Параметры модели S_0, R_1, R_2, R_3 связаны с параметрами X_{max}, Y_{max} и D из МБ следующими уравнениями:

$$X_{max} = 2R_3 + D;$$

$$X_{max} = R_1 + R_2; \quad (1)$$

$$Y_{max} = S_0 + R_1.$$

A0 — движение происходит с начальным курсом и скоростью, участок характеризуется параметрами, определяемыми по данным МБ: S_0 — длина участка; K_0 — начальный курс ($K_0 = 0$); V_0 — начальная скорость.

Параметры движения на участке A0:

$$V_t = V_0;$$

$$K_t = K_0;$$

$$X_t = 0;$$

$$Y_t = V_0 t;$$

Параметры завершения движения на участке A0:

$$T_0 = S_0 / V_0;$$

$$X_0 = 0;$$

$$Y_0 = S_0.$$

A1 — движение происходит по дуге окружности $\varphi \in [0 \ldots 90°]$ с постоянными параметрами, определяемыми по данным МБ: R_1 — радиус траектории движения; a_1 — ускорение; w_1 — угловая скорость.

Параметры движения на участке A1:

$$V_t = V_0 + a_1(t - T_0);$$

$$\varphi_t = w_1(t - T_0);$$

$$K_t = \varphi_t + \beta;$$

$$X_t = R_1(1 - \cos\varphi_t);$$

$$Y_t = S_0 + R_1 \sin\varphi_t.$$

Параметры завершения движения на участке A1:

$$T_1 = T_0 + 90/w_1;$$

$$V_1 = V_0 + a_1(T_1 - T_0);$$

$$X_1 = R_1;$$

$$Y_1 = S_0 + R_1.$$

A2 — движение происходит по дуге окружности $\varphi \in (90 \ldots 180°]$ с постоянными параметрами, определяемыми по данным МБ: R_2 — радиус траектории движения; a_2 — ускорение; w_2 — угловая скорость.

Параметры движения на участке A2:

$$V_t = V_1 + a_2(t - T_1);$$

$$\varphi_t = w_2(t - T_1);$$

$$K_t = 90 + \varphi_t + \beta;$$

$$X_t = R_1 + R_2 \cdot \sin\varphi_t;$$

$$Y_t = S_0 + (R_1 - R_2) + R_2 \cdot \cos\varphi_t.$$

Параметры завершения движения на участке А2:

$$T_2 = T_1 + 90/w_2;$$

$$V_2 = V_1 + a_2(T_2 - T_1);$$

$$X_2 = R_1 + R_2;$$

$$Y_2 = S_0 + (R_1 - R_2).$$

А3 — движение происходит по дуге окружности $\varphi \in (180 \ldots 360°]$ с постоянными параметрами, определяемыми по данным МБ: R_3 — радиус траектории движения; a_3 — ускорение; w_3 — угловая скорость.

Параметры движения на участке А3:

$$V_t = V_2 + a_3(t - T_2);$$

$$\varphi_t = w_3(t - T_2);$$

$$K_t = 180 + \varphi_t + \beta;$$

$$X_t = R_1 + (R_2 - R_3) + R_3 \cdot \cos\varphi_t;$$

$$Y_t = S_0 + (R_1 - R_2) - R_3 \cdot \sin\varphi_t;$$

Параметры завершения движения на участке А3:

$$T_3 = T_2 + 180/w_3;$$

$$V_3 = V_2 + a_3(T_3 - T_2);$$

$$X_3 = R_1 + R_2 - 2R_3;$$

$$Y_3 = S_0.$$

Идентификация параметров математической модели динамики судна на повороте. Для идентификации параметров математической модели используются данные, приведенные в МБ, по которым строятся образцовые траектории движения судна и подбираются параметры модели таким образом, чтобы модельные траектории соответствовали этим образцовым траекториям. Методика идентификации параметров модели по данным МБ подробно рассмотрена в источнике [13]. К сожалению, на участке А3 из МБ представлено только по две точки, что затрудняет идентификацию параметров модели для этого участка. Пример согласования образцовой и модельной траекторий показан на рис. 3.

Расчет параметров математической модели динамики судна при произвольном угле перекладки руля. В МБ приведены данные по динамике судна на повороте при фиксированных углах перекладки руля: 10°, 20°, 35°, однако необходимо иметь параметры модели для произвольного угла перекладки руля в пределах 0 … 35°. Параметры модели для произвольного угла перекладки руля: $\delta = x$ определяются интерполяцией / экстраполяцией через значения параметров для фиксированных углов перекладки руля.

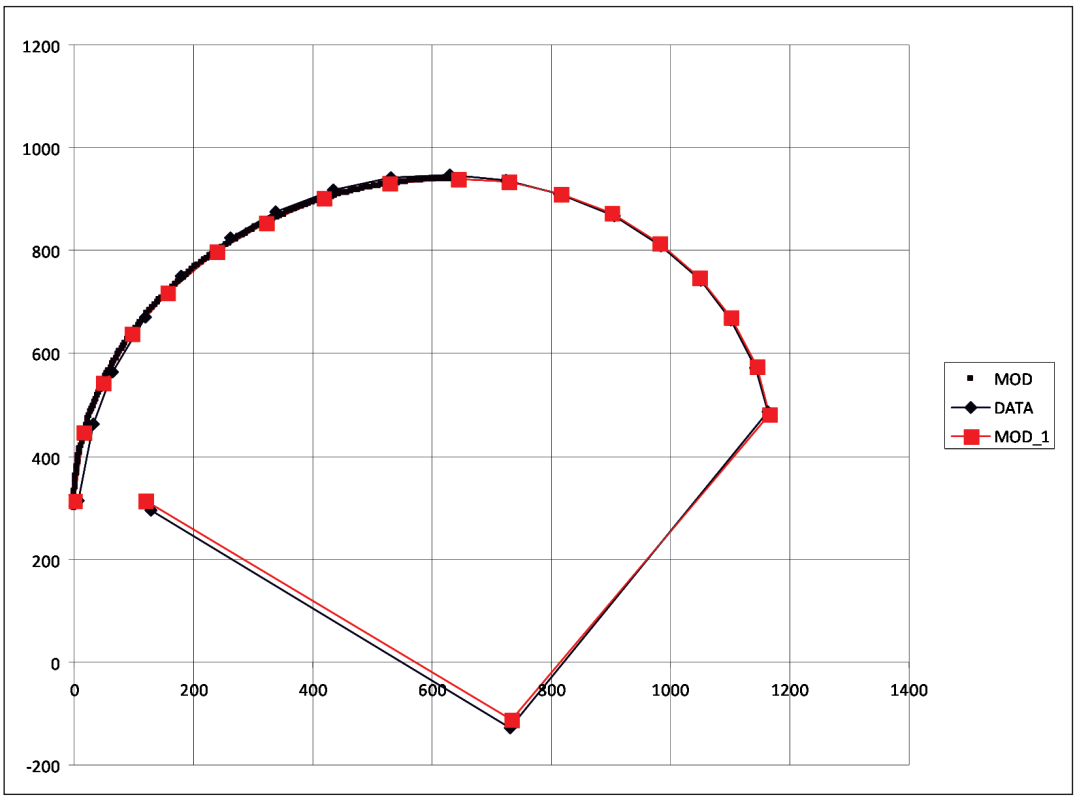


Рис. 3. Пример согласования образцовой и модельной траекторий

Обозначим значения какого-либо параметра Y модели для фиксированных углов перекладки руля (10°, 20°, 35°) — Y_{10}, Y_{20}, Y_{35}. Тогда для произвольного угла перекладки руля $\delta = x$ значение параметра Y определяется следующим образом:

$$Y_x = \begin{cases} Y_{10} + (x-10)\dfrac{(Y_{20} - Y_{10})}{10}, & 0 < x \le 20; \\ Y_{20} + (x-20)\dfrac{(Y_{35} - Y_{20})}{15}, & 20 < x < 35. \end{cases} \quad (2)$$

Модель динамики судна при маневре скоростью

Зависимость скорости судна от оборотов винта. По данным из МБ строится зависимость скорости судна от оборотов винта, которая аппроксимируется функцией

$$V = f(RPM) = A\_3RPM^3 + A\_2RPM^2 + A\_1RPM + B, \quad (3)$$

где V — скорость судна, уз;

RPM — обороты винта, об/мин, от значения V_0 до значения ноль (торможение) или режим работы, %, для СРР.

Примеры полученной зависимости показаны на рис. 4.

Упрощенная математическая модель динамики судна при маневрировании скоростью. Упрощенная модель динамики судна строится на основе следующих предположений:

1) при выполнении маневра скоростью управление курсом не производится;

2) на судно действует только пара сил: движущая сила от упора винта и сила сопротивления движению судна;

3) сила сопротивления движению судна пропорциональна квадрату его скорости;

4) при установившемся (равномерном) движении судна движущая сила равна силе сопротивления.

а) б)

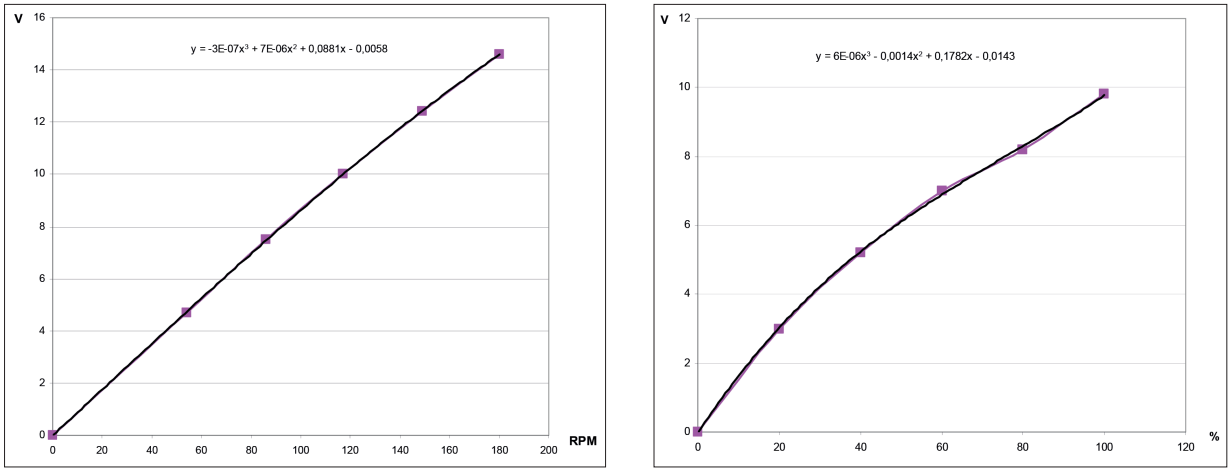


Рис. 4. Примеры аппроксимации зависимости:
а — от оборотов винта, об/мин; *б* — от режима работы, %

В каждый момент времени судно движется с ускорением

$$a_t = a_t^+ - a_t^-, \tag{4}$$

где a_t^+ — ускорение от упора винта;

a_t^- — ускорение торможения.

Согласно предположению пп. 3, ускорение торможения можно записать в виде

$$a_t^- = \alpha V_t^2.$$

Используя предположения пп. 3 и 4, определим ускорение от упора винта через скорость установившегося движения для текущего значения оборотов винта — V_c:

$$a_t^+ = \alpha V_c^2.$$

Таким образом, модель ускорения запишем в виде

$$a_t = \alpha V_c^2 - \alpha V_t^2. \tag{5}$$

В случае, если $V_c = V_t$: $a_t = 0$:

$V_c > V_t$ — скорость судна увеличивается;

$V_c < V_t$ — скорость судна уменьшается.

Рассмотрим два маневра изменения скорости: от значения V_0 до значения V_c и от значения V_0 до значения ноль (торможение).

1. Маневр скоростью — изменение скорости судна от значения V_0 до значения V_c:

– ускорение:

$$a_t = \alpha V_c^2 - \alpha V_t^2; \tag{6}$$

– скорость движения судна определяется дифференциальным уравнением:

$$\frac{dV}{dt} = \pm V_c^2 - \pm V^2(t), \tag{7}$$

решение которого выглядит следующим образом:

$$V_t = V_c \frac{\left(\frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} e^{2\alpha V_c t} + 1\right)}{\left(\frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} e^{2\alpha V_c t} - 1\right)}; \tag{8}$$

– расстояние, пройденное судном за время t определяется интегрированием выражения (8):

$$S_t = \int V_t dt = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left| \frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} e^{2\alpha V_c t} - 1 \right| - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left| \frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} - 1 \right| - V_c t \, ; \tag{9}$$

– время, в течение которого судно пройдет заданное расстояние S_t определяется по формуле

$$t = \frac{1}{\alpha V_c} \cdot \ln \left| \frac{\left(\frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} - 1 \right) e^{\alpha S_t} + \sqrt{\left(\frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} - 1 \right)^2 e^{2\alpha S_t} + 4 \frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c}}}{2 \frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c}} \right| . \tag{10}$$

Модель (6)–(10) описывает поведение судна при большой разнице между текущей и заданной скоростями. При малом значении разности скоростей эти уравнения неприменимы, поэтому предлагается следующая модель:

$$\frac{dV}{dt} = \alpha V_c^2 - \alpha V^2(t)\, t, \text{ если } \left| V(t) - V_c \right| \geq \left| DV \right| ;$$

$$\frac{dV}{dt} = \alpha V_c^2 - \alpha (V^*)^2, \text{ если } \left| V(t) - V_c \right| < \left| DV \right| , \tag{11}$$

где $V^* = V_c + DV$;

DV — минимальная разность скоростей, sign (DV) = sign ($V_0 - V_c$).

Однако для переключения с одной модели на другую удобнее использовать время достижения скорости V^*, которое находится из следующего выражения:

$$t^* = \frac{1}{2\alpha V_c} \left(\ln \left| \frac{V_0 - V_c}{V_0 + V_c} \right| + \ln \left| \frac{2V_c + DV}{DV} \right| \right). \tag{12}$$

Тогда модель (7) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dV}{dt} = \alpha V_c^2 - \alpha V^2(t), \text{ если } t \leq t^* ;$$

$$\frac{dV}{dt} = \alpha V_c^2 - \alpha (V^*)^2, \text{ если } t > t^* , \tag{13}$$

где $V^* = V_c + DV$.

Скорость судна определяется уравнением

$$V_t = \begin{cases} \text{equation (8)}, t \leq t^* ; \\ V^* + a^* (t - t^*), \; t > t^* , \end{cases} \tag{14}$$

где $a^* = \alpha (V_c^2 - (V_c + DV)^2)$.

Пройденное расстояние определяется уравнением:

$$S_t = \begin{cases} \text{equation (9)}, t \leq t^* ; \\ S(t^*) + V^* (t - t^*) + \frac{1}{2} a^* (t - t^*)^2, \; t > t^* . \end{cases} \tag{15}$$

2. Маневр скоростью — изменение скорости судна от значения V_0 до значения ноль (торможение).

При маневре торможения (команда STOP) модель упрощается и принимает следующий вид:
– ускорение: $a_t = -\alpha V_t^2$;

– скорость: $V_t = \dfrac{V_0}{\alpha V_0 t + 1}$;

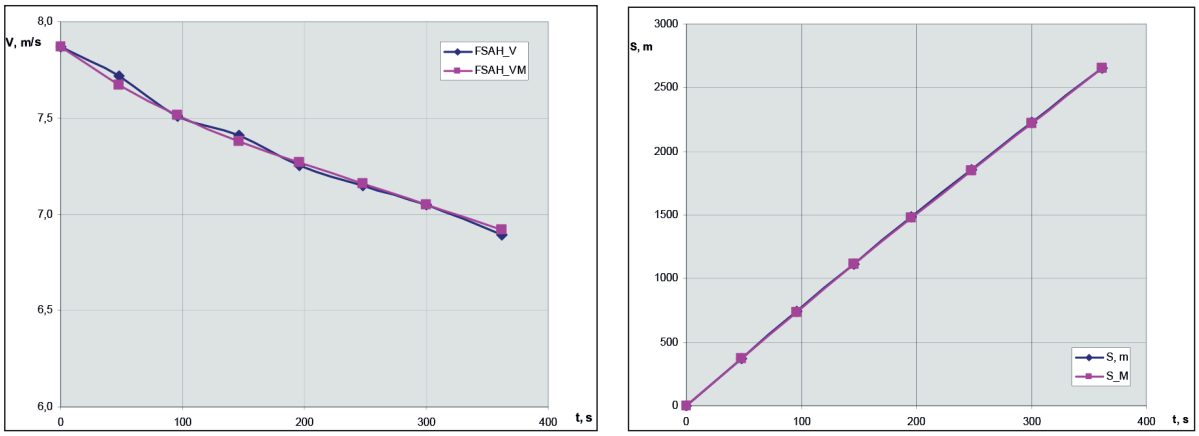
– время достижения скорости V_1: $t = \dfrac{V_0 - V_1}{\alpha V_0 V_1}$;

– расстояние, пройденное за время t: $S_t = \dfrac{1}{\alpha} \cdot \ln\left|\alpha V_0 t + 1\right|$.

Идентификация параметров математической модели динамики судна при маневре скоростью. В модели маневра скоростью используется два параметра: *DV* — минимальная разность скоростей; α — параметр торможения, который зависит от характеристик судна и подлежит идентификации.

Для идентификации указанных параметров используются данные, приведенные в разд. 4 МБ. По этим данным строятся образцовые зависимости скорости и расстояния от времени при маневрах изменения скорости. С использованием модели динамики судна при маневре изменения курса строятся модельные зависимости скорости и расстояния от времени. Затем параметры подбираются таким образом, чтобы минимизировать разности образцовых и модельных зависимостей. Примеры согласования образцовой и модельной зависимостей показаны, соответственно, на рис. 5.

а)



б)

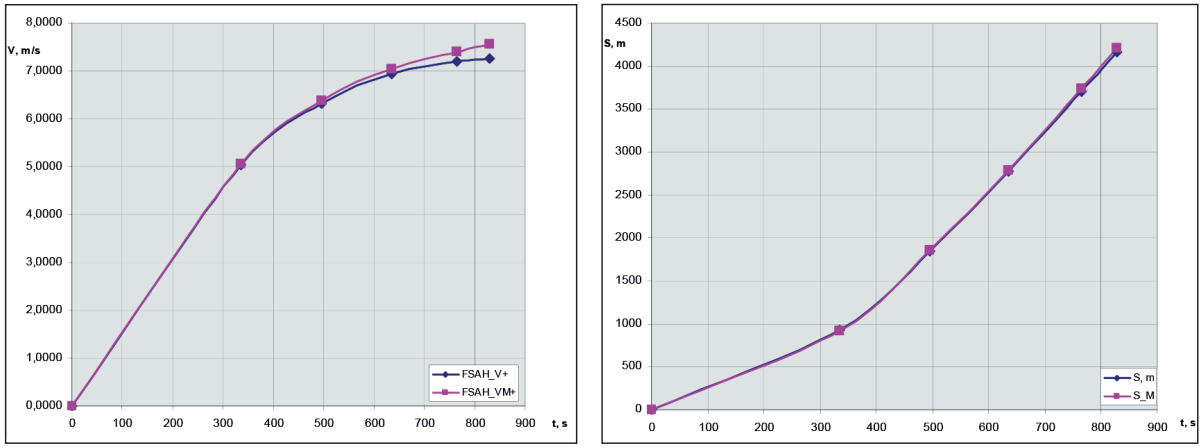


Рис. 5. Примеры согласования зависимостей:
а — для маневра FSAH – FAH; *б* — для маневра разгон от 0 до FSAH

Результаты (Results)

При моделировании движения судна по заданному маршруту возможны три варианта. Рассмотрим параметры движения для каждого из этих вариантов.

1-й вариант — движение постоянным курсом и скоростью K_0, V_0:

– ускорение: $a_t = 0$;

– скорость: $V_t = V_0$;

– курс: $K_t = K_0$;

– расстояние, пройденное за время t: $S_t = V_0 t$.

2-й вариант — маневр изменения скорости от V_0 до V_c при движении постоянным курсом K_0.

Маневр разбивается на два этапа:

– этап $B0$ — изменение скорости от V_0 до V^*, близкой к целевой скорости V_c

– этап $B1$ — изменение скорости от V^* до V_c.

Параметры движения следующие:

– скорость $V^* = V_c + DV$, где параметр DV — параметр модели;

– время достижения скорости V^*: $t^* = \frac{1}{2\alpha V_c}\left(\ln\left|\frac{V_0 - V_c}{V_0 + V_c}\right| + \ln\left|\frac{2V_c + DV}{DV}\right|\right)$;

– ускорение на этапе $B1$: $a^* = \alpha(V_c^2 - (V_c + DV)^2)$.

– время завершения маневра (достижения скорости V_c): $t_c = t^* + \frac{DV}{a^*}$;

– ускорение: $a_t = \begin{cases} \alpha V_c^2 - \alpha V_t^2, & t \le t^* \\ a^*, & t^* < t < t_c \end{cases}$;

– скорость: $V_t = \begin{cases} V_c \dfrac{\left(\frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} e^{2\alpha V_c t} + 1\right)}{\left(\frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} e^{2\alpha V_c t} - 1\right)}, & t \le t^* \\ V^* + a^*(t - t^*), & t^* < t < t_c \end{cases}$;

– курс: $K_t = K_0$;

– расстояние, пройденное за время t:

$$S_t = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left|\frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} e^{2\alpha V_c t} - 1\right| - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left|\frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} - 1\right| - V_c t, & t \le t^*; \\ S(t^*) + V^*(t - t^*) + \frac{1}{2} a^* (t - t^*)^2, & t^* < t < t_c; \end{cases}$$

– расстояние, пройденное на этапе B0:

$$S(t^*) = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left|\frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} e^{2\alpha V_c t^*} - 1\right| - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left|\frac{V_0 + V_c}{V_0 - V_c} - 1\right| - V_c t^*;$$

– общее расстояние, пройденное до завершения маневра:

$$S_c = S(t^*) + V^*(t_c - t^*) + \frac{1}{2} a^* (t_c - t^*)^2.$$

3-й вариант — маневр изменения курса с K_0 до K_c при движении с постоянной скоростью V_0.

Маневр разбивается на два этапа:

– этап A — изменение курса от K_0 до K_c в результате которого скорость падает до значения V_c;

– этап B — движение на новом курсе K_c и изменение скорости от V_c до V_0.

На этапе A судно движется по криволинейной траектории в соответствии с изложенной ранее моделью динамики судна при маневре курсом. Однако для определения конкретных параметров движения необходимо задать угол перекладки руля. При моделировании значение угла перекладки руля задается в зависимости от разности начального и конечного курсов ΔK:

$$\delta = \begin{cases} 5^\circ \text{ при } \Delta K \le 30^\circ; \\ 15^\circ \text{ при } 30^\circ < \Delta K \le 90^\circ; \\ 30^\circ \text{ при } \Delta K > 90^\circ. \end{cases}$$

В соответствии с этими значениями пересчитываются параметры модели динамики судна. При этом считаем, что угол дрейфа на участке А0 возрастает от 0 до значения β, а в конце маневра убывает до нуля. Изменение угла дрейфа считаем линейным.

Параметры движения судна на этапе *A* будут следующие:

в случае, если $\Delta K \le 90^\circ$:

– время движения на участке А0: $T_0 = S_0 / V_0$;

– ускорение $a_t = a_1$;

– угловая скорость $w_t = w_1$;

– скорость $V_t = V_0 + a_1(t - T_0)$;

– угол поворота по траектории движения с радиусом R_1: $\varphi_t = w_1(t - T_0)$;

– угол дрейфа: $\beta_t = \begin{cases} \varphi_t \text{ при } \varphi_t < \beta; \\ \beta \text{ при } \beta \le \varphi_t \le (K_c - \beta); \\ K_c - \varphi_t \text{ при } (K_c - \beta) < \varphi_t \le K_c; \end{cases}$

– курс $K_t = \varphi_t + \beta_t$;

в случае, если $90^\circ < \Delta K \le 180^\circ$:

– время движения на участке А0 + А1: $T_1 = T_0 + 90 / w_1$;

– ускорение $a_t = a_2$;

– угловая скорость $w_t = w_2$;

– скорость $V_t = V_1 + a_2(t - T_1)$;

– угол поворота по траектории движения с радиусом R_2: $\varphi_t = w_2(t - T_1)$;

– угол дрейфа: $\beta_t = \begin{cases} \beta \text{ при } \beta \le \varphi_t \le (K_c - \beta); \\ K_c - \varphi_t \text{ при } (K_c - \beta) < \varphi_t \le K_c; \end{cases}$;

– курс $K_t = \varphi_t + \beta_t$;

в случае, если $180^\circ < \Delta K \le 360^\circ$:

– время движения на участке А0 + А1 + А2: $T_2 = T_1 + 90 / w_2$;

– ускорение $a_t = a_3$;

– угловая скорость $w_t = w_3$;

– скорость $V_t = V_2 + a_3(t - T_2)$;

– угол поворота по траектории движения с радиусом R_3: $\varphi_t = w_3(t - T_2)$;

– угол дрейфа $\beta_t = \begin{cases} \beta \text{ при } \beta \le \varphi_t \le (K_c - \beta); \\ K_c - \varphi_t \text{ при } (K_c - \beta) < \varphi_t \le K_c; \end{cases}$;

– курс $K_t = \varphi_t + \beta_t$.

Параметры движения судна на этапе *B* будут следующие:

– курс $K_t = K_c$;

– угловая скорость $w_t = 0$;

– начальная скорость на этапе *B* равна конечной скорости на этапе *A*: V_1;

– конечная скорость этапа *B* равна скорости начала маневра изменения курса: $V_c = V_0$;

– текущее ускорение и скорость, а также время завершения маневра и пройденное расстояние определяются по модели маневра изменения скорости от скорости V_1 до V_0 в соответствии с упрощенной математической моделью динамики судна при маневрировании скоростью.

Обсуждение (Discussion)

Модель динамики судна, предложенная в данной работе, по точности не уступает модели, рассматриваемой в работе авторов [9] при условии корректной идентификации ее параметров.

Модель [9] является интегрирующей, то есть для получения значений параметров движения судна в заданный момент времени необходимо выполнить расчет параметров в промежуточных положениях судна с определенным шагом. Для этого требуются достаточно большие вычислительные мощности, особенно в случае, когда необходимо просчитывать параметры движения многих судов или параметры различных вариантов траектории собственного судна при выборе маневра в системе безопасного расхождения судов. Кроме того, точность полученных результатов зависит от выбранного шага интегрирования.

Преимущество предложенной модели состоит в том, что она позволяет аналитически рассчитать параметры движения судна для любого заданного момента времени, что позволяет быстрее находить решения, особенно в случае обработки большого количества траекторий.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе предложена простая модель динамики судна при маневрировании курсом и скоростью. С помощью этой модели можно оперативно получать параметры движения судна в любой заданный момент времени после начала маневра или рассчитывать время прихода в заданную точку траектории маневра. Параметры модели для конкретного судна могут быть легко получены из стандартного «Маневренного буклета» этого судна в соответствии с предложенной авторами методикой.

2. Представленная модель динамики судна может быть использована в системах предупреждения столкновений судов и любых других системах управления, в которых необходимо прогнозировать движение судна при маневрировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смоленцев С. В.* Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов / С. В. Смоленцев, Б. В. Афанасьев, А. Е. Филяков, Д. В. Куниц // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14.

2. *Позняков С. И.* Сравнение математических моделей с точки зрения коэффициентов влияния / С. И. Позняков, Ю. И. Юдин // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 2. — С. 241–245.

3. *Юдин Ю. И.* Маневренные характеристики судна как функции параметров его математической модели / Ю. И. Юдин, С. И. Позняков // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 2. — С. 234–239.

4. *Дегтярёв А. Б.* Информационная поддержка моделирования динамики судна в бортовой интеллектуальной системе / А.Б. Дегтярёв, М.С. Мьо // Морские интеллектуальные технологии. — 2012. — № 4 (18). — С. 34–38.

5. *Цветов М. А.* Анализ моделей движения и методов определения координат корабля / М. А. Цветов, А.Н. Васильев // Вестник Ульяновского государственного технического университета. — 2003. — № 1–2 (21–22). — С. 59–63.

6. *Sutulo S.* Mathematical models for simulation of manoeuvring performance of ships / S. Sutulo, C. Guedes Soares // Marine Technology and Engineering. — London: Taylor & Francis Group, 2011. — Pp. 661–698.

7. *Abdel-latif S.* Simulation of ship maneuvering behavior based on the modular mathematical model / S. Abdel-latif, M. Abdel-Geliel, E. E. Zakzouk // Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference on. — IEEE, 2013. — Pp. 94–99. DOI: 10.1109/MED.2013.6608704.

8. *Wang X.G.* System identification modelling of ship manoeuvring motion based on support vector regression / X.G. Wang, Z.J. Zou, X.R. Hou, F. Xu // Journal of Hydrodynamics. — 2015. — Vol. 27. — Is. 4. — Pp. 502–512. DOI: 10.1016/S1001-6058(15)60510-8.

9. *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.

10. Представление на судах информации об их маневренных характеристиках. Резолюция ИМО А.601(15). — СПб: ЦНИИМФ, 2001.

11. RESOLUTION MSC.137(76). Standards for ship manoeuvrability [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.137(76).pdf (дата обращения: 25.11.2018).

12. MSC/Circ.1053. Explanatory notes to the standards for ship manoeuvrability. — London: International Maritime Organization, 2002. — 41 p.

13. *Смоленцев С. В.* Принципы создания упрощенной модели динамики судна по данным маневренного буклета / С.В. Смоленцев, Д.В. Исаков // Сборник тезисов докладов национальной ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — СПб: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 67–70.

REFERENCES

1. Smolentsev, S. V., B. V. Afanasiev, A.E. Filyakov, and D.V. Kunits. “Concept of automated intelligent system for ships collision avoidance.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(70) (2012): 11–14.

2. Poznjakov, S. I., and J. I. Judin. “Sravnenije matematicheskich modeley s tochki zrenija koeffizientov vlijanija.” *Vestnik MGTU* 9.2 (2006): 241–245.

3. Judin, J. I., and S. I. Poznjakov. “Manevrennie characteristiki sudna kak funkzii parametrov ego matematicheskoy modeli.” *Vestnik MGTU* 9.2 (2006): 234–239.

4. Degtyarev, A. B., and M. S. M’o. “Informatsionnaya podderzhka modelirovaniya dinamiki sudna v bortovoi intellektual’noi sisteme.” *Morskie intellektual’nye tekhnologii* 4(18) (2012): 34–38.

5. Tzvetov, M. A., and A. N. Vasiliev. “An Analysis of Moving Models and Ship Coordinate Determination Methods.” *Vestnik UlGTU* 1-2(21-22) (2003): 59–63.

6. Sutulo, Serge, and C. Guedes Soares. “Mathematical models for simulation of manoeuvring performance of ships.” *Marine Technology and Engineering.* London: Taylor & Francis Group, 2011: 661–698.

7. Abdel-latif, S., M. Abdel-Geliel, and E. Eldin Zakzouk. “Simulation of ship maneuvering behavior based on the modular mathematical model.” *Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference on*. IEEE, 2013. 94–99. DOI: 10.1109/MED.2013.6608704

8. Wang, Xue-Gang, Zao-Jian Zou, Xian-Rui Hou, and Feng Xu. “System identification modelling of ship manoeuvring motion based on ε-support vector regression.” *Journal of Hydrodynamics* 27.4 (2015): 502–512. DOI: 10.1016/S1001-6058(15)60510-8.

9. 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): Необходимо заменить на: 1111–1121. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1111-1121.

10. *Provision and display of manoeuvring information on board ships. IMO Resolution A.601(15).* SPb:ZNIIMF, 2001.

11. *Resolution* MSC.137(76). Standards for ship manoeuvrability. Web. 25 Nov. 2018 <http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.137(76).pdf>.

12. *MSC/Circ.1053. Explanatory notes to the standards for ship manoeuvrability.* London: International Maritime Organization, 2002.

13. Smolentsev, S. V., and D. V. Isakov. “Printsipy sozdaniya uproshchennoi modeli dinamiki sudna po dannym manevrennogo bukleta.” *Sbornik tezisov dokladov natsional’noi ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel’skogo sostava GUMRF imeni admirala S.O. Makarova*. SPb: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2017. 67–70.

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*

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*

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*

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*

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2019 г.
Received: February 4, 2019.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-22-32

USE OF CLARIFIED MATHEMATICAL MODELS FOR PRACTICAL PROBLEMS OF NAVIGATION

A. A. Ershov, A. A. Malkov

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

The article is aimed at improving traffic safety in narrows and when entering ports in strong winds. The proposed methods of mathematical models clarification according to field observations allow using them for all ships, including those for which tests have never been carried out in wind tunnels. Proposed in the paper approaches to carry out field observations to clarify the mathematical models can be directly used before the passage of the vessel in the narrows, as well as at entering the ports in wind conditions. In this case, the status of vessels loading and the wind-wave conditions of the forthcoming maneuver operations are more accurately taken into account. The solution of practical problems with the use of clarified mathematical models ensures the most accurate results for specific conditions of the vessel movement in the wind conditions. Proposed in the paper field observations on the mathematical models clarification can be made after the vessel leaving for the voyage under specific loading conditions and deck cargo condition, as well as directly before the ship pilotage through the narrows and approaches to the port in wind conditions. This allows you to take into account the features of a specific vessel passage and ensure the most accurate result. Carrying out field observations to clarify the mathematical models of the vessel in the voyage can reduce the cost of mathematical models creation, including the cost of carrying out such expensive measures as "purge" the vessel models in wind tunnels. The strong wind caused the cancellation of the expected approach to St. Petersburg of the Celebrity Silhouette liner with three thousand passengers on Board in July 2018. The ship was supposed to arrive in the northern capital, but stopped at the dam. As a result, after staying at Kronstadt for a day the liner headed for the German Rostock. At the same time, the Celebrity Silhouette was not the only liner that was supposed to arrive in St. Petersburg on that day; the rest of the vessels safely passed through the fairways and channels of the Gulf of Finland and entered the port. However, the captain of Celebrity Silhouette announced that it was not safe to enter the port and refused to enter the port of St. Petersburg, which led to numerous losses. The reason for such a decision was that the captain of Celebrity Silhouette did not know the vessel speed on the fairway in strong wind conditions, which would allow him to"keep" the ship in the safe dimensions of its width. The proposed in the paper scientific and practical justification of the possibility of increasing the vessel's speed to overcome the wind on the rectilinear sites of channel or fairway can contribute to the solution of this problem. Practical problems with the use of clarified mathematical models describing the vessel movement in wind conditions, allow us to reliably justify the safety conditions, including an increase in the vessel's speed when the wind strengthens. This will allow you to make the right decisions about the ship's calls at specific ports.

Keywords: ship movement in wind conditions, clarification of mathematical models, solution of practical problems, increase in the vessel's speed in wind conditions.

For citation:
Ershov, Andrey A., and Alexander A. Malkov. "Use of clarified mathematical models for practical problems of navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 22–32. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-22-32.

УДК 656.61.052

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УТОЧНЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ СУДОВОЖДЕНИЯ

А. А. Ершов, А. А. Мальков

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

Статья направлена на повышение безопасности движения в узкостях и при заходах в порты при сильном ветре. Предложенные в настоящей статье методики уточнения математических моделей по данным

натурных наблюдений позволяют использовать их для всех судов, в том числе для тех, для которых никогда не проводились испытания в аэродинамических трубах. Подходы к проведению натурных наблюдений для уточнения математических моделей, предложенные в настоящей статье, могут использоваться непосредственно перед проведением проходов судна в узкостях, а также при заходах в порты в условиях ветра. В этом случае более точно учитывается состояние загрузки судна и ветроволновых условий предстоящих маневренных операций. Решение практических задач с использованием уточненных математических моделей гарантирует получение наиболее точных результатов для конкретных условий движения судна в условиях ветра. Предложенные в настоящей статье натурные наблюдения по уточнению математических моделей могут проводиться после выхода судна в рейс в условиях конкретной загрузки и состояния палубного груза, а также непосредственно перед проведением проходов судна в узкостях и подходах к порту в условиях ветра. Это позволяет максимально учитывать особенности конкретного прохода судна и гарантировать получение наиболее точного результата. Проведение натурных наблюдений по уточнению математических моделей судна в рейсе дает возможность снизить затраты на создание математических моделей, в том числе на проведение таких дорогостоящих мероприятий, как «продувка» моделей судов в аэродинамических трубах. Отмечается, что причиной отмены ожидаемого захода в Санкт-Петербург лайнера Celebrity Silhouette, на борту которого в июле 2018 г. находилось три тысячи пассажиров, явился сильный ветер. Лайнер должен был прибыть в северную столицу, однако «встал» у дамбы. В итоге, пробыв у Кронштадта сутки, он взял курс на немецкий Росток. При этом в тот день он был не единственным лайнером, который должен был прибыть в Санкт-Петербург, остальные суда благополучно прошли по фарватерам и каналам Финского залива и вошли в порт. Однако капитан лайнера Celebrity Silhouette сообщил об отказе от захода в порт Санкт-Петербург, что привело к многочисленным убыткам. Причиной принятия такого решения явилось то, что капитану судна были неизвестны значения скорости движения судна по фарватеру в условиях сильного ветра, которые позволили бы ему «удерживать» судно в безопасных габаритах его ширины. В результате проведенного исследования в статье сделан вывод о том, что решению данной задачи могут способствовать научное и практическое обоснования возможности увеличения скорости судна для преодоления ветра на прямолинейных участках канала или фарватера. Установлено также, что практические задачи с использованием уточненных математических моделей, описывающих движение судна в условиях ветра, позволяют надежно обосновывать условия безопасности, в том числе увеличение скорости судна при усилении ветра, что даст возможность принимать верные решения о заходах судна в конкретные порты.

Ключевые слова: движение судна в условиях ветра, уточнение математической модели, решение практических задач, увеличение скорости судна в условиях ветра.

Для цитирования:
Ершов А. А. Использование уточненных математических моделей для решения практических задач судовождения / А. А. Ершов, А. А. Мальков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 22–32. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-22-32.

Введение (Introduction)

Развитие современных технологий и включение математических моделей практически во всех сферах деятельности современного судна обуславливают решение вопроса о достоверности результатов и соответствия математической модели изменяющейся окружающей обстановке. Это особенно важно, когда математическое моделирование прогнозирует режимы безопасного движения судна в условиях ветра и волнения. При решении задач обеспечения безопасности судна в условиях ветра наиболее важным элементом математических моделей являются аэродинамические силы и моменты, действующие на надводную часть корпуса судна. В условиях переменной палубной загрузки судна или плохообтекаемой надводной части аэродинамические силы и моменты изменяются. Указанные составляющие математических моделей при движении судна в узкостях при сильном ветре в максимальной степени определяют его безопасность.

Анализ аварий, произошедших с судами в российских и иностранных портах и при подходах к ним, показывает, что многие из них явились результатом посадок на мель, навалов на суда и другие объекты в условиях ветра. Иногда при сильном ветре судно отказывается от захода в порт из-за того, что капитан не уверен в возможности обеспечить безопасность своего судна. Такой случай произошел летом 2018 г. в Санкт-Петербурге с лайнером *Celebrity Silhouette*. Заходящее пассажирское судно должно было осуществлять движение по ограниченным по ширине подходным каналам и фарватерам порта Санкт-Петербург. Движение необходимо было осуществлять

в условиях ветра, достигавшего скорости 18 м/с. Отсутствие необходимой информации о безопасных режимах движения в этих условиях способствовали решению капитана *Celebrity Silhouette* отказаться от захода в порт.

Вопросу решения задач безопасности судов в узкостях и при швартовках в условиях ветра посвящены многочисленные научные исследования. Так, в работах [1] – [3] авторами предлагалось для этих целей рассчитывать специальные диаграммы (планшеты) управления судном при швартовках в условиях ветра. Подобные задачи рассматривались в источниках [4] – [7] и др. В работе [4] предлагалась процедура проведения натурного эксперимента для проверки и уточнения заранее рассчитанных диаграмм (планшетов) управления судном. В работах [6] – [10] рассматривались различные задачи безопасности судов в узкостях и в условиях чрезмерного сближения с другими судами. Комплексные задачи обеспечения безопасности движения судов в узкостях и при подходах к портам решались в работе [11]. В иностранных работах данные проблемы рассматривались в источниках [12], [13].

Существенным недостатком вышеуказанных и других работ в данной области являлось то, что коэффициенты аэродинамических сил и моментов, входящие в уравнения движения судна при математическом моделировании, оставались неизменными, соответствующими полученным для аналогичных судов по результатам специальных испытаний в аэродинамических трубах («продувок»). Конкретные характеристики надводной части судна при изменении загрузки палубным грузом и особенностей ее обтекания при реальных осадках судна в этом случае не учитываются. В условиях ветра эти погрешности могут приводить к существенным ошибкам в результатах математического моделирования и, как следствие, лишать судоводителя уверенности при управлении судном в условиях ветра. В работах [14], [15] предлагался метод уточнения составляющих математических моделей, связанных с движением судна в условиях ветра по данным натурных испытаний и наблюдений, осуществляемых непосредственно перед выполнением маневра в условиях конкретной загрузки судна, а также направлений и скоростей ветра.

В настоящей работе предлагается практический способ получения и использования уточнённых математических моделей для решения актуальных практических задач судовождения, связанных с движением судна в условиях ветра.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Метод, предложенный в работах [14], [15], позволяет уточнять аэродинамические характеристики при каждом выходе судна в рейс и, следовательно, открывает большие возможности использования методов математического моделирования для прогноза движения судна и решения практических задач судовождения в условиях ветра.

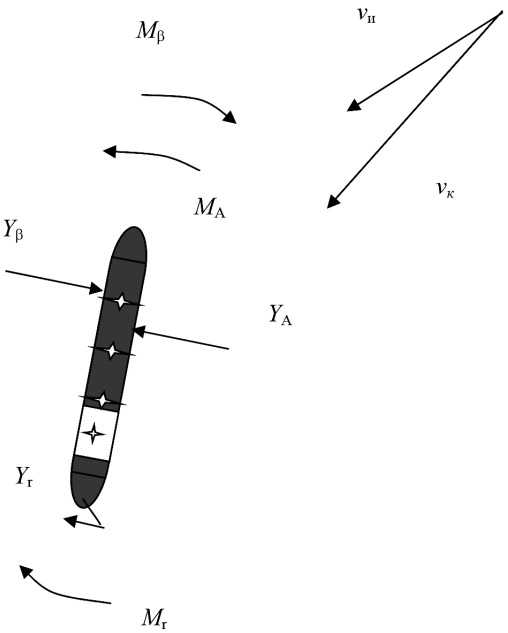


Рис. 1. Расчетная схема для уравнений движения судна в условиях ветра

Сущность данного метода состоит в следующем. Уравнения движения судна с разнородным палубным грузом или плохообтекаемой надстройкой (например, пассажирского судна или газовоза) в условиях ветра с постоянной скоростью могут быть записаны следующим образом (рис. 1):

$$Y_\beta - Y_A - Y_r = 0;$$

$$M_\beta - M_A - Y_r lr = 0, \qquad (1)$$

где Y_β — проекция гидродинамической силы на ось Y, связанную с движением судна, кН;

Y_A — проекция аэродинамической силы на ось Y, кН;

Y_r — проекция боковой силы на руле на ось Y, кН;

M_β и M_A — моменты гидро- и аэродинамических сил, кН·м;

l_r — отстояние баллера руля от центра тяжести (ЦТ) судна, м.

Раскроем выражения, входящие в систему (1):

$$C_{Y\beta}\frac{\rho v^2}{2}A_{l\sigma}-C_{YA}\frac{\rho_a v_к^{\,2}}{2}A_{VL}-C_{YR}^{\alpha}\left(\delta-\mu\beta\right)\frac{\rho v^2}{2}A_R=0;$$

$$C_{M\beta}\frac{\rho v^2}{2}A_{l\sigma}L-C_{MA}\frac{\rho_a v_к^{\,2}}{2}A_{VL}L+C_{YR}^{\alpha}\left(\delta-\mu\beta\right)\frac{\rho v^2}{2}A_R lr=0, \qquad (2)$$

где $C_{Y\beta}$ — коэффициент позиционной силы корпуса;

$C_{M\beta}$ — коэффициент позиционного момента корпуса;

$A_{L\sigma}$ — приведенная площадь погруженной части ДП судна, м^2;

C_{YA} — коэффициент нормальной составляющей силы ветра;

C_{MA} — коэффициент ветрового момента корпуса;

A_{vL} — площадь проекции надводной части судна на продольную вертикальную плоскость;

L — длина судна по действующей ватерлинии, м;

v — скорость движения судна, м/с;

$v_к$ – скорость кажущегося ветра, м/с;

μ — коэффициент влияния корпуса;

β — угол дрейфа судна, рад;

δ — угол перекладки руля, рад;

A_r — площадь руля, м^2;

ρ — плотность воды, кг/м^3;

ρ_a — плотность воздуха, кг/м^3.

Из выражений (2) могут быть получены уравнения для определения C_{YA} и C_{MA}:

$$C_{YA}=\frac{C_{Y\beta}\frac{\rho v^2}{2}A_{l\sigma}-C_{YR}^{\alpha}\left(\delta-\mu\beta\right)\frac{\rho v^2}{2}A_R}{\frac{\rho_a v_к^{\,2}}{2}A_{VL}};$$

$$C_{MA}=\frac{C_{M\beta}\frac{\rho v^2}{2}A_{l\sigma}L-+C_{YR}^{\alpha}\left(\delta-\mu\beta\right)\frac{\rho v^2}{2}A_R lr}{\frac{\rho_a v_к^{\,2}}{2}A_{VL}L}. \qquad (3)$$

Уравнения (3) могут быть использованы для уточнения аэродинамических характеристик C_{YA} и C_{MA} по данным натурных испытаний или наблюдений за движением судна в эксплуатации.

В работах [16] показано, что для определения аэродинамических характеристик могут быть использованы следующие выражения:

$$C_{YA}=K\sin\gamma_к;$$

$$C_{MA}=C_{YA}(0{,}25+b_0-\frac{\gamma_к}{360})=K\sin\gamma_к\left(0{,}25+b_0-\frac{\gamma_к}{360}\right), \qquad (4)$$

где $\gamma_к$ — угол кажущегося ветра, град;

b_0 — относительное отстояние от миделя центра парусности.

С учетом уравнений (4) выражения (3) могут быть представлены в следующем виде:

$$K=\frac{C_{Y\beta}\frac{\rho v^2}{2}A_{l\sigma}-C_{YR}^{\alpha}\left(\delta-\mu\beta\right)\frac{\rho v^2}{2}A_R}{\frac{\rho_a v_к^{\,2}}{2}A_{VL}\sin\gamma_к};$$

$$K=\frac{C_{M\beta}\frac{\rho v^2}{2}A_{l\sigma}L-+C_{YR}^{\alpha}\left(\delta-\mu\beta\right)\frac{\rho v^2}{2}A_R lr}{\frac{\rho_a v_к^{\,2}}{2}A_{VL}L\sin\gamma_к\left(0{,}25+b_0-\frac{\gamma_к}{360}\right)}. \qquad (5)$$

Таким образом, оба уравнения системы (5) могут быть использованы для определения и уточнения коэффициента K, входящих в выражения для C_{YA}, C_{MA} (см. выражения (4)). В работах [16], [17] рекомендуется принимать значение $K = 1{,}05$, которое может быть принято в качестве исходного для проведения уточнения по данным натурных испытаний или наблюдений.

Для проведения наблюдений или натурных испытаний необходимо определение следующих величин v, $v_к$, β. Скорость судна v может быть определена по лагу или обсервациям, скорость $v_к$ и направление $\gamma_к$ кажущегося ветра можно определить с использованием судовых приборов, угол дрейфа β может быть определен с использованием текущих обсерваций судна как разница между путевым углом и курсом судна. Если натурные наблюдения проводятся с целью уточнения конкретных аэродинамических характеристик при постоянном значении курса (курсового угла ветра) $\gamma_к$, то могут быть использованы уравнения (3). Это позволяет накапливать данные по C_{YA}, C_{MA} в процессе конкретного рейса для различных значений $\gamma_к$ и уточнять данные по большему диапазону значений курсовых углов ветра.

С целью практического использования уравнений (3), (5) необходимо определение гидродинамических характеристик судна и рулевого устройства судна при данном варианте загрузки. Для этих целей могут быть использованы известные методики, рассмотренные в источниках [16], [17]. Предлагаемый метод был применен на судне-газовозе с плохообтекаемой надстройкой для определения коэффициента K (см. выражения (4), (5)) в условиях ветра. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты натурных измерений и расчетов коэффициента *K* на судне-газовозе с плохообтекаемой надстройкой

Номер измерения и расчета	Угол кажущегося ветра $\gamma_к$, град	Значение коэффициента K
1	15	1,185
2	18	1,187
3	120	1,186
4	130	1,185
5	90	1,038

Как показали результаты натурных наблюдений и расчетов по выражениям (4), (5), проведенных на вышеуказанном судне-газовозе, наибольшее отклонение от обычно рекомендуемого значения коэффициента ($K = 1{,}05$) возникает на носовых и кормовых курсовых углах ветра. Как следует из теории и практики судовождения, на кормовых углах ветра возникают наибольшие трудности при управлении судном, а максимальная величина сноса бокового сноса судна возникает при углах кажущегося ветра, близких к 90 град, что создает особую опасность при плавании в узкостях и при движении по ограниченным по ширине подходным каналам и фарватерам, а также может привести к отказу судна от захода в порт в условиях сильного ветра.

Сильный ветер явился причиной отмены ожидаемого захода в Санкт-Петербург лайнера *Celebrity Silhouette* на борту в июле 2018 г., который должен был прибыть в северную столицу, но неожиданно «встал» у дамбы. Пробыв у Кронштадта сутки, он взял курс на немецкий Росток. При этом в тот день он был не единственным лайнером, который должен был прибыть в порт Санкт-Петербург, остальные суда благополучно прошли по фарватерам и каналам Финского залива и вошли в порт. Однако капитан лайнера *Celebrity Silhouette* сообщил о том, что заходить в порт Санкт-Петербург небезопасно, в результате данное решение привело к многочисленным убыткам. Причиной принятия такого решения явилось то, что капитану судна были неизвестны значения скорости движения судна по фарватеру в условиях сильного ветра, которые позволили бы ему удерживать судно в безопасных габаритах его ширины.

Решению задачи безопасного захода в порт крупнотоннажного лайнера может способствовать научное и практическое обоснование возможности увеличения скорости судна для преодоления ветра на прямолинейных участках канала или фарватера. Суть подобной практической задачи

состоит в следующем. Проход любого крупнотоннажного судна приемного буя до пассажирских причалов морского порта Санкт-Петербург может занимать 3–5 ч. При этом большая часть проходит по прямолинейным участкам каналов и фарватеров. В течение этого времени могут произойти изменения метеорологической обстановки, и любое судно может оказаться в условиях порывистого ветра, в полтора-два раза превосходящих средние значения. Для судна с большой парусностью, к которым относятся пассажирские суда и газовозы, такое увеличение скорости ветра может привести к смещению судна с оси фарватера, посадке на бровку, навалу на другие суда и другим аварийным ситуациям. Для преодоления усиления скорости и / или порывов ветра может быть предложено увеличение скорости судна.

Теоретическое обоснование возможности увеличения скорости для преодоления усиления ветра может быть выполнено следующим образом. Из уравнения (2) может быть получено выражение

$$C_{M\beta}\frac{\rho v^2}{2}A_{l\sigma}L - C_{MA}\frac{\rho_a v_к^{\ 2}}{2}A_{VL}L + \left(C_{YA}\frac{\rho_a v_к^{\ 2}}{2}A_{L\sigma} - C_{Y\beta}\frac{\rho v^2}{2}A_{L\sigma}\right)lr = 0 \qquad (6)$$

или после преобразований —

$$C_{M\beta}\frac{\rho v^2}{2}A_{l\sigma}L + C_{Y\beta}\frac{\rho v^2}{2}A_{l\sigma}lr = C_{MA}\frac{\rho_a v_к^{\ 2}}{2}A_{VL}L + C_{YA}\frac{\rho_a v_к^{\ 2}}{2}A_{VL}lr, \qquad (7)$$

Составляющие, входящие в правую часть уравнения (7), зависят от скорости кажущегося ветра: при увеличении скорости ветра увеличивается значение его правой части. Для соблюдения равенства правой и левой части уравнения выражения при постоянной скорости движения судна необходимо увеличение коэффициентов гидродинамических сил и моментов $C_{M\beta}$, $C_{Y\beta}$, входящих в левую часть уравнения (7), которые, в свою очередь, зависят от угла дрейфа судна. Следовательно, угол дрейфа судна должен увеличиться, и судно начнет смещаться с оси канала. Плотность воды ρ, входящая в выражения в левой части уравнения (7), приблизительно в 816 больше плотности воздуха ρ_a, которая входит в выражения в правой части уравнения. Таким образом, даже незначительное увеличение скорости движения судна v, входящей в левую часть уравнения (7), позволит преодолеть значительное увеличение скорости кажущегося ветра $v_к$, входящей в правую часть уравнения. При этом угол дрейфа судна не увеличится, а судно останется в безопасной ширине канала.

Для определения необходимого увеличения скорости судна δv на прямолинейном участке канала или фарватера при увеличении скорости ветра может быть использовано следующее выражение, являющееся следствием уравнения (7):

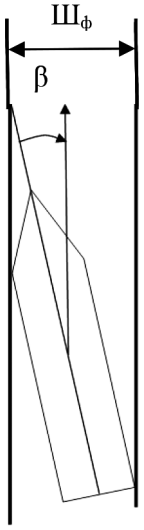


Рис. 2. Расчетная схема для определения угла дрейфа β с использованием ширины фарватера ($Ш_ф$)

$$\delta v = \sqrt{\frac{\rho_a v_к^{\ 2}\left(C_{MA}L + C_{YA}lr\right)A_{VL}}{\rho\left(C_{M\beta}L + C_{Y\beta}lr\right)A_{l\sigma}}} - v, \qquad (8)$$

где v — начальная скорость движения судна, м/с;

$v_к$ — скорость кажущегося ветра, м/с;

δv — необходимое увеличение скорости судна, м/с.

Для определения необходимого угла дрейфа β, от которого зависят величины $C_{Y\beta}$, $C_{M\beta}$, входящие в выражение (8), может быть использована схема, приведенная на рис. 2.

По известной безопасной ширине канала или фарватера определяется максимальный угол дрейфа β, который может иметь судно для того, чтобы уложиться в заданную ширину. Для этого может быть использовано выражение (9), полученное из рис. 2:

$$Ш_ф = L\sin\beta + B\cos\beta, \qquad (9)$$

где $Ш_ф$ — безопасная для данного судна ширина канала или фарватера, м;

L — длина судна, м; B — ширина судна, м;

β — угол дрейфа судна, град.

С учетом малости значения угла дрейфа, который может обеспечить безопасное прямолинейное движение судна по фарватеру заданной ширины, формула (9) может быть преобразована к следующему виду:

$$Ш_ф = L \sin\beta + B\,\beta, \tag{10}$$

откуда необходимый угол дрейфа для удержания судна в заданной полосе фарватера может быть определен в виде

$$\beta = \arcsin\frac{Ш_ф - B}{L}57{,}3. \tag{11}$$

Последовательность расчёта с использованием выражения (8):

1. Перед предстоящим проходом по прямолинейному участку канала или фарватера в условиях ветра с использованием уравнений (3) уточняются значения C_{YA}, C_{MA} или с использованием выражений (4), (5) уточняется значение коэффициента K для данного состояния судна.

2. С использованием навигационной карты определяется безопасная для данного судна ширина канала или фарватера $Ш_ф$.

3. С использованием уравнения (11) определяется угол дрейфа β для удержания судна в заданной ширине фарватера.

4. С использованием методик, рассмотренных в работе [2], для данного угла дрейфа β определяются значения величин $C_{Yβ}$ и $C_{Mβ}$.

5. Для измеренных скоростей $v_к$ и известной скорости судна v по уравнению (8) определяется необходимое увеличение скорости судна δv для удержания судна в безопасной для данного судна ширине канала или фарватера $Ш_ф$.

Пример расчета необходимого увеличения скорости δv для удержания судна-газовоза с плохообтекаемой надстройкой в безопасной полосе $Ш_ф$ в зависимости от скорости кажущегося ветра $v_к$ с курсовым углом ветра 90 град приведен на рис. 3.

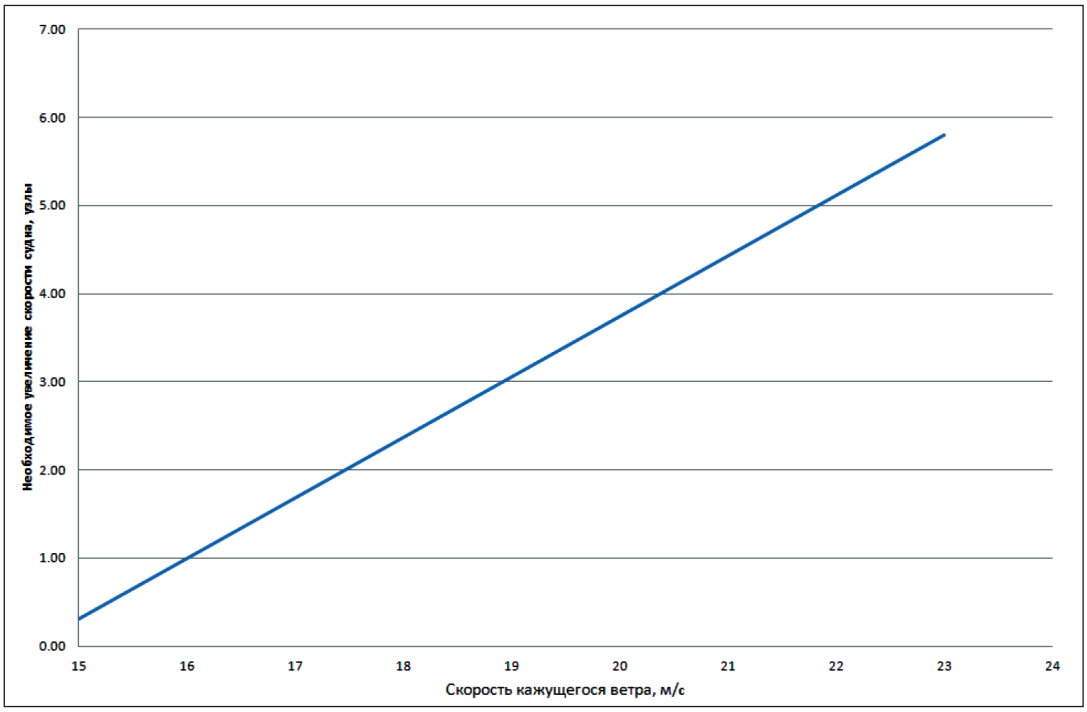


Рис. 3. Необходимое увеличение скорости судна-газовоза для удержания в полосе заданной ширины, уз (начальная скорость движения судна: v = 10 уз, $v_к$ = 15 м/с, курсовой угол ветра 90 град)

Таким образом, если бы информация, подобная представленной на рис. 3, была в распоряжении капитана лайнера *Celebrity Silhouette* в июле 2018 г., то он мог бы принять более обоснованное решение по заходу в порт Санкт-Петербург в условиях сильного ветра.

Результаты (Results)

Для подтверждения достоверности и практической применимости основных положений настоящей статьи были проведены специальные наблюдения и расчеты на судне-газовозе с плохообтекаемой надстройкой. Результаты расчетов, представленные на рис. 3, показали возможность увеличения скорости судна, полученного по выражению (8), при увеличении скорости кажущегося ветра с курсовым углом 90 град.

Анализ результатов расчетов, проведенных по уравнениям (9)–(11), показал, что значения углов дрейфа β, необходимые для обеспечения безопасного движения в полосе движения с заданной шириной $Ш_ф$, не превышают значений 10 град. Это позволяет надежно применять методики [2] для определения гидродинамических характеристик $C_{Yβ}$, $C_{Mβ}$ (см. уравнения (3), (5), (8)), что и предлагается в настоящей статье.

Анализ результатов уточнения аэродинамических характеристик с использованием натурных наблюдений показывает возможность их применения в уравнении (8), полученном по результатам наблюдений значений C_{YA}, C_{MA}, без проведения испытаний модели судна в аэродинамической трубе. Это позволяет применять предложенную в настоящей статье последовательность расчета с использованием уравнения (8) для всех судов, в том числе для тех из них, для которых никогда не проводились аэродинамические испытания.

Таким образом, ранее изложенное подтверждает, что предложенные в настоящей статье методики могут быть использованы в составе навигационного оборудования судов с целью предотвращения опасных ситуаций, а также служат надежным обоснованием решения об отказе от захода в порт конкретного судна в условиях сильного ветра.

Обсуждение (Discussion)

Полученные в настоящей статье выводы совпадают с данными других авторов о возможности использования в составе навигационного оборудования современных судов математических моделей, позволяющих решать сложные задачи по управлению судном в узкостях и при заходах в порты при сильном ветре.

Предложенные в настоящей статье методики уточнения математических моделей по данным натурных наблюдений позволяют использовать их для всех судов, в том числе для тех, для которых никогда не проводились испытания в аэродинамической трубе.

Подходы к проведению натурных наблюдений для уточнения математических моделей, предложенные в настоящей статье, могут использоваться непосредственно перед проведением проходов судна в узкостях, а также при заходах в порты в условиях ветра. В этом случае более точно учитывается состояние загрузки судна и ветроволновых условий предстоящих маневренных операций.

Решение практических задач с использованием уточненных математических моделей гарантирует получение наиболее точных результатов для конкретных условий движения судна в условиях ветра.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведение натурных экспериментов и наблюдений по уточнению математических моделей движения судна в условиях ветра является перспективным подходом к обеспечению безопасности движения судна в узкостях и подходах к портам.

2. Предложенные в настоящей статье натурные наблюдения по уточнению математических моделей могут проводиться после выхода судна в рейс в условиях конкретной загрузки и состояния палубного груза, а также непосредственно перед проведением проходов судна в узкостях

и подходах к порту в условиях ветра. Это позволяет максимально учитывать особенности конкретного прохода судна и гарантировать получение наиболее точного результата.

3. Проведение натурных наблюдений по уточнению математических моделей судна в рейсе позволяет снизить затраты на создание математических моделей, в том числе на проведение таких дорогостоящих мероприятий, как «продувка» моделей судов в аэродинамических трубах.

4. Практические задачи с использованием уточненных математических моделей, описывающих движение судна в условиях ветра, позволяют надежно обосновывать условия безопасности, в том числе увеличение скорости судна при усилении ветра. Все это позволит принимать верные решения при заходах судна в конкретные порты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ершов А. А.* Совершенствование управления судном при швартовках / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 3. — С. 132–134.

2. *Ершов А. А.* Обеспечение безопасности и эффективности швартовных операций / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 4. — С. 65–67.

3. *Ершов А. А.* Перспективы автоматизации управления судном при швартовках / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // XIII Международная научно-практическая конференция «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия»: ежемес. науч. журнал. — Новосибирск, 2015. – № 6 (13). — С. 144–145.

4. *Ершов А. А.* Планирование проведения экспериментальной проверки диаграммы (планшета) управления судном / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 447–455. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-447-455.

5. *Ершов А. А.* Способы автоматизации штормового плавания судна / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 4. — С. 62–64.

6. *Логиновский В. А.* Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 89–96.

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

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

9. *Бурмака А. И.* Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.

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

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

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

13. *Kijima K.* A Ship Manoeuvring Motion in the Proximity of Pier / K. Kijima, Y. Furukawa // Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'94). 3rd International Conference. — Southampton, UK, 1994. — Pp. 211–222.

14. *Мальков А. А.* Уточнение математической модели судна по данным натурных испытаний / А. А. Мальков // Материалы IX межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов

«Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 23 мая 2018 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 60–63.

15. *Ершов А. А.* Совершенствование методов математического моделирования движения судна по данным натурных наблюдений / А. А. Ершов, А. А. Мальков // Проблемы развития технического потенциала и направления его повышения: сб. статей Международной науч.-практ. конф. (15 августа 2018 г., г. Казань). — Уфа: АЭТЕРНА, 2018. — С. 27–29.

16. Справочник по теории корабля: в 3 т. / под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 3: Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. — 544 с.

17. *Гофман А. Д.* Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна: справ. / А. Д. Гофман. — Л.: Судостроение, 1988. — 360 с.

REFERENCES

1. Ershov, A. A., and D. A. Huharev. “Improvement of mooring of the ships.” *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 3 (2015): 132–134

2. Ershov, A. A., and D. A. Huharev. “Ensuring safe and efficient mooring operations.” *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 4 (2015): 65–67.

3. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. “Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.

4. Ershov, Andrey A., and Dmitry A. Huharev. “Planning of trials to check the diagrams (tables) maneuvering of a vessel.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 447–455. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-447-455.

5. 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.

6. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. “Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.

7. Zubova, A. A., and D. V. Nikushchenko. “Methodology for the Ship to Ship Hydrodynamic interaction Investigation Applying the CFD Methods.” *Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics* (*ICHD 2014*). Singapore, 2014: 328–340.

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

9. Burmaka, A. I. “The strategy of maneuvering of ships in a situation of excessive proximity.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.

10. Nekrasov, S. N., K. I. Efimov, and D. V. Trenenkov. “Navigation risks towing in cramped navigational conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 13–19.

11. Parinov, P.P. Novye sposoby obespecheniya bezopasnogo dvizheniya sudov v Bol’shom portu Sankt-Peterburg i na podkhodakh k portu. PhD diss. SPb., 2010.

12. Hasegawa, Kazuhiko, and T. Fukutomi. “On harbor maneuvering and neural control system for berthing with tug operation.” *Proc. 3rd International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*. 1994: 197–210.

13. Kijima, K., and Y. Furukawa. “A Ship Manoeuvring Motion in the Proximity of Pier.” *Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC’94). 3rd International Conference*. Southampton, UK, 1994: 211–222.

14. Mal’kov, A. A. “Utochnenie matematicheskoi modeli sudna po dannym naturnykh ispytanii.” *Materialy IX mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii» 23 maya 2018 goda*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2018. 60–63.

15. Ershov, A. A., and A. A. Mal’kov. “Sovershenstvovanie metodov matematicheskogo modelirovaniya dvizheniya sudna po dannym naturnykh nablyudenii.” *Problemy razvitiya tekh-nicheskogo potentsiala i napravleniya*

ego povysheniya: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (15 avgusta 2018 g, g. Kazan'). Ufa: AETERNA, 2018. 27–29.

16. Voitkunskiy, Ya. I., eds. Spravochnik po teorii korablya: v 3-kh t. Vol. 3. Upravlyaemost' vodoizmeshchayushchikh sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya. L.: Sudostroenie, 1985.

17. Gofman, A.D. *Dvizhitel'no-rulevoi kompleks i manevrirovanie sudna*. *Spravochnik*. L.: Sudostroenie, 1988.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Ершов Андрей Александрович — доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *ershov_63@mail.ru* **Мальков Александр Александрович** — аспирант *Научный руководитель:* Ершов Андрей Александрович ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *ershov_63@mail.ru*	**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* **Malkov, Alexander A.** — Postgraduate *Supervisor:* Ershov, Andrey A. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *ershov_63@mail.ru*.

Статья поступила в редакцию 29 октября 2018 г.
Received: October 29, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42

SIMULATION OF THE SEA CARGO FRONT OPERATION

A. L. Kuznetsov[1], A. V. Kirichenko[1], D. A. Zaykin [2]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation
[2] — Gazprom Neft Shelf, Ltd., St. Petersburg, Russian Federation

A reliable estimation of the sea port cargo handling throughput remains an actual problem since many different tasks stem from this decision. The preliminary technological design of a future port, project consideration concerning its reconstruction and modernization, changing of its functional profile, variation of the ship sizes and patterns of call (liner and tramp, with scheduled and random calls respectfully), reasonability of calls, scheduled maintenance and random failures of the berth cargo-handling equipment – all these factors form a wide range of the consumers for this prognoses information, both on strategical and operative level of decision taking. Obviously, this level, as well as the time and labor resources allocated for this task set different features of the procedure, while the demands for the principal quality of the resulting decision remain nearly the same and reflect "a certain level of uncertainty" due to stochastic nature of values. As the conducted study shows, there are alternative variants to gain relatively reliable prognoses result: development of unique simulation models, requiring essential labor and time inputs and bearing a narrow "local" character, or usage of simplified analogues, nearly as general as the analytical techniques. The paper deals with a new approach for port project and design procedure based upon the stochastic model of the sea cargo front combined with the elements of discrete-event simulation. The model develops analytical estimations gained by the analytical methods aimed for assessment of berths number, which forms on task of the direct design procedure of the technologic design. In the reverse design procedure the model enables to assess a possible cargo flow which could be handled by the group of berths. The adequacy of the results is confirmed by the simulation experiments.

Keywords: sea cargo front, ship calls, technological design, simulation, stochastic model.

For citation:
Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Dmitrii A. Zaikin. "Simulation of the sea cargo front operation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.

УДК 656.073.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МОРСКОГО ГРУЗОВОГО ФРОНТА

А. Л. Кузнецов[1], А. В. Кириченко[1], Д. А. Зайкин[2]

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — ООО «Газпром нефть шельф», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Выполненная достоверная оценка пропускной способности морского грузового фронта портов и отдельных терминалов остается актуальной проблемой, обусловленной широким спектром решаемых задач, основанных на указанном прогнозе. Рассмотрены основные задачи: начальное технологическое проектирование перспективного порта; проектные соображения по его реконструкции, модернизации, изменению специализации; варьирование потоков судов различных размерных групп и форм привлечения (линейной и рейсовой, характеризующимися регулярными и трамповыми судозаходами соответственно); сезонность прибытия судов и грузов; плановые и внеплановые ремонты перегрузочного оборудования и причального фронта, все это формирует широкий спектр потребителей прогнозной информации как на стратегическом, так и на оперативном уровнях принятия решений. Очевидно, что уровень принятия решений, возможные временные рамки и трудозатраты на их получение существенно различаются в зависимости от стадии проекта, несмотря на то, что требования к качеству прогноза приблизительно одинаковы и остаются «на определенном уровне неопределенности», так как разработчики постоянно учитывают вероятностный характер результатов. Проведенное исследование показывает, что имеются альтернативные варианты получение достоверных прогнозных результатов — уникальные имитационные модели, требующие существенных

затрат и имеющие локальное («точечное») значение, либо их упрощенные аналоги, во многом обладающие универсальностью расчетно-аналитических аналогов. В статье рассмотрен новый подход к проблеме прогнозирования возможностей порта на основе предложенной вероятностно-статистической модели работы морского грузового фронта с элементами дискретно-событийного моделирования. Модель уточняет получаемые аналитическими расчетными методами оценки количества причалов, необходимых для обработки грузопотока в прямой задаче технологического проектирования. В обратной задаче модель позволяет оценить возможный грузопоток, который способна обработать группа анализируемых причалов. Адекватность результатов моделирования оценивается на основании проведенных вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: морской грузовой фронт, судозаходы, технологическое проектирование, моделирование, вероятностно-статистическая модель.

Для цитирования:
Кузнецов А. Л. Моделирование работы морского грузового фронта / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Д. А. Зайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.

Введение (Introduction)

Традиционно считается, что морской грузовой фронт является наиболее подходящим объектом для применения теории массового обслуживания (ТМО) [1]. Действительно, после опубликования фундаментального исследования[1], подробно описывающего методологию представления причалов каналами обслуживания и заходящих в порт судов потоком заявок, соответствующие приемы в явном или неявном виде легли в основу практически всех расчетных инструментов технологического проектирования[2, 3]. Полученные результаты существенно расширили возможность расчетных методик, поскольку впервые дали возможность оценки качества обслуживания судов в порту [2]. Критерием качества при этом служила величина относительного ожидания, или отношения времени ожидания обслуживания ко времени обслуживания [3]. Мерой затрат ресурсов на достижение этого качества была выбрана степень занятости причалов $k_{зан}$: чем она больше, тем дольше в среднем судно должно пребывать в очереди, ожидая освобождения причала. Были разработаны относительно несложные методики определения оптимального соотношения этих двух величин, входящих в формульные зависимости ТМО [4].

Проблемы возникли тогда, когда от этих расчетных методик начали требовать все большей и большей точности, а развитие системы морской транспортировки грузов все чаще стало нарушать допущения, необходимые для адекватности выведенных в ТМО формул [5]. Во-первых, существенные различия в размерах судов сделали каналы обслуживания невзаимозаменяемыми, а время их обслуживания — не подчиняющимся выдвинутым требованиям экспоненциальности распределения. Во-вторых, поток судов не мог быть приближен моделью простейшего случайного потока, поскольку организация маршрутов чаще всего стала представлять собой комбинацию регулярных судозаходов магистральных маршрутов и случайных судозаходов трамповых судов на фидерных участках. Вследствие этого с учетом практических требований научное сообщество, вовлеченное в разработку методов проектирования морских портов, занялось интенсивным поиском новых математических инструментов. Существенный прогресс в информационных технологиях и, в первую очередь, технологии программирования, в качестве наиболее перспективного инструмента послужил основанием для использования имитационного моделирования [6]–[8]. В то же время эта методика оказалась не столь универсальной, как теория массового обслуживания, поскольку модель должна строиться *adhoc* с учетом специфических характеристик моделируемого объекта [9], [10]. Аналогичное обстоятельство определяет и другой недостаток: высокую трудоемкость создания модели по сравнению с интенсивной (формульной) моделью представления знаний ТМО [11], [12].

[1] UNCTAD Port Development — A Handbook for Planners in Developing Countries. UNITEDNATIONS, NewYork, 1985. 227 p.

[2] Об утверждении технического регламента о безопасности объектов морского транспорта: Постановление Правительства Российской Федерации от 12 августа 2010 года № 620 (с изм. на 29 июля 2017 г.).

[3] СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов. М.: Стандартинформ, 2018. 218 p.

Как следствие, актуальной и перспективной задачей остается поиск простого и универсального инструмента, по точности находящегося между моделями ТМО и имитационными *adhoc* моделями. В данной статье рассматривается один из таких инструментов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Пусть имеем поток Q заходящих в порт контейнерных судов, представленный движением по расписанию и случайными судозаходами. Пример такого распределения приведен в табл. 1, которая представляет собой экранную форму ввода данных используемой для анализа модели.

Таблица 1

Структура и объем грузопотока

			Годовой грузооборот	***Q***	***3 664 000***	*[TEU/год]*							
			Судоходство линейное										
	Судно	Вместимость	***Грузооборот***		**1 664 000**	[TEU/год]	расписание судозаходов						
№	Тип	TEU		Тип захода	Число судов		пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
1	СК-8000	8000		расп	52					**1**			
2	СК-4000	4000		расп	104				**1**		**1**		
			Судоходство трамповое				*Примечание: судозаход обозначается 1*						
	Судно	Вместимость	***Грузооборот***		**2 000 000**	[TEU/год]							
№	Тип	TEU	Доля в грузообороте,%	Тип захода	Число судов	Порядок							
3	СК-1000	1000	5	Эрланг	50	4							
4	СК-2000	2000	15	Эрланг	75	4							
5	СК-3000	3000	25	Эрланг	83	4							
6	СК-4000	4000	30	Эрланг	75	4							
7	СК-8000	8000	25	Эрланг	31	4							
		ИТОГО	*100%*										

Данному распределению соответствуют частные грузопотоки, сведенные в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Частные грузопотоки по типам судов

СК-8000	Q1	**832 000**	[TEU/год]
СК-4000	Q2	**832 000**	[TEU/год]
Линейный груз/об	$Q_{лин}$	***1 664 000***	[TEU/год]
СК-1000	Q3	**100 000**	[TEU/год]
СК-2000	Q4	**300 000**	[TEU/год]
СК-3000	Q5	**500 000**	[TEU/год]
СК-4000	Q6	**600 000**	[TEU/год]
СК-8000	Q7	**500 000**	[TEU/год]
Трамповый груз/об	$Q_{трамп}$	***2 000 000***	[TEU/год]
Годовой грузооборот:		***3 664 000***	[TEU/год]

Таблица 3

Соотношение грузопотоков по расписанию и в трамповом судоходстве

Годовой грузооборот	***Q***	***3 664 000***	[TEU/год]	***100***	[%]
из него линейное	$Q_{лин}$	***1 664 000***	[TEU/год]	***45***	[%]
из него трамп	$Q_{трамп}$	***2 000 000***	[TEU/год]	***55***	[%]

Общее число судозаходов $N_{суд} = N_{V_1} + ... + N_{V_7}$, как следует из табл. 1, составляет четыреста семьдесят один, что при расчетном грузопотоке в 3 664 000 TEU дает средневзвешенное судно вместимостью $V_0 = \frac{Q}{2N_{суд}} \frac{3664000\ \text{TEU}}{2471} = 3893$ TEU. Для обычных судов, только выгружающих или погружающих в порту судовые партии, соответствующая величина определялась бы как $V_0 = \frac{Q}{N_{суд}}$.

Соответствующие характеристики рассматриваемого в данном примере грузо- и судопотока показаны на рис. 1.

а) б)

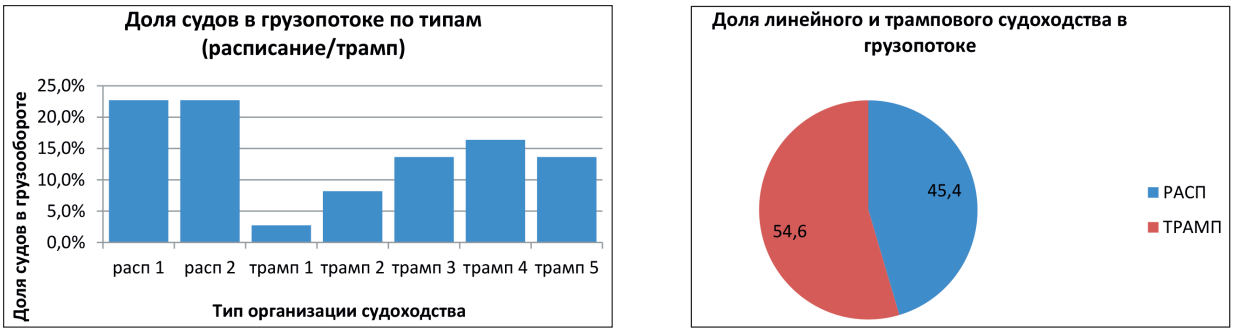


Рис. 1. Характеристики грузооборота (*а*) и судооборота (*б*)

Данные табл. 1 позволяют рассчитать величины математических ожиданий интервалов судозахода для каждого типа судов: $T^{i}_{\text{суд}} = \frac{365 \cdot 24}{N_{V1}} = \frac{365 \cdot 24 V_1}{Q_i}$. В этой же таблице предполагается распределение интервалов между судозаходами каждого типа судов (в данном случае по законам Эрланга того или иного порядка). Плотность распределения для различных типов трамповых судов из рассматриваемого примера показана на рис. 2.

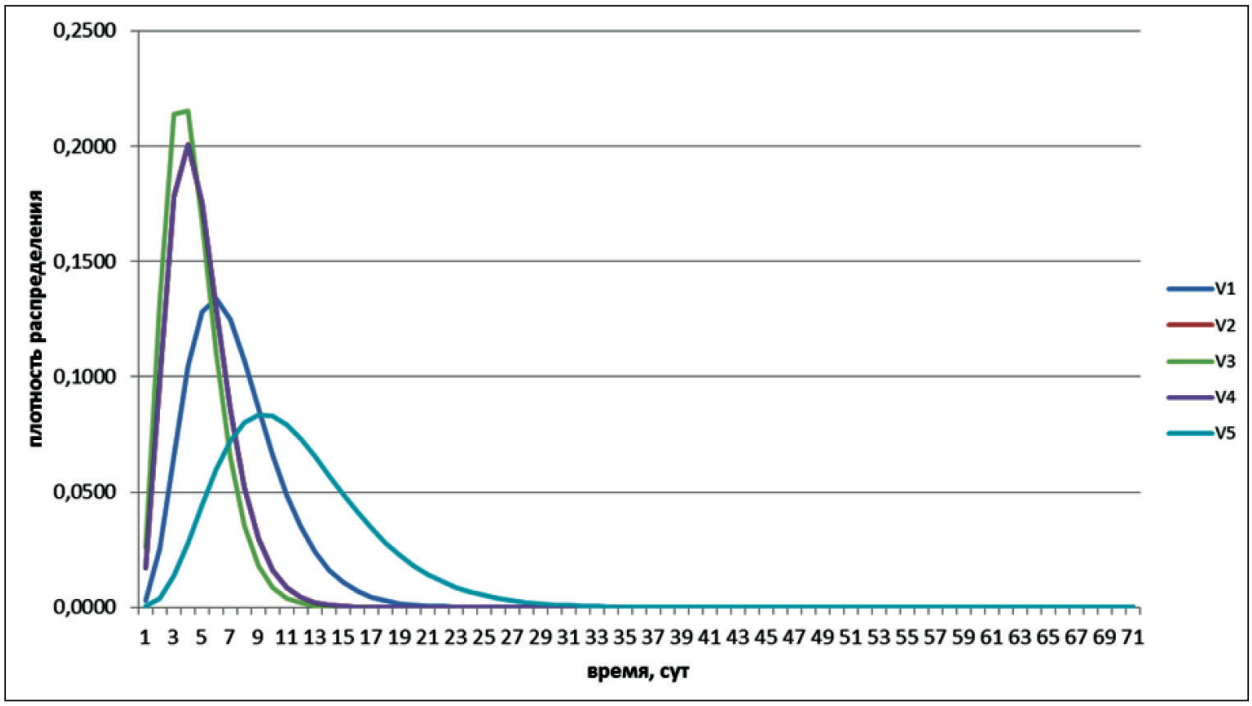


Рис. 2. Плотность распределения интервалов судозахода

Если теперь генерировать значения равномерно распределенной на интервале [0; 1] случайной величины, и для каждого сгенерированного значения находить прообраз интегральной функции распределения (рис. 3), то можно получать последовательность судозаходов, подчиненную выбранным статистическим закономерностям и комбинировать их с заданным расписанием судозаходов. Пример такой генерации, которая составляет метод обратной функции, приведен в табл. 4.

На рис. 3 приведены соответствующие интегральные распределения интервалов судозахода для каждого типа судов.

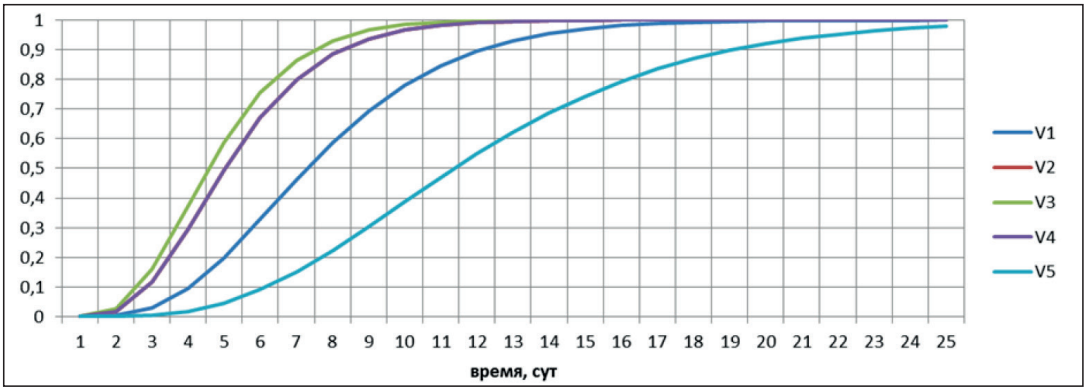


Рис. 3. Интегральные распределения интервалов судозахода

Таблица 4

Пример генерации, составляющей метод обратной функции

Сутки	Трамп					Расп	
	3	4	5	6	7	1	2
1							
2							
3							+
4			+			+	
5							+
6							
7			+	+			
8		+					
9							
10			+				+
11						+	
12			+				+
13	+						
14		+					
15			+	+			
16			+				
17				+	+		+
18						+	
19		+	+				+
20							

В каждые *i*-е сутки в порт прибывает, таким образом, объем грузопотока $Q_i = \sum_{k=1}^{7} v_1 V_1$. Здесь $v_1 \in \{0; 1\}$ и $v_1 = 1$, если в эти сутки в порт прибывает судно V_1 вместимости или типа. Кроме того, обработке подлежит объем судов, ожидающих в очереди начиная с предыдущих суток q_{i-1}.

Если в порту имеется N_b причалов и суточная производительность каждого причала есть P_b, то порт может обслужить грузопоток объемом $Q_b = P_b N_b$. Если $Q_i + q_{i-1} > P_b N_b$, то объем грузопотока $q_i = Q_i + q_{i-1} - P_b N_b$ будет поставлен в очередь на обслуживание. В среднем это будет соответствовать очереди длиной $n_q = \frac{q_i}{2D_0}$ контейнерных судов или $n_q = \frac{q_i}{D_0}$ обычных судов.

Рассмотренных простых положений вполне достаточно для формирования алгоритма выполнения шага простейшей имитационной дискретной временной модели. В табл. 5 показана работа этого алгоритма для судозаходов, приведенных в табл. 4. При этом следует отметить, что все объемы судовых партий и производительность кранов являются случайными величинами, генерируемыми по нормальному закону с заданной дисперсией.

Таблица 5

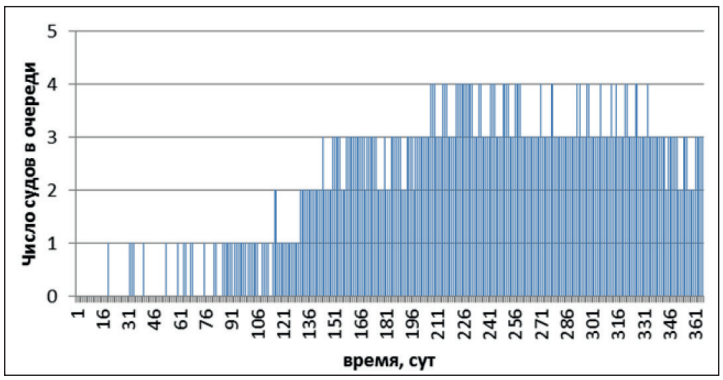
Результаты работы алгоритма

сутки	трамп					расп			q_i	$Q_i + q_{i-1}$	$P_b \cdot N_b$	$Q_i + q_{i-1} > P_b \cdot N_b$?	q_i	n_q
	3	4	5	6	7	1	2		0					
1								0	0	0	5924,788	-5 925	0	0
2								0	0	0	5782,256	-5 782	0	0
3							+	4 374	0	4 374	6710,32	-2 337	0	0
4			+			+		11 613	5 257	11 613	6356,269	5 257	5 257	1
5							+	4 498	3 485	9 755	6270,592	3 485	3 485	0
6								0	0	3 485	5881,004	-2 396	0	0
7			+	+				7 642	1 451	7 642	6190,897	1 451	1 451	0
8		+						2 039	0	3 490	6550,012	-3 060	0	0
9								0	0	0	5578,441	-5 578	0	0
10			+				+	6 982	636	6 982	6345,765	636	636	0
11						+		7 987	2 988	8 623	5635,852	2 988	2 988	0
12			+				+	5 733	3 384	8 720	5335,719	3 384	3 384	0
13	+							865	0	4 249	5589,863	-1 335	0	0
14		+						2 391	0	2 391	4689,664	-2 298	0	0
15			+	+				7 013	405	7 013	6607,345	405	405	0
16			+					2 976	0	3 381	6401,613	-3 021	0	0
17				+	+		+	16 129	9 394	16 129	6735,049	9 394	9 394	1
18						+		7 338	10 508	16 732	6223,611	10 508	10 508	1
19		+	+				+	7 829	12 308	18 338	6029,971	12 308	12 308	2
20								0	6 502	12 308	5805,299	6 502	6 502	1

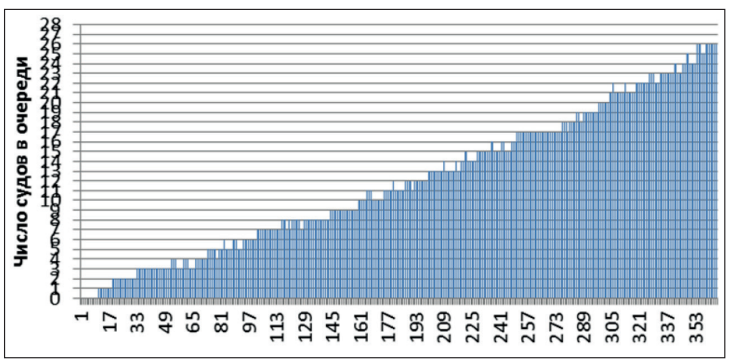
Результаты (Results)

Предположим, что суточная производительность причала составляет 1000 TEU/сут, а морской грузовой фронт представлен группой из пяти причалов. Динамика изменения длины очереди, полученная с помощью описанной ранее модели, приведена на рис. 5, *а*. Уменьшение числа причалов на единицу, т. е. до четырех, приводит к неограниченному росту длины очереди судов, ожидающих обслуживания, как показано на рис. 5, *б*. В то же время при увеличении суточной производительности до уровня 1300 TEU/сут группа из четырех причалов способна справиться с заданным грузопотоком при приемлемом качестве обслуживания (рис. 5, *в*).

а)



б)



в)

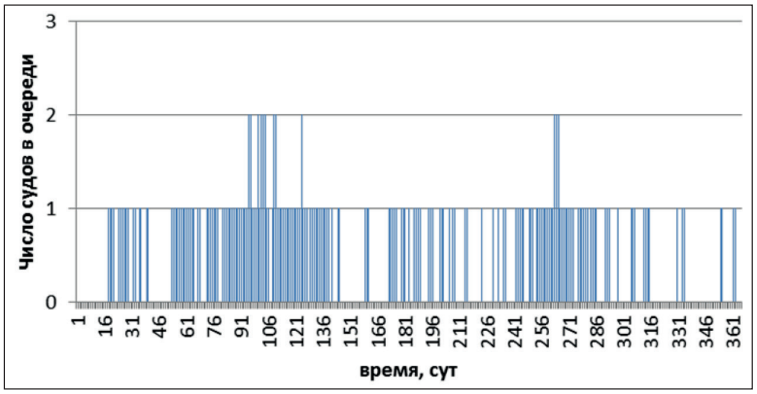


Рис. 5. Динамика изменения очереди:
а — при N_b = 5 и P_b = 1000 TEU/сут; *б* — при N_b=4 и P_b=1000 TEU/сут;
в — при N_b = 4 и P_b = 1300 TEU/сут

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты, несмотря на всю правдоподобность, не имеют практической ценности без сопоставления с результатами, полученными с помощью других методик. В то же время правдоподобность составляет самостоятельное и важное свойство в теории моделирования, связанное с понятием *валидности модели*.

Более убедительным доказательством валидности служит приведение анализируемой модели (за счет подбора параметров и характеристик внешней среды) к режиму работы некоторой проверенной иными способами и считающейся достоверной эталонной модели. Так, при исключении судозаходов по расписанию и выборе законов распределения, позволяющих выполнить условия применимости, можно сравнить поведение анализируемой модели с классической моделью ТМО. Совпадение результатов будет свидетельствовать не только о валидности модели, но и позволит провести ее калибровку, что является еще одним обязательным шагом процедуры установления адекватности модели исследуемому объекту. Таким образом, можно утверждать, что различные методики дают не разные результаты, а в разной степени характеризуют разброс величин вокруг этих средних значений. Иными словами, они дают разные оценки степени достоверности полученных результатов.

Проведенные в рамках указанной схемы эксперименты показывают совпадение результатов моделирования с расчетами по формулам ТМО, что позволяет считать предлагаемую модель как минимум не уступающей по точности традиционным методам технологического проектирования. Способ построения модели и лежащие в ее основе алгоритмы позволяют считать ее достаточно робастной, т. е. сохраняющей результативность при изменении параметров, выходящих за допущения ТМО.

Еще один способ установления адекватности состоит в том, чтобы выполнить сравнение результатов работы предлагаемой модели, настроенной на конкретный легко проверяемый вариант, с данными этого расчета. С этой целью был проведен ряд экспериментов, в результате которых была подтверждена адекватность предложенной модели.

Заключение (Conclusion)

В статье описана простейшая вероятностно-статистическая модель работы морского грузового фронта с элементами дискретно-событийного моделирования. Модель расширяет представления, получаемые аналитическими (формульными) расчетными методами, о количестве причалов, необходимых для обработки расчетного грузопотока в прямой задаче технологического проектирования. В обратной задаче модель позволяет оценить возможный грузопоток, который способна обработать группа проектируемых причалов. Основным оцениваемым показателем

является полный грузооборот через морской грузовой фронт порта, а варьируемыми параметрами — распределение состава флота по вместимости, количество размещаемых для работы на судне причальных кранов, их производительность, доля рабочего времени и величины разброса случайных величин. Результатами моделирования являются: значения средней и максимальной длины очереди, коэффициент занятости причального фронта и относительное ожидание судов в очереди на обслуживание. Эти параметры позволяют оценить пропускную способность группы причалов, т. е. максимальный грузопоток, обрабатываемый при соблюдении требуемого уровня качества (мощностью причала является значение грузопотока при постоянной работе всех причалов).

Модель обладает определенными методическими ограничениями, которые не позволяют считать ее адекватным инструментом для окончательного расчета параметров причального фронта и характеристик обслуживания судов. В то же время получаемые с ее помощью оценки являются достаточно достоверными для использования на начальных этапах технологического проектирования морских портов, когда пространство поиска окончательных решений сужается за счет использования традиционного в практике проектирования метода укрупненных показателей.

Адекватность и простота предлагаемой модели, возможность работы с гетерогенными потоками судов, низкая трудоемкость планирования и проведения экспериментов позволяют надеяться на то, что она может служить полезным вспомогательным средством технологического проектирования морских портов и терминалов разного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кузнецов А. Л.* Эволюция показателей, характеризующих эксплуатационную работу портов и терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 909–924. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-909-924.

2. *Кузнецов А. Л.* Моделирование развития портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — Т. 1.— № 3(41).—С. 176–182.

3. *Кузнецов А. Л.* Теоретико-множественная модель для расчета операционных ресурсов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1094-1103.

4. *Кузнецов А. Л.* Выбор формы представления структуры универсальной имитационной модели контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 520–532. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-520-532.

5. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

6. *Schepler X.* Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port / X. Schepler, S. Balev, S. Michel, É. Sanlaville // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. —2017. — Vol. 100. — Pp. 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.

7. *Rødseth K. L.* How do economies of density in container handling operations affect ships' time and emissions in port? Evidence from Norwegian container terminals / K. L. Rødseth, P. B. Wangsness, H. Schøyen // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2018. — Vol. 59. — Pp. 385–399. DOI: 10.1016/j.trd.2017.12.015.

8. *Irannezhad E.* A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time / E. Irannezhad, C. Prato, M. Hickman // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2017. — Vol. 121. — Pp. 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.

9. *Loke K. B.* Marginal Expansion Planning of Infrastructure at a Container Terminal / K.B.Loke, A.S.A. Kader, M. Z. Ahmad, S. A. Hamid, M. R. Othman // Open Journal of Marine Science. — 2015. — Vol. 5. —Pp. 99–107. DOI: 10.4236/ojms.2015.51009.

10. *Martín-Soberón A. M.* Automation in Port Container Terminals / A. M. Martín-Soberón, A. Monfort, R. Sapiña, N. Monterde, D. Calduch // Procedia-Social and Behavioral Sciences. — 2014. — Vol. 160. — Pp. 195–204. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.12.131.

11. *Saeed N.* Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines / N. Saeed, O. I. Larsen // Case Studies on Transport Policy. — 2016. — Vol. 4. — Is. 2. — Pp. 143–149. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.02.001.

12. *Liu D.* Modeling assignment of quay cranes using queueing theory for minimizing CO2 emission at a container terminal / D. Liu, Y. E. Ge // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2018. — Vol. 61. — Pp. 140–151. DOI: 10.1016/j.trd.2017.06.006.

REFERENCES

1. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "The evolution of indicators describing the operation of ports and terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 909–924. DOI: 10.21821/2309- 5180-2017-9-5-909-924.

2. Kuznetsov, Alexander L., and Alexander V. Galin. "Port development simulation." *Marine Intellectual Technology* 1.3(41) (2018): 176-182.

3. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Set theory model for the assessment of the container terminal's operational resources." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180- 2018-10-5-1094-1103.

4. Kuznetsov, Alexander L., Victorya N. Sherbakova-Slyusarenko, and Andrey S. Tkachenko. "On the selection of the format for the container terminal simulation model's structure." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 520–532. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-520-53.

5. For citation: Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Simulation in the tasks of sea port operational analyses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

6. Schepler, Xavier, Stefan Balev, Sophie Michel, and Éric Sanlaville. "Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 100 (2017): 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.

7. Rødseth, Kenneth Løvold, Paal Brevik Wangsness, and Halvor Schøyen. "How do economies of density in container handling operations affect ships' time and emissions in port? Evidence from Norwegian container terminals." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 59 (2018): 385–399. DOI: 10.1016/j.trd.2017.12.015.

8. Irannezhad, Elnaz, Carlo Prato, and Mark Hickman. "A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 121 (2017): 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.

9. Loke, Keng Bin, Ab. Saman Abd. Kader, Mohd. Zamani Ahmad, Saharuddin Abdul Hamid, and Mohamad Rosni Othman. "Marginal Expansion Planning of Infrastructure at a Container Terminal." Open Journal of Marine Science 5 (2015): 99–107. DOI: 10.4236/ojms.2015.51009.

10. Martín-Soberón, Ana María, Arturo Monfort, Rafael Sapiña, Noemí Monterde, and David Calduch. "Automation in port container terminals." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 160 (2014): 195–204. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.12.131.

11. Saeed, Naima, and Odd I. Larsen. "Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines." *Case Studies on Transport Policy* 4.2 (2016): 143–149. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.02.001.

12. Liu, Ding, and Ying-En Ge. "Modeling assignment of quay cranes using queueing theory for minimizing CO2 emission at a container terminal." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 61 (2018): 140–151. DOI: 10.1016/j.trd.2017.06.006.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Кириченко Александр Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *KirichenkoAV@gumrf.ru*

Зайкин Дмитрий Аркадьевич —
заместитель начальника Управления,
начальник отдела эксплуатации флота ООО
«Газпром нефть шельф»
197198, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Зоологический переулок, д. 2-4, лит. Б
e-mail: *Zaykin.DA@gazprom-neft.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Kirichenko, Aleksandr V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *KirichenkoAV@gumrf.ru*

Zaikin, Dmitrii A. —
Deputy Head of Department -
Head of Fleet Operations Department
Gazprom Neft Shelf, Ltd.
2-4/БZoological Lane, St. Petersburg, 197198,
Russian Federation
e-mail:*Zaykin.DA@gazprom-neft.ru*

Статья поступила в редакцию 15января 2019 г.
Received: January 15, 2019.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-43-56

STABILITY ANALYSIS OF TWO-LINK SUSPENSION SYSTEM WITH ELASTIC AND NON-PARALLEL SECONDARY SLINGS FOR BULKY AND HEAVY CARGO LOADING / UNLOADING

Y. V. Nikitin, S. A. Podporin

The Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

The stability analysis of two-link suspension systems with non-parallel secondary slings for bulky and heavy cargo has been conducted. Today, such suspension systems are broadly used on ships board. Specifically, such an analysis has been conducted under conditions when all flexible slings of the arrangement are elastic ones, i.e. lengthen under the load. Among such suspension systems the most stable is considered the one which has the biggest height and area of so called the safety triangle — a zone within which the center of gravity of the load must be positioned.

It has been shown that in the critical position of stable equilibrium of the suspension system (that takes place when the center of gravity of the load is located on one of the sides of the safety triangle, and the spreader is deviated from the horizontal line at a tilting angle), the secondary slings together with the loading platform might compose either quadrangle or triangle. The criteria which the secondary suspension composes one or the other geometric figure on have been also defined. For the both cases, the corresponding analytical equations for calculating elongations of the slings, the critical tilting angle of the spreader, and angles between the elements of the suspension system have been also received. The equations allowing to calculate the dimensions (height and angle at the base) of the safety triangle have been also developed.

All developed equations have been appropriately demonstrated by the numerical examples. Specifically, it has been shown that the height of the safety triangle considerably depends on the elasticity degree of the suspension system slings. The higher elasticity of the slings, the smaller the height and the area of the safety triangle, and the worse the suspension system stability.

Keywords: two-link suspension system, diverging secondary slings, stability, critical equilibrium position, elastic slings, safety triangle.

For citation:
Nikitin, Yevgeny V., and Sergey A. Podporin. "Stability analysis of two-link suspension system with elastic and non-parallel secondary slings for bulky and heavy cargo loading / unloading." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 43–56. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-43-56.

УДК 629.123; 629.5.065.2

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХЗВЕННОЙ СИСТЕМЫ ПОДВЕШИВАНИЯ С НЕПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ И ЭЛАСТИЧНЫМИ СТРОПАМИ ДЛЯ ПОГРУЗКИ / ВЫГРУЗКИ НА СУДНО КРУПНОГАБАРИТНОГО И ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ГРУЗА

Е. В. Никитин, С. А. Подпорин

Севастопольский государственный университет,
Севастополь, Российская Федерация

Проведен анализ статической устойчивости двухзвенных систем подвешивания крупногабаритных и тяжеловесных грузов с непараллельными стропами вторичного подвеса, которые сегодня довольно часто используются при перегрузке на морском транспорте. Рассмотрен случай, когда все стропы системы подвешивания эластичны, т. е. растягиваются под нагрузкой. Из нескольких таких систем подвешивания наиболее устойчивой будет та, которая имеет наибольшую высоту и площадь треугольника безопасности — зоны, внутри которой должен находиться центр тяжести груза относительно системы подвешивания.

Показано, что в предельном положении устойчивого равновесия системы, когда центр тяжести груза размещен на одной из боковых сторон треугольника безопасности и траверса отклонена от первоначального горизонтального положения на некоторый угол, вторичный подвес (вторичные стропы вместе с погрузочной платформой) может образовывать или четырехугольник, или треугольник. При этом определены условия (критерии) формирования вторичным подвесом той или иной геометрической фигуры. Для обоих случаев получены аналитические выражения для расчета удлинения эластичных строп системы подвешивания в предельном положении равновесия, угла отклонения траверсы от первоначального положения, а также углов между отдельными элементами системы. Получены также уравнения, позволяющие вычислить размеры (угол при основании и высоту) треугольника безопасности, т. е. области, внутри которой должен находиться центр тяжести груза, чтобы система оставалась в положении устойчивого равновесия.

Возможности разработанных методов и аналитических выражений демонстрируются на конкретных числовых примерах. В частности, показано, что высота треугольника безопасности существенно зависит от степени эластичности строп: чем выше эластичность, тем меньше высота и площадь треугольника безопасности, а значит, и менее устойчивой становится система подвешивания в целом.

Ключевые слова: двухзвенная система подвешивания, расходящиеся вторичные стропы, устойчивость, предельное положение равновесия, эластичные стропы, треугольник безопасности.

Для цитирования:
Никитин Е. В. Устойчивость двухзвенной системы подвешивания с непараллельными и эластичными стропами для погрузки / выгрузки на судно крупногабаритного и тяжеловесного груза / Е. В. Никитин, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 43–56. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-43-56.

Введение (Introduction)

При погрузке / выгрузке на судах крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ) нередко применяют комплексные (двухзвенные) системы их подвешивания к подъемному устройству. Такие системы, в силу наличия нескольких степеней свободы, менее устойчивы, чем, например, традиционные (однозвенные) системы подвешивания (СП) груза. В работах [1]–[4] подробно рассмотрены вопросы устойчивости двухзвенных систем подвешивания КТГ, пример которых приведен на рис. 1. Было показано, что при изучении устойчивости, во-первых, такую пространственную систему можно заменить ее плоской моделью (рис. 2) или несколькими плоскими моделями. Во-вторых, устойчивость такой плоской модели системы подвешивания обеспечивается при условии, что ЦТ груза (точка *G* на рис. 2) располагается внутри некоей области — равнобедренного треугольника *CDT*, так называемого *треугольника безопасности* (ТБ). Основание ТБ совпадает с погрузочной платформой *CD* (точками крепления вторичных строп к подвешиваемому грузу), а высота зависит от веса траверсы и груза, а также определяется геометрией СП в этих работах. Однако в работах [1]–[4] рассматривалась устойчивость двухзвенных СП с нерастяжимыми гибкими стропами, а также случай, когда стропы эластичны (удлиняются под действием нагрузки), но при этом вторичные стропы в исходном положении параллельны друг другу [5]. Случай, когда применяются все эластичные стропы и при этом вторичные стропы в первоначальном положении СП не параллельны друг другу, не рассматривался.

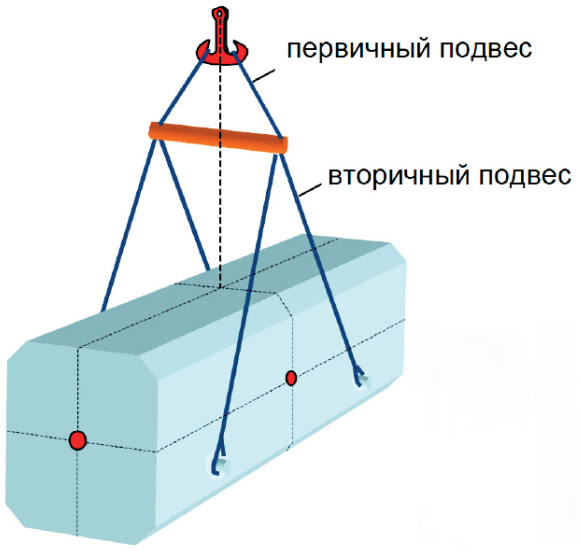


Рис. 1. Пример двухзвенной системы подвешивания крупногабаритного груза

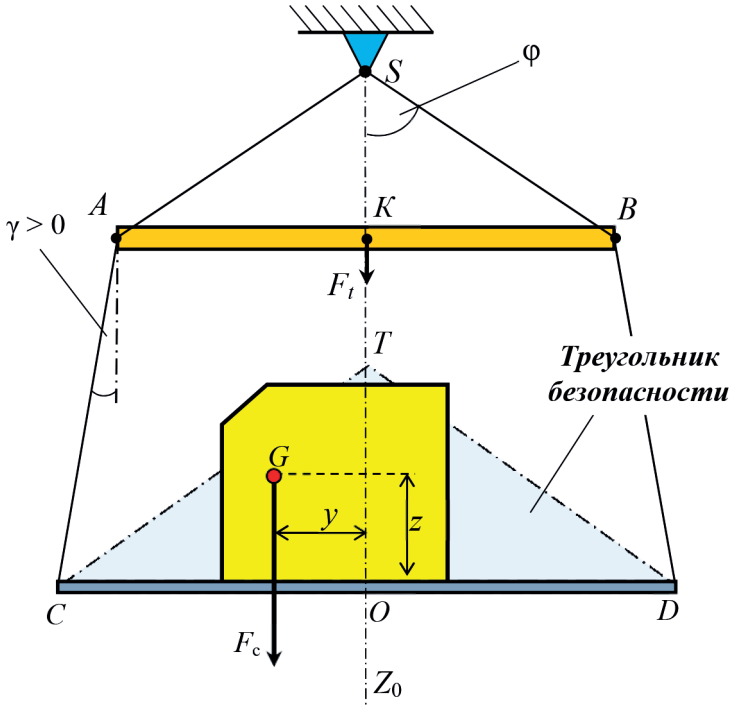


Рис. 2. Схема (модель) двухзвенной системы подвешивания груза с расходящимися книзу вторичными стропами ($\gamma > 0$)

Целью данной статьи является анализ устойчивости двухзвенных систем подвешивания КТГ с эластичными стропами при условии, что в первоначальном положении вторичные стропы СП не параллельны друг другу и расходятся книзу ($\gamma > 0$).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим плоскую двухзвенную СП, у которой стропы вторичного подвеса *AC*, *BD* первоначально (до подвешивания) расходятся книзу $\gamma > 0$ (см. рис. 2). Предположим, что все стропы СП являются растяжимыми (эластичными). Для оценки устойчивости такой СП и определения размеров ТБ поместим ЦТ груза (КТГ) на край погрузочной платформы *CD* — в точку *C*. Тогда СП деформируется, ее гибкие стропы несимметрично растянутся, и сама система займет предельное положение устойчивого равновесия $SA_eB_eD_eC_e$ (рис. 3 и 4 [1]–[5]). В зависимости от исходной геометрии СП, а также степени удлинения строп в этом предельном положении равновесия вторичный подвес образует либо неправильный четырехугольник $A_eB_eD_eC_e$ (см. рис. 3), либо косоугольный треугольник $A_eB_eC_e$ (см. рис. 4). В последнем случае платформа C_eD_e и правая стропа B_eD_e оказываются на одной прямой.

В первом случае вся нагрузка от груза весом F_c прикладывается только на одну (левую) вторичную стропу A_eC_e, которая будет располагаться строго вертикально (см. рис. 3). Такая ситуация подробно рассмотрена в [1]–[4]. Поэтому методика расчета предельного угла отклонения траверсы A_eB_e (α_{lim}) и размеров ТБ (C_eD_eT) будет аналогична той, которая ранее была разработана для СП с параллельными вторичными стропами [5].

При помощи этой методики вначале определим силы, растягивающие первичные стропы СП, находящейся в предельном положении равновесия [5]:

$$F_r = (F_c + F_t)\frac{\sin\left(\varphi - \alpha_{\text{lim}}^0\right)}{\sin 2\varphi}; \quad (1)$$

$$F_l = (F_c + F_t)\frac{\sin\left(\varphi + \alpha_{\text{lim}}^0\right)}{\sin 2\varphi}, \quad (2)$$

где F_t — вес (сила тяжести) траверсы AB, Н;

F_r, F_l — силы, растягивающие правую и левую первичные стропы, Н;

2φ — угол между первичными стропами СП, град;

α^0_{lim} — угол отклонения траверсы AB в предельном положении равновесия (для СП с нерастяжимыми стропами), определяемый [5]:

$$\operatorname{tg}\alpha^0_{\text{lim}} = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\left(1 + F_t / F_{\text{c}}\right)}. \tag{3}$$

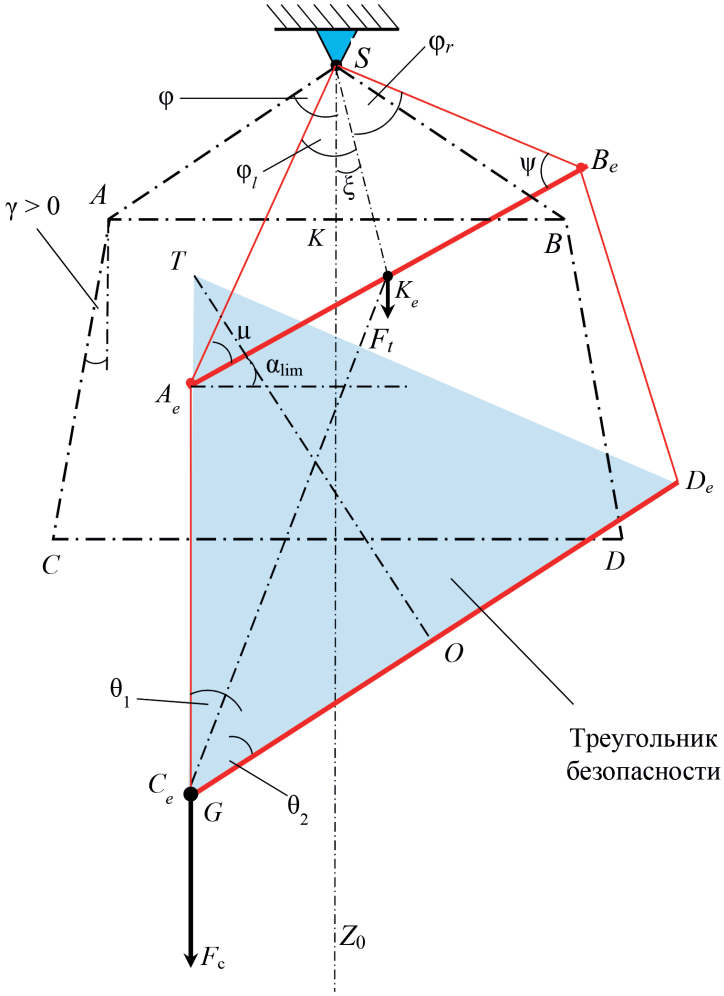


Рис. 3. Предельное положение равновесия СП
(вторичный подвес образует четырехугольник $A_eB_eD_eC_e$)

Далее, используя подход, изложенный в источниках [5], [9], определим длины первичных строп под действием сил F_r, F_l:

$$SA_e = SA + \frac{F_l SA\mu_1}{F_{\text{lim1}}};\quad SB_e = SB + \frac{F_r SB\mu_1}{F_{\text{lim1}}}, \tag{4}$$

где F_{lim1} — допустимая сила растяжения первичных строп (*Weight Load Limit* [5], [9]), Н;

ε_1 — относительное удлинение первичных строп при приложении F_{lim1}.

Для рассматриваемой СП допустимая сила растяжения первичных строп может быть вычислена по следующей формуле [9]:

$$F_{\text{lim1}} = \frac{\left(F_{\text{c}} + F_t\right)}{2\cos\varphi}. \tag{5}$$

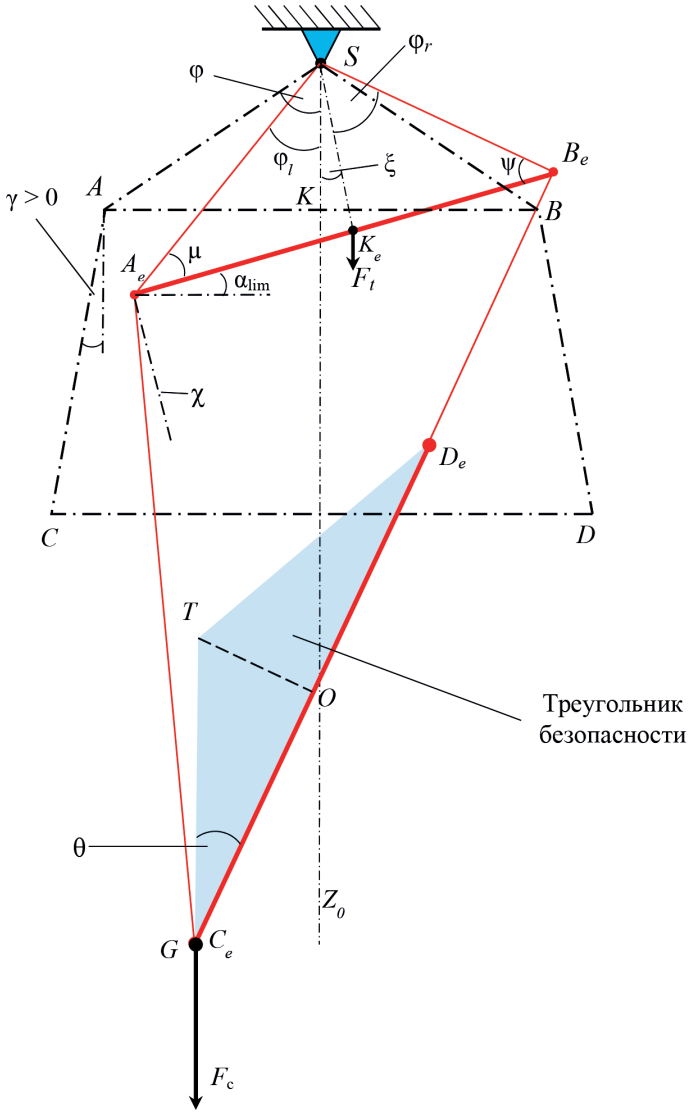


Рис. 4. Предельное положение равновесия СП
(вторичный подвес образует треугольник $A_eB_eC_e$)

Поскольку все стороны косоугольного треугольника SA_eB_e теперь известны, то следуя [10], можно вычислить его углы μ, ψ (см. рис. 3):

$$\mu = 2\operatorname{arctg}\left(\frac{r_\alpha}{p_\alpha - SB_e}\right); \tag{6}$$

$$\psi = 2\operatorname{arctg}\left(\frac{r_\alpha}{p_\alpha - SA_e}\right), \tag{7}$$

где p_α, r_α — соответственно полупериметр и радиус вписанной окружности треугольника SA_eB_e:

$$p_\alpha = \frac{1}{2}\left(SA_e + SB_e + AB\right); \tag{8}$$

$$r_\alpha = \sqrt{\frac{(p_\alpha - SA_e)(p_\alpha - SB_e)(p_\alpha - AB)}{p_\alpha}}. \tag{9}$$

Принимая во внимание вышеизложенное, угол отклонения траверсы AB в предельном положении равновесия СП при растянутых первичных стропах будет [5]:

$$\alpha_{\text{lim}} = \text{arctg}\left[\text{ctg}\,\mu - \frac{F_t}{2\left(F_{\text{c}} + F_t\right)} \cdot \left(\text{ctg}\,\mu + \text{ctg}\,\psi\right)\right]. \tag{10}$$

Определим теперь длину растянутой вторичной стропы A_eC_e. По аналогии с данными, представленными в работах [5], [9], она составит

$$A_eC_e = AC + \frac{F_{\text{c}} AC\varepsilon_2}{F_{\text{lim}\,2}}, \tag{11}$$

где ε_2 — относительное удлинение вторичных строп;

$F_{\text{lim}2}$ — допустимая сила растяжения вторичных строп.

Допустимая сила растяжения вторичных строп определяется по формуле

$$F_{\text{lim}\,2} = \frac{F_{\text{c}}}{2\cos^3} \tag{12}$$

Теперь имеется возможность рассчитать угол θ в основании треугольника безопасности (ТБ) как сумму углов θ_1 и θ_2 (см. рис. 3). При этом последние, при использовании известных соотношений для треугольников $A_eB_eC_e$ и $C_eB_eD_e$, могут быть определены следующим образом [10]:

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{AB}{B_eC_e} \cos\alpha_{\text{lim}} \right); \tag{13}$$

$$\theta_2 = 2\text{arctg}\left(\frac{m_\theta}{F_\theta - B_eD_e} \right). \tag{14}$$

Величины, входящие в формулы (13) и (14), определяются следующим образом:

$$B_eC_e = \sqrt{(2b)^2 + A_eC_e^2 + 2bA_eC_e \sin\alpha_{\text{max}}}; \tag{15}$$

$$p_\theta = \frac{1}{2}\left(B_eC_e + B_eD_e + C_eD_e\right); \tag{16}$$

$$r_\theta = \sqrt{\frac{(p_\theta - B_eC_e)(p_\theta - B_eD_e)(p_\theta - C_eD_e)}{p_\theta}}. \tag{17}$$

Зная угол $\theta = \theta_1 + \theta_2$ в основании ТБ, который является равнобедренным (см. рис. 2–4), его высоту $z_{\text{ТБ}}$ можно рассчитать по формуле

$$\text{ТО} = z_{TБ} = \frac{CD}{2} \cdot \text{tg}\,(\theta_1 + \theta_2). \tag{18}$$

Результаты (Results)

Если вторичный подвес СП в предельном положении равновесия образует треугольник (см. рис. 4), то это означает, что обе вторичные стропы будут нагружены и, соответственно, увеличены в длине. Однако в силу неравномерности распределения сил (нагрузки) между ними их растяжение (удлинение) будет неодинаковым.

Замечание 1. Можно показать, что вторичный подвес СП при расходящихся вторичных стропах ($\gamma > 0$) в предельном положении равновесия будет образовывать треугольник только при условии, когда $\chi \le \alpha_{\text{lim}}$, где $\frac{\pi}{2} + \chi$ — угол при вершине A_e треугольника вторичного подвеса $A_eB_eC_e$ (см. рис. 4).

Для оценки и расчета растягивающих сил, а также удлинения строп СП рассмотрим отдельно равновесие траверсы AB относительно системы координат Z_0SY. Это равновесие возможно, если проекции всех действующих сил на оси Z_0S и SY будут равны нулю (рис. 5), а именно:

$$-F_{ls}\cos\left(\varphi_l - \xi\right) + F_{ls}\cos\left(\alpha_{\text{max}} - \omega\right) + F_t - F_r\cos\left(\varphi_r + \xi\right) + F_{rs}\sin\left(\alpha_{\text{lim}} + \omega\right) = 0; \tag{19}$$

$$F_{ls}\sin\left(\alpha_{\lim}-\chi\right)+F_l\sin(\varphi_l-\xi)-F_r\sin\left(\varphi_r+\xi\right)-F_{rs}\cos\left(\alpha_{\lim}+\omega\right)=0, \quad (20)$$

где F_{ls}, F_{rs} — силы, растягивающие, соответственно, левую и правую вторичные стропы в предельном положении равновесия СП, Н.

Сумма моментов всех сил, приложенных к траверсе AB ($AB = 2b$) относительно центра A_e (см. рис. 5), также должна быть равна нулю, т. е. должно выполняться равенство

$$-F_l b\cos\alpha_{\max}+F_r\cdot 2b\sin\psi-F_{rs}\cdot 2b\sin\omega=0, \quad (21)$$

Система уравнений (19)–(21) представляет собой необходимые и достаточные условия равновесия траверсы AB с учетом всех приложенных к ней сил. Однако для определения четырех неизвестных сил: F_l, F_{ls}, F_r, F_{rs}, этого недостаточно. Поэтому дополнительно рассмотрим равновесие точки C_e, к которой приложены искомые силы F_{ls}, F_{rs}, а также сила F_c (рис. 6). Так как точка C_e находится в равновесии, векторная сумма всех приложенных к ней сил должна быть равна нулю.

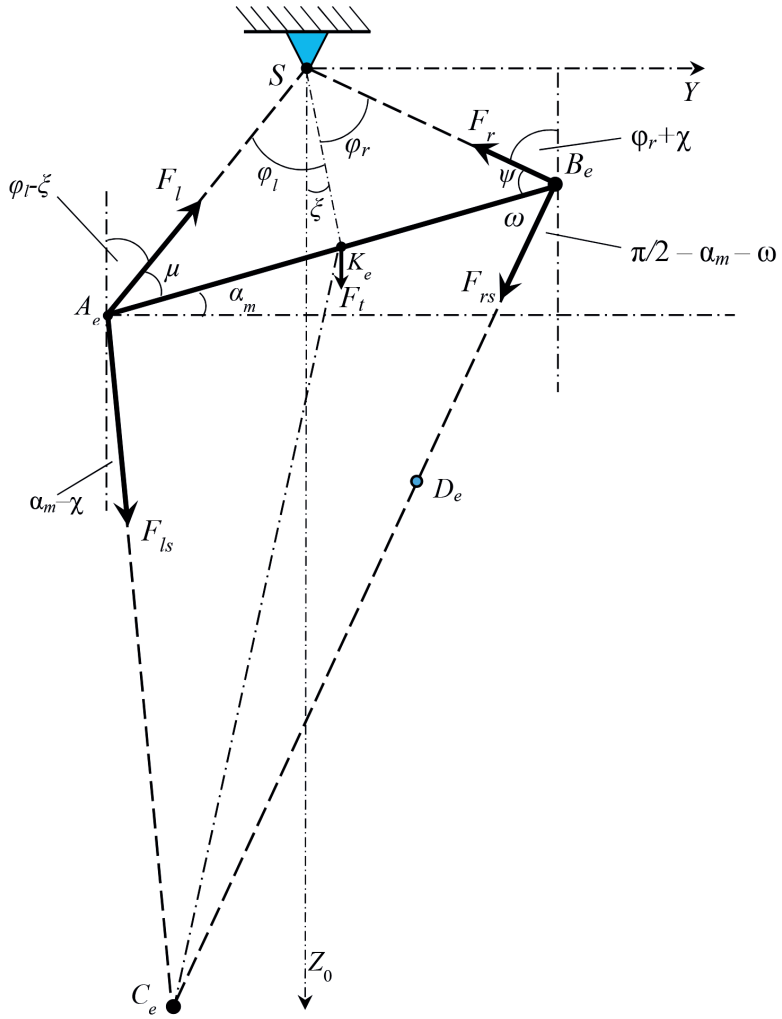


Рис. 5. Траверса AB в предельном положении равновесия
со всеми внешними силами (вторичный подвес системы образует треугольник)

Поскольку углы между этими силами известны, для вычисления неизвестных F_{ls}, F_{rs} можно записать следующие равенства:

$$F_{ls}=P_c\frac{\sin\left[\frac{\pi}{2}-\left(\alpha_{\lim}+\omega\right)\right]}{\sin\left(\frac{\pi}{2}+\chi+\omega\right)}=F_c\frac{\cos\left(\alpha_{\lim}+\omega\right)}{\cos\left(\chi+\omega\right)}; \quad (22)$$

$$F_{rs} = P_{\text{c}} \frac{\cos(\alpha_{\text{lim}} + \omega) \cdot \sin(\alpha_{\text{lim}} - \chi)}{\cos(\chi + \omega) \cdot \cos(\alpha_{\text{lim}} + \omega)} = F_{\text{c}} \frac{\sin(\alpha_{\text{lim}} - \chi)}{\cos(\chi + \omega)}. \quad (23)$$

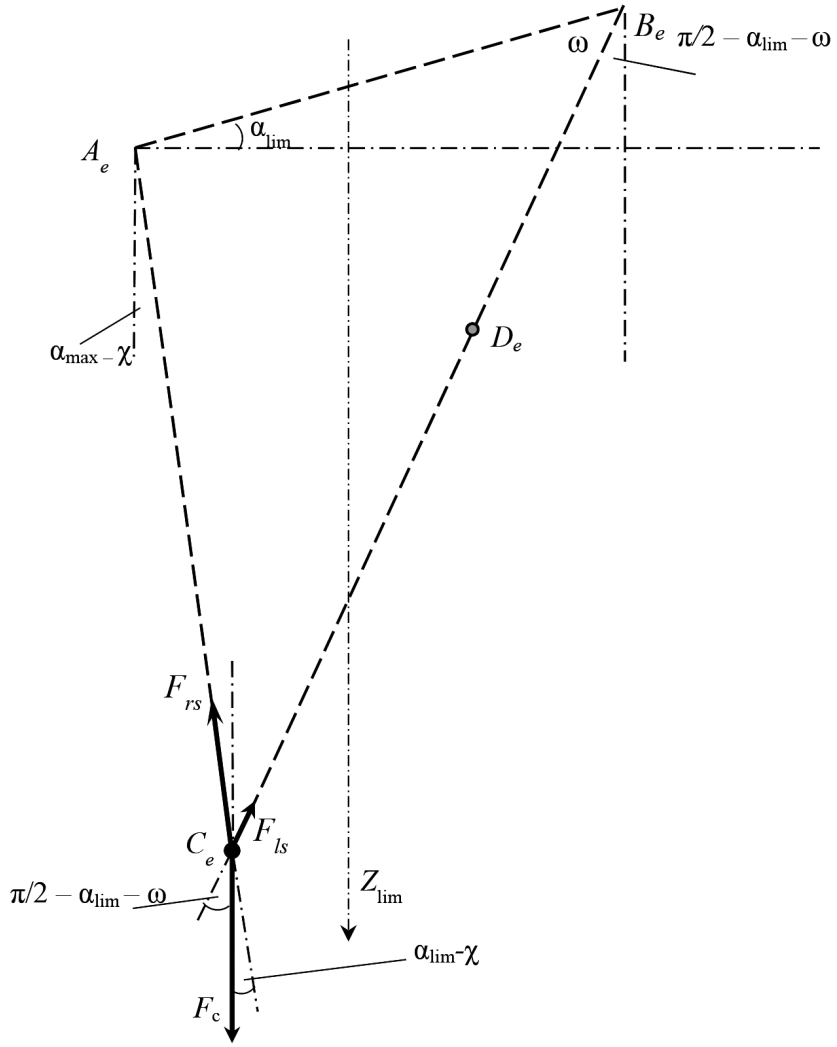


Рис. 6. Силы, приложенные к точке C_e (G) в предельном положении равновесия системы (вторичный подвес образует треугольник)

Для того чтобы найти две оставшиеся силы: F_r, F_l, подставим равенства (22) и (23) в уравнения (19) и (21). Тогда после преобразований уравнение (19) примет вид

$$F_{\text{c}} + F_t = F_l \cos(\varphi_l - \xi) + F_r \cos(\varphi_r + \xi), \quad (24)$$

а равенство (21) после преобразований можно записать следующим образом:

$$F_r = F_l \frac{\sin(\varphi_l - \xi)}{\sin(\varphi_r + \xi)}. \quad (25)$$

Подставляя равенство (25) в (24), можно в итоге получить следующее:

$$F_l = (F_{\text{c}} + F_t) \frac{\sin(\varphi_r + \xi)}{\sin(\varphi_r + \varphi_l)}; \quad (26)$$

$$F_r = (F_{\text{c}} + F_t) \frac{\sin(\varphi_l - \xi)}{\sin(\varphi_r + \varphi_l)}. \quad (27)$$

Вернемся теперь к уравнению моментов (21). Подставляя в него вместо F_r и F_{rs} их значения из выражений (23) и (27), получим следующее уравнение:

$$F_t b\cos\alpha_{\lim} + 2\left(F_c + F_t\right)\frac{\sin\left(\varphi_l - \xi\right)}{\sin\left(\varphi_r + \varphi_l\right)}\sin\psi - 2F_c\frac{\sin\left(\alpha_{\lim} - \chi\right)}{\cos\left(\chi + \omega\right)}\sin\omega = 0. \tag{29}$$

Если учесть:

$$\varphi_l - \xi = \frac{\pi}{2} - \mu - \alpha_{\lim};$$

$$\varphi_l + \varphi_r = \pi - \mu - \psi,$$

а также

$$\cos\left(\alpha_{\lim} + \mu\right) = \cos\alpha_{\lim}\cos\mu - \sin\alpha_{\lim}\sin\mu;$$

$$\sin\left(\alpha_{\lim} - \chi\right) = \sin\alpha_{\lim}\cos\chi - \cos\alpha_{\lim}\sin\chi,$$

то уравнение (29) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} -F_t b\cos\alpha_{\lim} + 2\left(F_c + F_t\right)\frac{\cos\alpha_{\lim}\cos\mu - \sin\alpha_{\lim}\sin\mu}{\sin\left(\psi + \mu\right)}\sin\psi - \\ - 2F_c\frac{\sin\alpha_{\lim}\cos\chi - \cos\alpha_{\lim}\sin\chi}{\cos\left(\chi + \omega\right)}\sin\omega = 0. \end{aligned} \tag{30}$$

Разделим обе части уравнения (30) на $\cos\alpha_{\lim}$ и выразим его относительно $\operatorname{tg}\alpha_{\lim}$. В результате получим следующее:

$$\operatorname{tg}\alpha_{\lim} = \frac{\left[\left(1 + \frac{F_t}{F_c}\right)\frac{\cos\mu\cdot\sin\psi}{\sin\left(\mu + \psi\right)} + \frac{\sin\chi\sin\omega}{\cos\left(\chi + \omega\right)} - \frac{F_t}{2F_c}\right]}{\left(1 + \frac{F_t}{F_c}\right)\left[\frac{\sin\mu\cdot\sin\psi}{\sin\left(\mu + \psi\right)} + \frac{\cos\chi\sin\omega}{\cos\left(\chi + \omega\right)}\right]}. \tag{31}$$

Используя уравнение (31), можно вычислить предельный угол отклонения траверсы AB в положении равновесия СП при всех растяжимых стропах.

Замечание 2. Углы χ, ω (см. рис. 4–6), входящие в уравнения (22), (23) и (29)–(31), могут быть найдены из треугольника $A_eB_eC_e$ по теореме синусов [10], а именно:

$$\chi = 2\operatorname{arctg}\left(\frac{r_\chi}{p_\chi - CD - B_eD_e}\right) - \frac{\pi}{2}; \tag{32}$$

$$\omega = 2\operatorname{arctg}\left(\frac{r_\chi}{p_\chi - A_eC_e}\right), \tag{33}$$

Входящие в уравнения (22) и (23) параметры определяются следующим образом:

$$p_\chi = \frac{1}{2}\left(AB + A_eC_e + B_eD_e + CD\right); \tag{34}$$

$$r_\chi = \sqrt{\frac{(p_\chi - AB)(p_\chi - A_eC_e)(p_\chi - CD - B_eD_e)}{p_\chi}}. \tag{35}$$

Для определения угла θ в основании треугольника безопасности C_eTD_e (см. рис. 4), который определяет границы допустимой области положения ЦТ груза, воспользуемся тем, что боковая сторона C_eT этого треугольника параллельна вертикали SZ_0 (см. рис. 4). Тогда можно записать следующее:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha_{\lim} - \omega. \tag{36}$$

Высота треугольника безопасности $z_{\text{ТБ}}$ (отрезок *OT* на рис. 4) может быть рассчитана по формуле (18).

Пример. Система подвешивания с грузом $F_{\text{c}} = 60mc \approx 6 \cdot 10^5$ Н имеет следующие характеристики: $\gamma = 2^{\circ}$ (вторичные стропы расходятся книзу); $\varphi = 30^{\circ}$; длина траверсы $AB = 2b = 2$ м; длина первичных строп $SA = SB = 2{,}00$ м; длина вторичных строп $BD = AC = 12$ м; масса (вес) траверсы $F_t = 6mc \approx 2 \cdot 10^4$ Н. Необходимо оценить размеры ТБ при условии, что все стропы СП растяжимы. При этом следует рассмотреть два случая: 1-й случай — $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0{,}023$; 2-й случай — $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0{,}07$.

Решение

1-й случай: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0{,}023$.

1. Вначале по формулам (1)–(3) вычислим силы, удлиняющие первичные стропы:

$$\alpha_{\text{lim}}^0 = \text{arctg}\frac{\text{tg } 30}{\left(1+\dfrac{2}{60}\right)} = 29{,}20^{\circ};$$

$$F_r = (F_{\text{c}} + F_t)\frac{\sin\left(\varphi - \alpha_{\text{lim}}^0\right)}{\sin 2\varphi} = 0{,}9995 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

$$F_l = (F_{\text{c}} + F_t)\frac{\sin\left(\varphi + \alpha_{\text{lim}}^0\right)}{\sin 2\varphi} = 61{,}50 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

2. Теперь по формулам (4) и (5) определим силу F_{lim}, растягивающую первичные стропы и, соответственно, их длину:

$$F_{\text{lim1}} = \frac{\left(F_c + F_t\right)}{2\cos\varphi} = \frac{\left(60+2\right)\cdot 10^4}{2 \cdot 0{,}8660} = 35{,}80 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

$$SA = SB = \frac{b}{\sin\varphi} = \frac{1}{0{,}5} = 2{,}00 \text{ м};$$

$$SA_e = SA + \frac{F_l SA\varepsilon_1}{F_{\text{lim1}}} = 2 + \frac{61{,}50 \cdot 2 \cdot 0{,}023}{35{,}80} = 2{,}079 \text{ м};$$

$$SB_e = SB + \frac{F_r SB\varepsilon_1}{F_{\text{lim1}}} = 2 + \frac{0{,}9995 \cdot 2 \cdot 0{,}023}{38{,}50} = 2{,}001 \text{ м}.$$

3. По формулам (7)–(10) вычислим углы μ и ψ:

$$p_\alpha = \frac{1}{2}\left(SA_e + SB_e + AB\right) = 3{,}04 \text{ м};$$

$$r_\alpha = \sqrt{\frac{(p_\alpha - SA_e)(p_\alpha - SB_e)(p_\alpha - AB)}{p_\alpha}} = 0{,}5845 \text{ м};$$

$$\mu = 2\text{arctg}\left(\frac{r_\alpha}{p_\alpha - SB_e}\right) = 57{,}72^{\circ};$$

$$\psi = 2\text{arctg}\left(\frac{r_\alpha}{p_\alpha - SA_e}\right) = 62{,}62^{\circ}.$$

4. С учетом растяжения первичных строп пересчитаем угол α_{lim} по формуле (10):

$$\alpha_{\text{lim}} = \text{arctg}\left[\text{ctg}\,\mu - \frac{F_t}{2\left(F_{\text{c}} + F_t\right)} \cdot \left(\text{ctg}\,\mu + \text{ctg}\,\psi\right)\right] = 31{,}90^{\circ}.$$

5. По теореме синусов [10] из треугольника $A_eB_eC_e$ (см. рис. 4) вычислим угол χ:

$$CD = C_eD_e = AB + 2AC\sin\gamma = 2{,}838 \text{ м};$$

$$p_\chi = \frac{1}{2}\left(AB + A_eC_e + B_eD_e + CD\right) = 14{,}419 \text{ м}.$$

Полупериметр этого треугольника оказался меньше одной из его сторон ($C_eD_e + B_eD_e =$ = 14,838 м > 14,419 м). Это означает, что фигура $A_eB_eC_eD_e$ не может быть треугольником. Таким образом, в предельном положении равновесия вторичный подвес может образовывать только четырехугольник (см. рис. 3).

6. Учитывая вышеизложенное, определим по формулам (11), (12) растяжение только одной (левой) вторичной стропы, так как именно к ней будет приложена вся нагрузка от груза F_c, а именно:

$$F_{\text{lim}2} = \frac{F_c}{2\cos\ \gamma} = \frac{60\cdot 10^4}{2\cos 2} = 30{,}18\cdot 10^4 \text{ Н};$$

$$A_eC_e = AC + \frac{F_c AC\varepsilon_2}{F_{\text{lim}2}} = 12 + \frac{60\cdot 12\cdot 0{,}023}{30{,}18} = 12{,}538 \text{ м}.$$

7. Теперь по формулам (13)–(17) вычислим угол $\theta = \theta_1 + \theta_2$ в основании треугольника безопасности:

$$B_eC_e = \sqrt{(2b)^2 + A_eC_e^2 + 2b\cdot A_eC_e\sin\alpha_{\text{lim}}} = \sqrt{4 + 157{,}201 + 26{,}591} = 13{,}704 \text{ м};$$

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{2b}{BC}\cos\alpha_{\text{lim}}\right) = 8{,}134°. \quad p_\theta = \frac{1}{2}\left(B_eC_e + B_eD_e + C_eD_e\right) = 14{,}271 \text{ м};$$

$$r_\theta = \sqrt{\frac{(p_\theta - B_eC_e)(p_\theta - B_eD_e)(p_\theta - CD)}{p_\theta}} = 1{,}0157 \text{ м};$$

$$\theta_2 = 2\text{arctg}\left(\frac{r_\theta}{p_\theta - B_eD_e}\right) = 2\text{arctg}\left(\frac{1{,}0157}{14{,}271 - 12}\right) = 48{,}19°.$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = 8{,}134 + 48{,}19 = 56{,}33°.$$

8. Вычислим высоту треугольника безопасности по формуле (19):

$$\text{ТО} = z_{ТБ} = \frac{CD}{2}\text{tg}\ \theta = 2{,}130 \text{ м}.$$

2-й случай: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0{,}07$.

1. По формуле (4) определим удлинение первичных строп:

$$SA_e = SA + \frac{F_l SA\varepsilon_1}{F_{\text{lim}1}} = 2 + \frac{61{,}50\cdot 2\cdot 0{,}07}{35{,}80} = 2{,}241 \text{ м};$$

$$SB_e = SB + \frac{F_r SB\varepsilon_1}{F_{\text{lim}1}} = 2 + \frac{0{,}9995\cdot 2\cdot 0{,}07}{38{,}50} = 2{,}004 \text{ м};$$

2. По формулам (7)–(10) вычислим углы μ и ψ:

$$p_\alpha = \frac{1}{2}\left(SA_e + SB_e + AB\right) = 3{,}123 \text{ м};$$

$$r_\alpha = \sqrt{\frac{(p_\alpha - SA_e)(p_\alpha - SB_e)(p_\alpha - AB)}{p_\alpha}} = 0{,}5957 \text{ м};$$

$$\mu = 2\text{arctg}\left(\frac{r_\alpha}{p_\alpha - SB_e}\right) = 56{,}06°; \quad \psi = 2\text{arctg}\left(\frac{r_\alpha}{p_\alpha - S\square_e}\right) = 68{,}07°.$$

3. Пересчитаем угол α_{lim} по формуле (10):

$$\alpha_{\lim} = \operatorname{arctg}\left[\operatorname{ctg}\mu - \frac{F_t}{2\left(F_c + F_t\right)}\left(\operatorname{ctg}\mu + \operatorname{ctg}\psi\right)\right] = 33{,}25°.$$

4. Длина левой вторичной стропы будет

$$A_eC_e = AC + \frac{F_c AC\mu_2}{F_{\lim 2}} = 12 + \frac{60\cdot 12\cdot 0{,}07}{30{,}18} = 13{,}670 \text{ м};$$

5. По теореме синусов [10] из треугольника $A_eB_eD_eC_e$ (рис. 4) вычислим угол χ:

$$p_\chi = \frac{1}{2}\left(AB + A_eC_e + B_eD_e + CD\right) = 15{,}254 \text{ м};$$

$$r_\chi = \sqrt{\frac{(p_\chi - AB)(p_\chi - A_eC_e)(p_\chi - CD - B_eD_e)}{p_\chi}} = 0{,}75667 \text{ м};$$

$$\chi = 2\operatorname{arctg}\left(\frac{r_\chi}{p_\chi - CD - B_eD_e}\right) - \frac{\pi}{2} = 32{,}40°.$$

Из последнего следует, что $\chi = 32{,}40 < \alpha_{max} = 33{,}25$. Это означает, что в предельном положении равновесия (при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0{,}07$) вторичный подвес образует треугольник. Поэтому необходимо рассчитать удлинение не только левой, но и правой вторичной стропы следующим образом:

1. Вначале вычислим угол ω по формуле (33):

$$\omega = 2\operatorname{arctg}\left(\frac{r_\chi}{p_\chi - A_eC_e}\right) = 2\operatorname{arctg}\left(\frac{0{,}75667}{1{,}584}\right) = 51{,}07°.$$

2. Теперь по формулам (22), (23) вычислим силы, растягивающие вторичные стропы:

$$F_{ls} = F_c\frac{\cos\left(\alpha_{\lim} + \omega\right)}{\cos\left(\chi + \omega\right)} = 60\cdot 10^4\frac{\cos\left(33{,}25 + 51{,}07\right)}{\cos\left(32{,}40 + 51{,}07\right)} = 52{,}22\cdot 10^4 \text{ Н};$$

$$F_{rs} = F_c\frac{\sin\left(\alpha_{\lim} - \chi\right)}{\cos\left(\chi + \omega\right)} = 60\cdot 10^4\frac{\sin\left(33{,}25 - 32{,}40\right)}{\cos\left(32{,}40 + 51{,}07\right)} = 7{,}827\cdot 10^4 \text{ Н}.$$

3. Затем вычислим длины вторичных строп:

$$A_eC_e = AC + \frac{F_{ls}AC\varepsilon_2}{F_{\lim 2}} = 12 + \frac{52{,}22\cdot 12\cdot 0{,}07}{30{,}18} = 13{,}453 \text{ м};$$

$$B_eD_e = BD + \frac{F_{rs}BD\varepsilon_2}{F_{\lim 2}} = 12 + \frac{7{,}827\cdot 12\cdot 0{,}07}{30{,}18} = 12{,}218 \text{ м}.$$

4. Теперь по формулам (32)–(35) пересчитаем углы χ и ω:

$$p_\chi = \frac{1}{2}\left(AB + A_eC_e + B_eD_e + CD\right) = 15{,}255 \text{ м};$$

$$r_\chi = \sqrt{\frac{(p_\chi - AB)(p_\chi - A_eC_e)(p_\chi - CD - B_eD_e)}{p_\chi}} = 0{,}5582 \text{ м};$$

$$\chi = 2\operatorname{arctg}\left(\frac{r_\chi}{p_\chi - CD - B_eD_e}\right) - \frac{\pi}{2} = 50{,}76°;$$

$$\omega = 2\operatorname{arctg}\left(\frac{r_\chi}{p_\chi - A_eC_e}\right) = 34{,}42°.$$

5. Затем по формуле (31) можно пересчитать угол предельного отклонения траверсы AB в предельном положении равновесия:

$$\text{tg}\,\alpha_{\text{lim}} = \frac{\left[\left(1+\frac{F_t}{F_c}\right)\frac{\cos\mu\,\sin\psi}{\sin(\mu+\psi)} + \frac{\sin\chi\,\sin\omega}{\cos(\chi+\omega)} - \frac{F_t}{2F_c}\right]}{\left(1+\frac{F_t}{F_c}\right)\left[\frac{\sin\mu\,\sin\psi}{\sin(\mu+\psi)} + \frac{\cos\chi\,\sin\omega}{\cos(\chi+\omega)}\right]} = 1{,}0869;$$

$$\alpha_{\text{lim}} = 47{,}39°.$$

6. Тогда угол при основании треугольника безопасности θ будет равен по формуле (36)

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha_{\text{lim}} - \omega = 90 - 47{,}39 - 34{,}42 = 8{,}19°.$$

7. Высота ТБ по формуле (19)

$$z_{\text{ТБ}} = \frac{CD}{2}\,\text{tg}\,\theta = \frac{2{,}838}{2}\cdot \text{tg}\,8{,}19 = 0{,}204 \text{ м}.$$

Рассмотренный расчетный пример показывает, что при относительном удлинении всех строп: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0{,}023$ высота треугольника безопасности $z_{\max} = 3{,}246$ м, а при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0{,}07$ — всего лишь 0,204 м. При этом основание ТБ в обоих случаях одинаковое ($CD = 2{,}838$ м). Таким образом, устойчивость СП существенным образом зависит от степени эластичности строп (их относительного удлинения ε).

Выводы (Summary)

1. Выполнен анализ устойчивости и разработана методика оценки расчета треугольника безопасности (ТБ) двухзвенных систем подвешивания КТГ с эластичными стропами при условии, что в первоначальном положении вторичные стропы СП не параллельны друг другу и расходятся книзу ($\gamma > 0$).

2. Показано, что в предельном положении устойчивого равновесия СП ее вторичный подвес может образовывать или четырехугольник, или треугольник. Для обоих случаев получены аналитические выражения для расчета высоты треугольника безопасности (ТБ) — $z_{\text{ТБ}}$, а также максимального угла отклонения траверсы α_{lim}.

3. Установлено, что высота ТБ существенно зависит от степени эластичности строп СП: чем выше эластичность ε, тем меньше высота и площадь треугольника безопасности, а значит, и менее устойчивой становится система подвешивания в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Никитин Е. В.* Устойчивость двухзвенной системы подвешивания груза с параллельными стропами вторичного подвеса / Е. В. Никитин // Вестник Одесского национального морского университета. — 2013. — № 3 (39). — С. 156–167.

2. *Никитин Е. В.* Устойчивость равновесия двухзвенной системы подвешивания габаритного груза / Е. В. Никитин // Сборник научных трудов Академии ВМС им. П. С. Нахимова. — Севастополь, 2013. — № 1 (13). — С. 184–191.

3. *Никитин Е. В.* Устойчивость сложных систем подвешивания корабельных грузов с непараллельными стропами вторичного подвеса / Е. В. Никитин // Сборник научных трудов Академии ВМС им. П. С. Нахимова. — Севастополь, 2013. — № 4 (16). — С. 161–172.

4. *Nikitin Y. V.* Static and tip-over stability analysis of two-chain suspension arrangements for large scale cargo operations / Y. V. Nikitin // WMU Journal of Maritime Affairs. — 2014. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 101–126. DOI: 10.1007/s13437-013-0054-5.

5. *Никитин Е. В.* Анализ устойчивости двухзвенных систем подвешивания с эластичными стропами при погрузке/выгрузке крупногабаритных и тяжеловесных грузов / Е. В. Никитин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1197–1208. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1197-1208.

6. *Kaps H.* Stabiltät von Anschlagvorkehrugen / H. Kaps // Schiff & Haffen. — No.5. — Pp. 56–58.

7. *Kaps H.* BBC Guideline. Safe Solutions for Project Cargo Operations. Version 1.0 / H. Kaps. — BBC Chartering&LogisticsGmbH&Ko, 2009. — 76 p.

8. *Тарг С. М.* Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. — М.: Наука, 1972. — 478 с.

9. *Kaps H.* Stability of Cargo Suspension Arrangements. Transport Information Service (TIS). 2013. — 26 p.

10. *Бронштейн И. Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — М.: Главиздат, 1953. — 608 с.

REFERENCES

1. Nikitin, Y. V. “Ustoichivost’ dvukhzvennoi sistemy podveshivaniya gruza s parallel’nymi stropami vtorichnogo podvesa.” *Vestnik odesskogo natsional’nogo morskogo universiteta* 3(39) (2013): 156–167.

2. Nikitin, Y. V. “Ustoichivist’ slozhnykh sistem podveshivania gabaritnogo gruza.” *Sbornik trudov Academii imeni H.S. Nakhimova*. Is. 1 (13). Sevastopol, 2013. 184–191.

3. Nikitin, Y. V. “Ustoichivist’ ravnovesia dvukhzvennoi sistemuy podveshivania korabrl’nykh gruzjv s neparallek’nyvi stropavi vtorichnogo podvesa.” *Sbornik trudov Academii imeni H.S.Nakhimova*. Is. 4 (16). Sevastopol, 2013. 161–172.

4. Nikitin, Yevgeny V. “Static and tip-over stability analysis of two-chain suspension arrangements for large-scale cargo operations.” *WMU Journal of Maritime Affairs* 13.1 (2014): 101–126. DOI 10.1007/s13437-013-0054-5.

5. Nikitin, Yevgeny V. “Stability analysis of two-chain suspension arrangement with elastic slings for large-escale and heavy lift cargo operations.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1197–1208. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1197-1208.

6. Kaps, H. “Stabiltät von Anschlagvorkehrugen.” *Schiff&Haffen* 5: 56–58.

7. Kaps, H. *BBC Guideline. Safe Solutions for Project Cargo Operations. Version 1.0.* BBC Chartering & Logistics GmbH&Ko, 2009.

8. Targ, S. M. *Kratkii kurs teoreticheskoi mekhaniki*. M.: Vysshaya shkola, 1986.

9. Kaps, H. *Stability of Cargo Suspension Arrangements. Transport Information Service (TIS).* 2013.

10. Bronshtein, I. N., and K. A. Semendyaev. S*pravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov.* M.: Glavizdat, 1953.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никитин Евгений Васильевич —
доктор технических наук, профессор
Севастопольский государственный университет
299053, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: *yvnik76@yandex.ru*

Подпорин Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент
Севастопольский государственный университет
299053, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: *s.a.podporin@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikitin, Yevgeny V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
The Sevastopol State University
33 Universitetskya Str., Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: *yvnik76@yandex.ru*

Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor
The Sevastopol State University
33 Universitetskya Str., Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: *s.a.podporin@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2018 г.
Received: December 5, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-57-67

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE IMPACT OF A CONTAINER TERMINAL ZONING ON ITS OPERATION EFFICIENCY UNDER THE CONDITIONS OF THE FREE PORT VLADIVOSTOK

A. A. Yanchenko, T. E. Malikova, D. A. Oskin

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

Technological improvements in material handling at seaports is a complex, multi-stage process with a large, inhomogeneous structure of input-output parameters, and a possible return to initial calculation stages. Mathematical modeling and numerical experiment, replacing a real experiment, contribute to speed up this process and bring it to a higher quality level. The analysis of the research works reveals a new process approach-based methodology for improving cargo handling technologies in operating port. This approach became a base for the mathematical models construction for the import cargo handling technology at the container terminal under the preferences of the Free Port of Vladivostok. The mathematical models implementation of import container flow control system at sea terminal under the real conditions (the base version) and proposed conditions (with use of warehouse-zoning logistic technology according to the Pareto principle within the preliminary informing of maritime transport regulatory authorities) is performed on the discrete event simulation platform – MATLAB / Simulink. The universal description of possible import freight routes through the terminal provides low labor intensity of the experiments planning and changing the transport and technological pattern of the analyzed process in a more flexible way. The results of numerical experiments on evaluating the container terminal operation showed a significant advantage of the proposed flowchart of import container cargo handling (reduction of cargo storage time in the storage area). The simulation experiment results demonstrate that the zoning technology implementation according to the Pareto principle at the seaport container terminal (if the vessel has permission according to the preliminary informing technology of the state regulatory authorities) is possible.

Keywords: cargo terminal, technological operations, import cargo flow, simulation, numerical experi-ment, preliminary informing.

For citation:
Yanchenko, Anna A., Tatiana E. Malikova, and Dmitry A. Oskin. "Experimental studies of the impact of a container terminal zoning on its operation efficiency under the conditions of the free port Vladivostok." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 57–67. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-57-67.

УДК 656.073.235: 656.073.28

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗОНИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОГО ПОРТА ВЛАДИВОСТОК

А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, Д. А. Оськин

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

В статье рассмотрен вопрос совершенствования технологии организации и управления перегрузочными процессами в портах, являющийся сложным многоступенчатым творческим процессом с большим неоднородным составом входных и выходных параметров, а также возможным неоднократным возвратом на начальные ступени расчета. При этом математическое моделирование и численный эксперимент, заменяя натурный эксперимент, позволяют ускорить этот процесс и вывести его на более качественный уровень. Выполненный анализ трудов различных авторов дает возможность сделать вывод о формировании новой методологии проектирования систем управления и совершенствования технологических операций обработки груза в уже работающем порту на основе процессного подхода. Этот подход и послужил

основой для построения математических моделей исследуемых технологий обработки импортных грузопотоков на контейнерном терминале в условиях преференций Свободного порта Владивосток на основе имитационного моделирования. Реализация математических моделей системы управления импортным контейнерным потоком на морском терминале в существующих условиях функционирования (базовый вариант) и предлагаемых условиях (с использованием логистической технологии зонирования складских площадей по принципу Парето в рамках предварительного информирования контролирующих органов на морском транспорте) выполнена на платформе инструментария дискретно-событийного имитационного моделирования пакета MATLAB / Simulink. Универсальный формат описания возможных маршрутов прохождения импортного грузопотока через терминал, используемый при моделировании, обеспечивает низкую трудоемкость планирования экспериментов, позволяя гибко менять транспортно-технологическую схему анализируемого процесса. Результаты численных экспериментов оценки работы контейнерного терминала показали существенное преимущество (сокращение времени фактического нахождения груза в зоне хранения) предложенной последовательности технологических операций обработки импортного контейнерного потока. На основе имитационного эксперимента был сделан вывод о возможности реализации технологии зонирования по принципу Парето на контейнерном терминале морского порта (при условии оформления судна по технологии предварительного информирования государственных контрольных органов).

Ключевые слова: грузовой терминал, технологические операции, импортный грузопоток, имитационное моделирование, численный эксперимент, предварительное информирование.

Для цитирования:
Янченко А. А. Экспериментальные исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы в условиях свободного порта Владивосток / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, Д. А. Оськин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 57–67. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-57-67.

Введение (Introduction)

В Морском государственном университете имени адмирала Г. И. Невельского проводятся исследования [1]–[3], связанные с разработкой новых технологий обработки импортных грузопотоков на контейнерных терминалах в связи с введением в действие Федерального закона «О свободном порте Владивосток» (СПВ)[1]. В частности, исследуется возможность организации работы контейнерного терминала по переработке контейнерных грузопотоков с использованием логистической технологии зонирования складских площадей по принципу Парето в рамках предварительного информирования контролирующих органов на морском транспорте. При этом предварительное информирование, ставшее для морского транспорта обязательным, согласно п. 22 ст. 212-ФЗ, рассматривается как условие внешней среды, позволяющее изменять технологические процессы внутрипортовой обработки груза. Предложенная технология предполагает за счет разделения зон терминала на «холодную» и «горячую» целенаправленно при выгрузке делить грузопоток, прибывший на конкретном судне, на потоки, требующие проведения таможенного осмотра (около 20 % грузопотока) и не требующие такового (около 80 %), и распределять их по этому признаку в соответствующие зоны хранения — горячую и холодную соответственно.

В ходе научного исследования была выдвинута гипотеза о внедрении технологии зонирования, которая может дать экономический эффект за счет рационального распределения грузопотока на складе, сокращения внутрипортовых транспортных операций по обеспечению проведения контрольных мероприятий и, как следствие, увеличить производительность терминала за счет сокращения времени фактического нахождения груза в зоне хранения. Для подтверждения или опровержения гипотезы и определения условий рационального управления грузопотоком на контейнерном терминале при организации двухзвенной системы зонирования был выполнен ряд численных экспериментов на основе имитационного моделирования. Следует отметить, что совершенствование технологий организации и управления перегрузочными

[1] О свободном порте Владивосток: Федеральный закон от 13.07.2015 N 212-ФЗ (ред. от 03.07.2016) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182596/ (дата обращения: 10.02.18).

процессами в портах — сложный многоступенчатый творческий процесс с большим, неоднородным составом входных и выходных параметров, а также возможным неоднократным возвратом на начальные ступени расчета. При этом математическое моделирование и численный эксперимент, заменяя натурный эксперимент, позволяют ускорить этот процесс и вывести его на более качественный уровень.

Обзор научных источников, как российских, так и зарубежных, показал, что наиболее востребованное направление исследования сложных систем портов и портовых терминалов, связанное с их проектированием, эксплуатацией и управлением, базируется на методах теории массового обслуживания. Среди зарубежных авторов можно выделить работы C. Tan, J. He [4], L. Wang, X. Zhu [5], Ж.-П. Родригэ [6], Т. Ноттебум [7], П. Хестер [8] и др. Исследованию перспектив развития контейнерных перевозок в целом и на примере отдельных российских портов в частности с использованием различных методов моделирования посвящены труды [9], [10]. Так, в статье [9] представлена методика обоснования контейнеропригодности грузов региона и планирование потребности региона в контейнеризации на основе имитационного моделирования. В работе [10] проанализировано состояние и представлены перспективы развития контейнерных перевозок в порту Новороссийск на основе статистического моделирования. На основе имитационного моделирования с применением интеллектуальных систем были выполнены численные эксперименты при изучении вопросов взаимодействия морского и железнодорожного транспорта, их «стыковка» при осуществлении погрузочно-разгрузочных работ в морском порту [11], [12], а также исследован процесс управления перевозками грузов с использованием информационной системы предприятия морского транспорта [13], [14].

Фундаментальные научные исследования в области эксплуатации морских терминалов, совершенствования технологических процессов работы порта, технологического проектирования порта и контейнерных терминалов с использованием методов математического моделирования представлены в трудах профессоров А. Л. Кузнецова и А. В. Кириченко [15]–[21]. В статьях [15]–[17] выполнен обзор возможностей проектирования, создания и эксплуатации сложных производственных объектов, таких как морской порт и терминал, на основе различных математических моделей (расчетно-аналитических, статистических испытаний, генерации вероятностных сценариев, имитационных моделей). Практические результаты исследования изложены в статьях [18]–[21]. Так, на основе имитационного моделирования и численного эксперимента разработан метод оценки количества причалов для размещения навалочных грузов [18]; выполнен расчет всех возможных грузопотоков, требующих обработки в порту, и описаны маршруты прохождения различных типов грузов через терминал порта, в том числе контейнерный терминал типа «сухой порт» [19], [20]; предложен метод оценки производительности технологических операций при планировании и нормировании операционной деятельности терминала порта исходя из их длительности [21].

Анализ трудов указанных ранее авторов позволил сделать вывод о формировании новой методологии проектирования систем управления и совершенствования технологических операций обработки груза в уже работающем порту (в том числе при наличии различных внешних граничных условий) на основе процессного подхода [22]. Процессный подход к моделированию систем массового обслуживания (СМО) порта и портовых терминалов, апробированный в этих работах и давший положительные результаты, был принят за основу представленного исследования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Эмпирические исследования предложенной системы управления контейнерным потоком выполнены на основе дискретно-событийного имитационного моделирования, позволяющего оценить степень влияния предварительного информирования и зонирования контейнерного терминала на ускорение технологического процесса с момента выгрузки до фактического вывоза контейнеров с территории порта. В качестве инструмента для проведения сравнительного анализа

работы контейнерного терминала при различных условиях функционирования были разработаны три модели СМО, рассмотренные в статьях [23]–[25]. *Первая модель* — модель базового варианта (применяется классическая технология обработки контейнеров без учета возникших изменений во внешней среде функционирующей системы) [23]. *Вторая модель* — модель варианта терминальной обработки контейнерного потока при условии внешней среды (предварительном информировании государственных контрольных органов) [24]. *Третья модель* — предложенный вариант изменения элементов технологического процесса посредством внедрения логистической технологии зонирования [25].

Реализация моделей была выполнена на платформе инструментария дискретно-событийного имитационного моделирования пакет MATLAB / Simulink (версия R2017b) с использованием прикладной библиотеки SimEvents. Данный пакет прикладных программ был выбран исходя из того, что важной опцией для создания системы управления потоковыми процессами на контейнерном терминале является визуализация процесса наблюдения за движения объектов в системе, а также наличие удобного адаптированного интерфейса для поддержки моделирования потока объектов. Обобщенная схема проектируемой модели представлена на рис. 1.

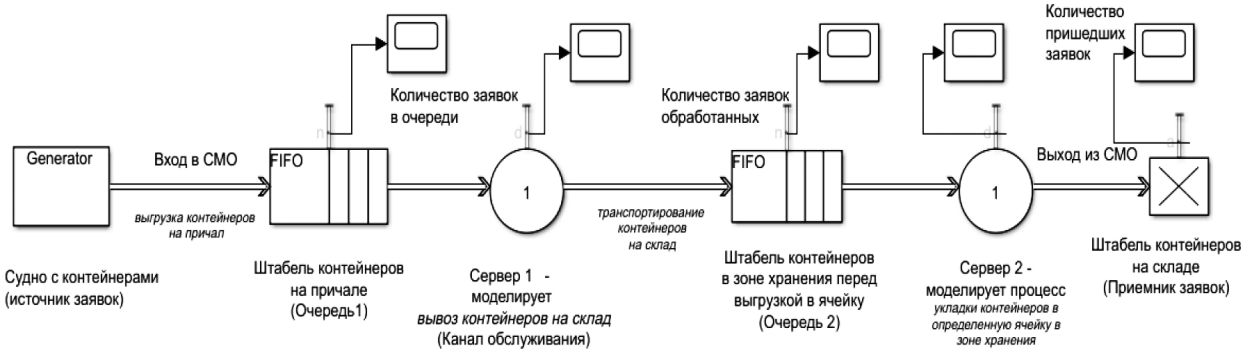


Рис. 1. Схема проектируемой модели СМО в общем виде

Входные данные и правила обслуживания заявок в эксперименте определяются исходя из основных параметров исследуемого терминала (площади терминала, контейнеровместимости, наличия терминальной техники и оборудования для обработки прибывающего контейнерного потока). При моделировании эти данные заносятся посредством диалоговых окон в характеристики каждого блока модели.

В результате численного эксперимента определяются следующие характеристики СМО: время завершения обслуживания заявок по разным вариантам функционирования системы; общее количество обработанных заявок; количество заявок (контейнеров), направленных на осмотр (досмотр); количество заявок в очереди (необработанных заявок), длина очередей.

В ходе подготовки к выполнению эмпирического исследования были смоделированы различные варианты транспортно-технологических схем анализируемого процесса терминальной обработки контейнеров (базового и предлагаемого вариантов). Отличительными особенностями разработанных моделей является то, что в зависимости от условий функционирования контейнерного терминала в базовую модель (см. рис. 1) добавляются дополнительные элементы к уже существующим и / или какие-то из базовых элементов заменяются на другие, а также изменяются входные параметры модели.

На рис. 2 показан процесс симуляции одного из вариантов транспортно-технологической схемы с использованием модели зонирования контейнерного терминала. Реализация технологии зонирования контейнерного терминала осуществляется с учетом внешнего условия — оформления прибывшего судна и груза по технологии предварительного информирования государственных контролирующих органов. Обработка поступающих контейнеров осуществляется по одной технологической линии, при этом добавлены элементы, позволяющие разделять все

заявки после выгрузки в зависимости от дальнейших действий с контейнерами (см. рис. 2 операция *3*): транспортирование в «холодную» зону хранения до вывоза из порта (около 80 % заявок) или транспортирование в «горячую» зону таможенного осмотра (досмотра) — около 20 % заявок.

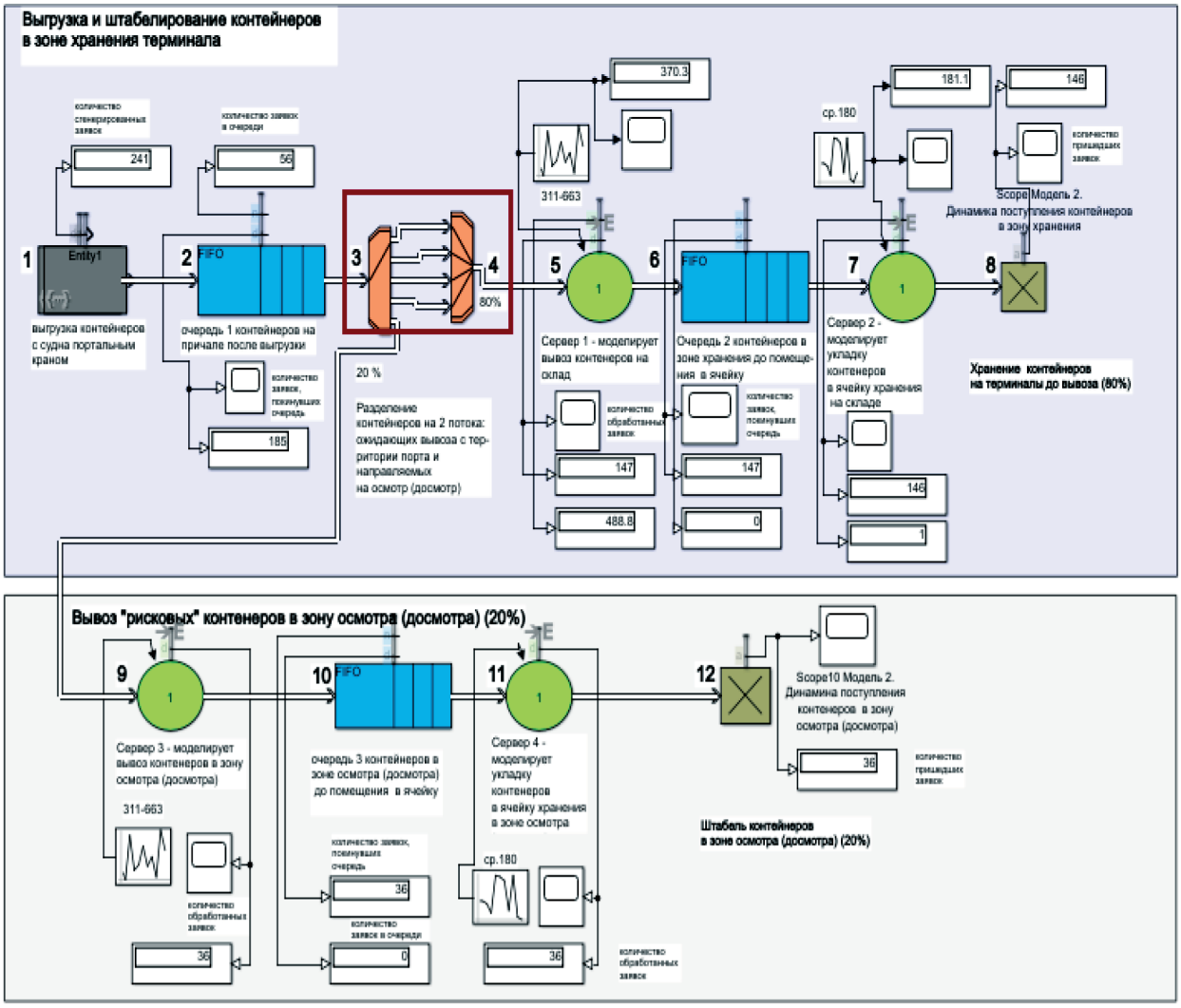


Рис. 2. Модель процесса терминальной обработки прибывающего контейнерного потока с применением технологии зонирования контейнерного терминала

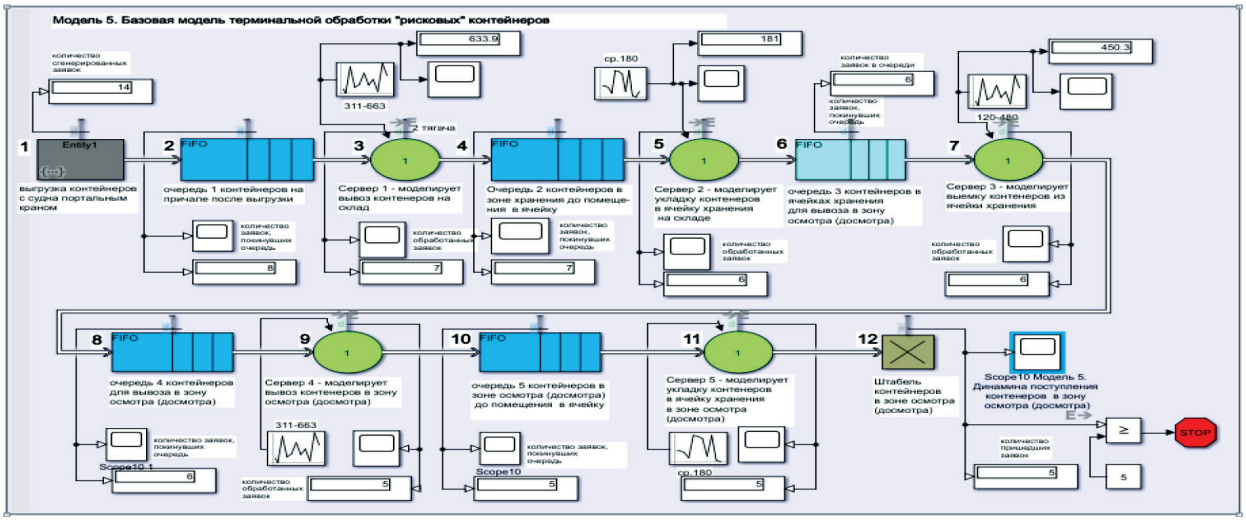
Аналогично в среде MATLAB / Simulink были построены модели базового (существующего) варианта терминальной обработки импортного контейнерного потока и модель терминальной обработки с применением технологии предварительного информирования государственных контролирующих органов (ГКО). Следует отметить, что модель процесса терминальной обработки прибывающего импортного контейнерного потока с применением технологии предварительного информирования структурно совпадает с моделью базового варианта. В результате выполнения части операций таможенного оформления на этапе «до прибытия» (подача в ГКО предварительной информации о судне и прибывающем на нем грузе в объеме, установленном законодательством, проверка информации ГКО, вынесение предварительного решения по формам таможенного контроля), по прибытию судна уже известно, по каким контейнерным партиям назначен таможенный осмотр (досмотр). Таким образом, пооперационная составляющая процесса терминальной обработки остается прежней, сокращается лишь время ожидания поступления информации (заявки) о контейнерах, требующих проведения осмотра (досмотра).

Результаты (Results)

Экспериментальные исследования с использованием имитационных моделей терминальной обработки импортного контейнерного потока были выполнены на основе исходных данных, соответствующих контейнерному терминалу ПАО «Владивостокский морской торговый порт» (ПАО «ВМТП»). Так как зонирование контейнерного терминала по принципу Парето направлено, в том числе на снижение нагрузки на транспортно-технологическую схему обработки контейнеров, отправляемых на осмотр (досмотр), один из частных экспериментов был предусмотрен для данного процесса.

В ходе выполнения данного эксперимента на модели терминальной обработки прибывающего контейнерного потока (см. рис. 2) процесс симуляции запускался только для блоков транспортно-технологической линии, направляющей контейнеры на осмотр (досмотр). Участки модели, используемые в ходе эксперимента, представлены на рис. 3.

а)



б)

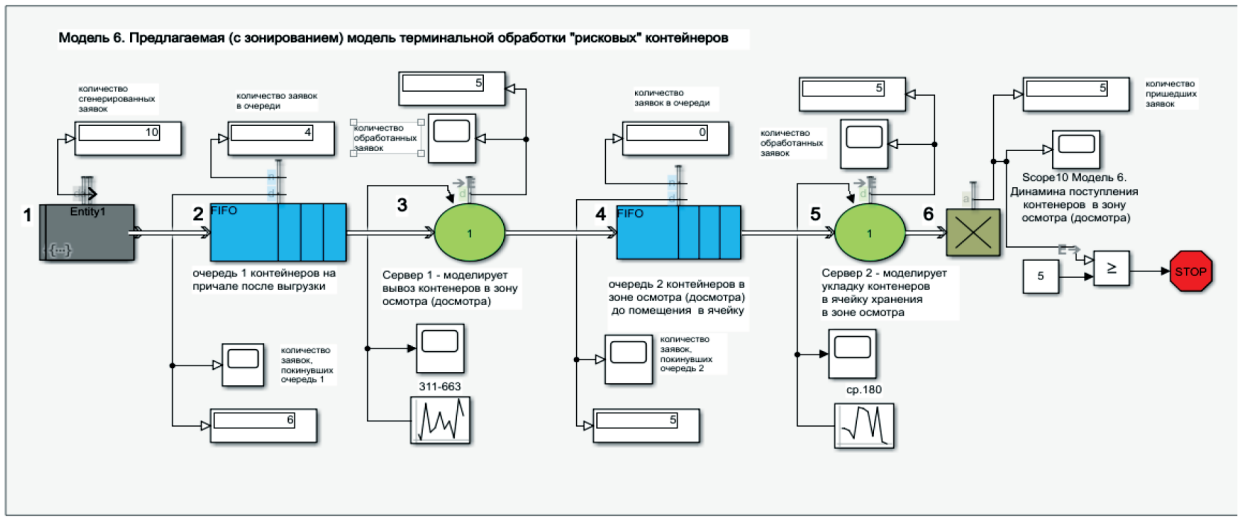


Рис. 3. Моделирование процесса обработки контейнерного потока для блоков транспортно-технологической линии, направляющей контейнеры на осмотр (досмотр): *а* — базовый вариант; *б* — вариант с применение технологии зонирования контейнерного терминала

Результаты эксперимента с использованием моделей (см. рис. 3) для партии, состоящей из пяти контейнеров, представлены на рис. 4. Сравнительный анализ результатов имитационного моделирования терминальной обработки импортного контейнерного потока (базового и предлагаемого вариантов), состоящего из пяти контейнеров, направляемых на осмотр (досмотр), представлен в таблице.

Сравнительный анализ результатов численного эксперимента имитационного моделирования СМО терминальной обработки контейнеров (базовый и предлагаемый варианты)

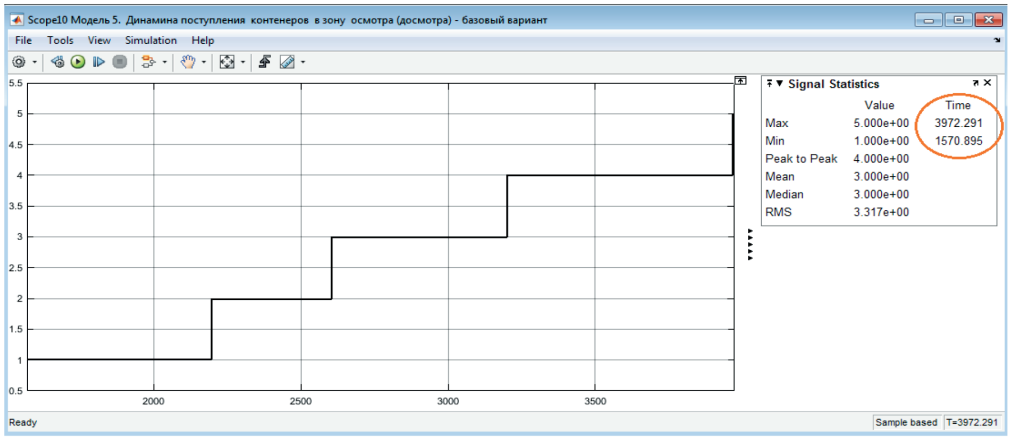
Время обработки контейнеров	Базовый вариант	Предлагаемый вариант	Экономический эффект
Время обслуживания пяти контейнеров, с	3972,3	2931,8	1040,5
Время завершения обслуживания первого контейнера, с	1570,9	567,2	1003,7
Среднее время обслуживания одного контейнера, с	794,5	586,4	208,1

Применение технологии зонирования контейнерного терминала позволило сократить время обработки пяти контейнеров на 17,3 мин. Среднее время обслуживания одного контейнера сократилось на 3,5 мин. Следовательно, в случае необходимости проведения осмотра (досмотра) ста из пятисот контейнеров, выгружаемых с судна, время их обработки сокращается на 5,8 ч, что сопоставимо с результатами, полученными методом сетевого анализа, приведенными в статье [26].

Обсуждение (Discussion)

Для оценки степени соответствия разработанных имитационных моделей терминальной обработки импортного контейнерного потока реальному прототипу был проведен ряд экспериментов, которые позволили определить ее устойчивость (способность сохранять адекватность) и чувствительность (поведение модели при изменении данных и нагрузок) — рис. 4.

а)



б)

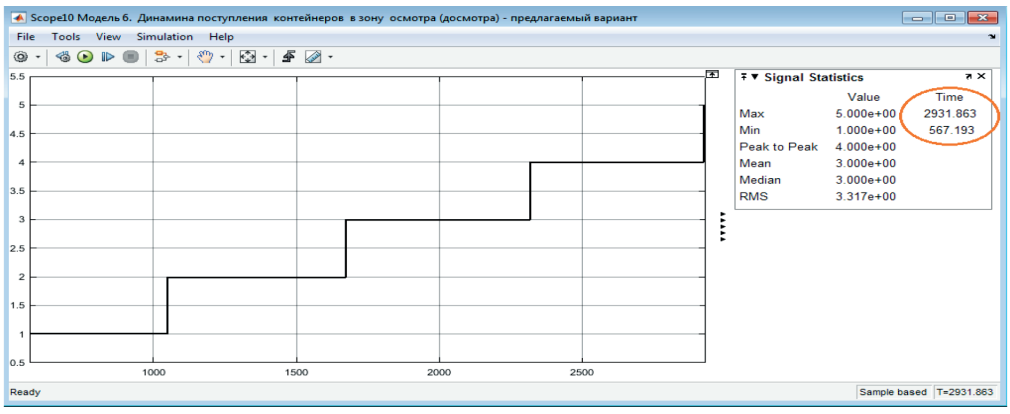


Рис. 4. Результаты эксперимента обработки контейнерного потока на осмотр (досмотр) партии, состоящей из пяти контейнеров: *а* — базовый вариант; *б* — вариант с применением технологии зонирования контейнерного терминала

Верификация разработанных моделей проводилась методом аналитического подсчета характеристик (аналитическое моделирование) и сопоставления его результата с результатом, полученным в ходе численного эксперимента. Результаты проверки подтверждают правильность построения концептуальной модели в среде MATLAB / Simulink и соответствие ее реальной модели терминальной обработки прибывающего морем импортного контейнерного потока.

В зависимости от комбинации исходных параметров, сгенерированных системой, а также индивидуальных настроек входных параметров моделирования поведение имитационной модели и результаты компьютерного моделирования могут меняться. В ходе эмпирических исследований на модели рис. 2, например, менялся режим разделения контейнеров на два потока (см. операция *3* на рис. 2) в блоке *Output Switch* с режима «цикличный» (*Round Robin*) на равновероятностный (*Equiprobable*).

Сравнительный анализ результатов проведенных экспериментов по двум вариантам терминальной обработки импортного контейнерного потока (базового и предлагаемого) с изменением различных параметров показал отклонение результатов моделирования не более 7–10 %, что соответствует требованиям валидности, и разработанные модели могут быть использованы для анализа системы и принятия решения об эффективности предложенных мероприятий.

Выводы (Summary)

Результаты имитационного моделирования процесса терминальной обработки импортного контейнерного потока в существующих условиях и условиях зонирования контейнерного терминала позволили сделать следующие выводы:

1. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют об адекватности разработанных моделей. Поведение имитационной модели достаточно точно совпадает с поведением исследуемой системы в реальных условиях.

2. Отклонение результатов моделирования в проведенных экспериментах не превышает 7–10 %, что соответствует требованиям валидности, и разработанные модели могут быть использованы для анализа системы терминальной обработки импортного контейнерного потока и принятия решения об эффективности предложенного мероприятия.

3. Анализ результатов моделирования подтвердил возможность реализации мероприятия по совершенствованию системы управления импортным контейнеропотоком посредством технологии зонирования контейнерного терминала морского порта по принципу Парето при условии оформления судна по технологии предварительного информирования государственных контрольных органов. Внедрение предлагаемого логистического процесса позволяет сократить сроки обработки контейнеров в порту и увеличивает его производительность за счет рациональной организации зоны хранения контейнеров и исключения дублирования операций по выставлению контейнеров в зону осмотра (досмотра).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Азовцев А. И.* Разработка инфологической модели базы данных предварительного информирования таможенных органов для судоходной компании / А. И. Азовцев, Т. Е. Маликова, А. И. Филиппова, А. А. Янченко // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — Т.1. — № 3 (33). — С. 327–332.

2. *Янченко А. А.* Алгоритм оформления судна в порту по технологии предварительного информирования таможенных органов в условиях свободного порта Владивосток / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, А. В. Кузьмин // Территории опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации и свободный порт Владивосток: сб. науч. тр. X Регион. науч. конф., посвященной 25-летию ФТС России. — Владивосток: Владивостокский филиал Российской таможенной академии, 2016. — С. 257–262.

3. *Шпак А. С.* Формирования системы управления таможенными процессами на территории свободного порта Владивосток / А. С. Шпак. — LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. — 121 с.

4. *Tan C.* Integrated Yard Space Allocation and Yard Crane Deployment Problem in Resource-Limited Container Terminals / C. Tan, J. He // Scientific Programming. — 2016. — Vol. 2016. — Article No. 13. DOI: 10.1155/2016/6421943.

5. *Wang L.* Rail mounted gantry crane scheduling optimization in railway container terminal based on hybrid handling mode / L. Wang, X. Zhu // Computational Intelligence and Neuroscience. — 2014. — Vol. 2014. — Article No. 31. DOI: 10.1155/2014/682486.

6. *Rodrigue J.-P.* The Geography of Transport Systems / J.-P. Rodrigue, C. Comtois, B. Slack. — 3rd Edition. — Routledge, 2013. — 416 p.

7. *Notteboom T.* Containerization, box logistics and global supply chains: the integration of ports and inner shipping networks / T. Notteboom, J.-P. Rodrigue // Maritime Economics and Logistics. — 2008. — № 10. — Pp. 152–174.

8. *Balaban M.* Towards a theory of multi-method M&S approach: part I / M. Balaban, P. Hester, S. Diallo // Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. — IEEE Press, 2014. — Pp. 1652–1663.

9. *Сай В. М.* Моделирование оценки потребности региона в контейнерных перевозках / В. М. Сай, Д. И. Кочнева // Мир транспорта. — 2018. — Т. 16. — № 4 (77). — С. 160–178.

10. *Зеленков Г. А.* Характеристика, анализ и перспективы развития контейнерных перевозок в порту Новороссийск / Г. А. Зеленков, В. Н. Шевченко // Экономический вектор. — 2018. — № 3 (14). — С. 26–29.

11. *Балалаев А. С.* Логистические аспекты организации движения поездов в направлении морских портов / А. С. Балалаев, В. В. Довиденко // Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматике и инфокоммуникациях: тр. Всеросс. науч.-практ. конф. ученых транспортных вузов, инженерных работников и представителей академической науки с международным участием / под ред. А. И. Годяева. — 2017. — С. 51–57.

12. *Деружинский В. Е.* Новые формы взаимодействия железных дорог и портов на базе логистических технологий / В. Е. Деружинский, Г. А. Зеленков, А. П. Шрамко // Эксплуатация морского транспорта. — 2018. — № 1 (86). — С. 9–23.

13. *Левченко Н. Г.* Имитационное моделирование с применением интеллектуальной системы / Н. Г. Левченко, Ю. Ю. Почесуева // Вестник Морского государственного университета. — 2011. — № 45. — С. 46–55.

14. *Levchenko N. G.* The imitating model of the information management system in a maritime branch enterprise // Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education. — 2011. — Vol. 1. — Is. 1. — Pp. 107–112.

15. *Кузнецов А. Л.* Роль имитационного моделирования в технологическом проектировании и оценке параметров грузовых терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. А. Погодин, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 93–102. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-8-2-93-102.

16. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

17. *Кузнецов А. Л.* Выбор формы представления структуры универсальной имитационной модели контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 520–532. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-520-532.

18. *Kuznetsov A. L.* Simulation for assessment of bulk cargo berths number / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. E. Slitsan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 87. — Is. 6. — Pp. 062010. DOI: 10.1088/1755-1315/87/6/062010.

19. *Kuznetsov A. L.* Simulation Model of Container Land Terminals / A.L. Kuznetsov, A.V. Kirichenko, J. J. Eglit // TransNav. — 2018. — Vol. 12. — Num. 2. — Pp. 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.

20. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование как инструмент расчета наземных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. С. Ткаченко, Г. Б. Попов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 1. — С. 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.

21. *Кузнецов А. Л.* Методика анализа технологических операций / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. В. Галин, А.Д. Семенов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 3. — С. 23–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-3-23-27.

22. *Янченко А. А.* Научные подходы к исследованию процессов функционирования морских портов и портовых терминалов / А. А. Янченко // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 55. — С. 185–192.

23. *Янченко А. А.* Дискретно-событийная модель в задачах эксплуатации контейнерных терминалов / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 4 (85). — С. 25–31.

24. *Маликова Т. Е.* Модель массового обслуживания импортного грузопотока с применением технологии предварительного информирования / Т. Е. Маликова, А. А. Янченко, И. Н. Вольнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.

25. *Янченко А. А.* Разработка модели исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, И. Н. Вольнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 704–713. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-704-713.

26. *Янченко А. А.* Зонирование контейнерного терминала по принципу Парето: информационный аспект / А. А. Янченко // Логистика: современные тенденции развития: материалы XVII Международной научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 204–208.

REFERENCES

1. Azovtsev, A. I., T. E. Malikova, A. I. Filippova, and A. A. Yanchenko. “The development of infological customs preliminary informing data base model for shipping company.” *Marine Intellectual Technologies* 1.3(33) (2016): 327–332.

2. Yanchenko, A. A., T. E. Malikova, and A. V. Kuzmin. “The Algorithm for Ship Clearance at Port According to the Technology of Preliminary Informing Customs Authorities under the Conditions of the Free Port of Vladivostok.” *Territorii operezhayushchego sotsial’no-ekonomicheskogo razvitiya v Rossiiskoi Federatsii i svobodnyi port Vladivostok sbornik nauchnykh trudov X Regional’noi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 25- letiyu FTS Rossii.* Vladivostok: Vladivostokskii filial Rossiiskoi tamozhennoi akademii, 2016: 257–262.

3. Shpak, A. S. *Formirovaniya sistemy upravleniya tamozhennymi processami na territorii svobodnogo porta Vladivostok*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017.

4. Tan, Caimao, and Junliang He. “Integrated Yard Space Allocation and Yard Crane Deployment Problem in Resource-Limited Container Terminals.” *Scientific Programming* 2016 (2016): 13. DOI: 10.1155/2016/6421943.

5. Wang, Li, and Xiaoning Zhu. “Rail mounted gantry crane scheduling optimization in railway container terminal based on hybrid handling mode.” *Computational intelligence and neuroscience* 2014 (2014): 31. DOI: 10.1155/2014/682486.

6. Rodrigue, J.-P., C. Comtois, and B. Slack. *The Geography of Transport Systems.* 3rd Edition. Routledge, 2013.

7. Notteboom, T., and J.-P. Rodrigue. “Containerization, box logistics and global supply chains: the integration of ports and inner shipping networks.” *Maritime Economics and Logistics* 10 (2008): 152–174.

8. Balaban, Mariusz, Patrick Hester, and Saikou Diallo. “Towards a theory of multi-method M&S approach: part I.” *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*. IEEE Press, 2014. 1652–1663.

9. Say, Vasiliy M., and Daria I. Kochneva. “Modeling of assessment of a region’s need for container transportation.” *World of transport* 16.4(77) (2018): 160–178.

10. Zelenkov, G. A. and V. N. Shevchenko. “Characteristics, analysis and prospects of development of container transportation in the port of Novorossiysk.” *Ekonomicheskij vektor* 3(14) (2018): 26–29.

11. Balalaev, A. S., and V. V. Dovidenko. “Logisticheskie aspekty organizacii dvizheniya poezdov v napravlenii morskih portov.” *Novye tendencii razvitiya v upravlenii processami perevozok, avtomatike i infokommunikaciyah: Trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii uchenyh transportnyh vuzov, inzhenernyh rabotnikov i predstavitelej akademicheskoj nauki s mezhdunarodnym uchastiem*. Edited by A.I. Godyaev. 2017. 51–57.

12. Deruzhinsky, V. E., G. A. Zelenkov, and A. P. Shramko. “New forms of interaction between Railways and ports on the basis of logistic technologies.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(86) (2018): 9–23.

13. Levchenko, N. G., and Y. Y. Pochesueva. “Imitacionnoe modelirovanie s primeneniem intellektual’noj sistemy.” *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 45 (2011): 46–55.

14. Levchenko, N. G. “The imitating model of the information management system in a maritime branch enterprise.” *Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education* 1.1 (2011): 107–112.

15. Kuznetsov, Alexander L’vovich, Alexander Viktorovich Kirichenko, Vladimir Alekseyevich Pogodin, Victoria Nikolaevna Shcherbakova-Slyusarenko. “Importance of simulation modelling for technological design and evaluating parameters of cargo terminals.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2017): 93–102. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-93-102.

16. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Simulation in the tasks of sea port operational analyses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

17. Kuznetsov, Alexander L., Victorya N. Sherbakova-Slyusarenko, and Andrey S. Tkachenko. "On the selection of the format for the container terminal simulation model's structure." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 520–532. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-520-532.

18. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and A. E. Slitsan. "Simulation for assessment of bulk cargo berths number." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 87. No. 6. IOP Publishing, 2017. DOI:10.1088/1755-1315/87/6/062010.

19. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and J. J. Eglit. "Simulation Model of Container Land Terminals." *TransNav* 12.2 (2018): 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.

20. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, A.S. Tkachenko and G. B. Popov. "Simulation modelling as a dry cargo terminals' calculation tool." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2018): 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.

21. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, A.V. Galin, and A. D. Semenov. "Principles of technological operation analysis." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2018): 23–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-3-23-27.

22. Yanchenko, A. A. "Scientific approaches to the sea ports and port terminals operating processes study." *Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta* 55 (2018): 185–192.

23. Yanchenko, A. A., and T. E. Malikova. "A discrete-event model for operations in container terminals." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (85) (2017): 25–31.

24. Malikova, Tatiana E., Anna A. Yanchenko, and Igor N. Volnov. "The model of massive handling cargo flow for import with the use of preliminary informing technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.

25. Yanchenko, Anna A., Tatiana E. Malikova, and Igor N. Volnov. "Developing the model for study of terminal zoning impact on its operating efficiency." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 704–713. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-704-713.

26. Yanchenko, A. A. "Zoning container terminal on pareto principle: information aspect." *Logistika: sovremennye tendencii razvitiya: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2018. 204–208.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Янченко Анна Анатольевна — соискатель
Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: *annanyan@yandex.ru*

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

Оськин Дмитрий Александрович — кандидат технических наук, доцент
Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: *daoskin@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yanchenko, Anna A. — Applicant
Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059, Russian Federation
e-mail: *annanyan@yandex.ru*

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

Oskin, Dmitry A. —
PhD, associate professor
Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059, Russian Federation
e-mail: *daoskin@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 21 декабря 2018 г.
Received: December 21, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-68-77

MONTE-CARLO SIMULATION FOR THE EFFICIENCY ASSESSMENT OF MARINE TERMINAL WORKING TIME BUDGET USING

A. M. Sampiev

JSC «Lenmorniiproekt», St. Petersburg, Russian Federation

Determination of the marine terminal location as a rule occurs during pre-design studies, long before investment decision of project realization is taken. Decision of the marine terminal location should have technical and economic justification. Risks of downtime and inefficient use of terminal production capacities increase in case of incorrect geographical location of terminal. Effective terminal operation time can be significantly reduced due to the presence of negative external factors, first of all, natural and climatic conditions. To compensate risks of inefficient use of the marine terminal production capacities the mathematical model for the marine terminal working time budget assessment developed using Monte-Carlo simulation is proposed. The main point of Monte-Carlo method for solving specific problem of assessment the working time budget of the terminal is repeated generation of realization values of external factors impeded the terminal operation and subsequent assessment of these factors influence on the effective time of terminal operation. The following external factors are considered in the paper: wind, temperature, fog, ice conditions, equipment malfunctions. The basics of the Monte-Carlo method are briefly described in the article; the process of the input parameters preparation is stated in detail; an algorithm of model operation is documented; the simulation results are well shown and the appropriate conclusions are made. The main result received during modeling is the range of coefficient values of using of working time budget of the marine terminal. The coefficient values can be one of the arguments at decision making on location and layout of the marine terminal. The calculation is made on example of liquefied natural gas and gas condensate shipment berthes, located in Sabetta sea port, Yamalo-Nenets Autonomous District, Russia.

Keywords: marine terminal, Monte-Carlo method, terminal availability, working time budget, simulation.

For citation:
Sampiev, Adam M. "Monte-Carlo simulation for the efficiency assessment of marine terminal working time budget using." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 68–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-68-77.

УДК 656.615

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЮДЖЕТА РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ МОРСКОГО ТЕРМИНАЛА

А. М. Сампиев

АО «Ленморниипроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Определение местоположения морского терминала, как правило, происходит в процессе предпроектных проработок, задолго до принятия инвестиционного решения о реализации проекта. Решение о местоположении терминала должно иметь технико-экономическое обоснование. В случае некорректного географического расположения терминала возрастают риски простоев и неэффективного использования производственных мощностей предприятия на этапе эксплуатации. Эффективное время работы терминала может быть существенно снижено за счет наличия неблагоприятных внешних факторов, в первую очередь, природно-климатических условий. В качестве компенсации рисков неэффективного использования производственных мощностей морского терминала предложена математическая модель оценки эффективности использования бюджета рабочего времени, разработанная с использованием метода Монте-Карло. В качестве критерия эффективности принят коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала. Сутью метода Монте-Карло для решения конкретной задачи об оценке эффективности использования бюджета рабочего времени терминала является многократная генерация значений реализации внешних факторов, препятствующих работе терминала и последующая оценка влияния данных

факторов на время работы терминала. В настоящей статье рассмотрены следующие неблагоприятные внешние факторы: ветер, температура, ледовые условия, туман, неисправности оборудования. В статье кратко описаны основы метода Монте-Карло, детально изложен процесс подготовки входных параметров для работы модели, описан алгоритм работы модели, показаны результаты моделирования, сделаны соответствующие выводы. Основным результатом в процессе работы модели является диапазон значений коэффициента использования бюджета рабочего времени морского терминала. Значения коэффициента использования бюджета рабочего времени морского терминала могут послужить одним из аргументов в принятии решения о расположении и компоновке морского терминала. В статье выполнен расчет на примере отгрузочных причалов сжиженного природного газа и газового конденсата, расположенных в морском порту Сабетта (Ямало-Ненецкий автономный округ, РФ).

Ключевые слова: морской терминал, метод Монте-Карло, бюджет рабочего времени, моделирование.

Для цитирования:
Сампиев А. М. Применение метода Монте-Карло для оценки эффективности использования бюджета рабочего времени морского терминала / А. М. Сампиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 68–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-68-77.

Введение (Introduction)

На этапе предпроектных проработок необходимо правильно определить местоположения проектируемого морского терминала. Особенно важным является выполнение оценки эффективности использования бюджета рабочего времени морских терминалов, проектируемых в арктических регионах, где, прежде всего, природно-климатические факторы диктуют условия расположения объекта.

В рамках выполнения предпроектных работ необходимо определить компоновочную схему терминала и проработать вопрос обеспечения объекта инженерными коммуникациями, иметь представление о поэтапном развитии производственных мощностей и информацию об особенностях природно-климатических факторов и их влиянии на конструктивные и компоновочные решения сооружений терминала. Также возможность реализации проекта должна быть рассмотрена в контексте требований, предъявляемых к охране окружающей среды.

Как правило, при выполнении предпроектных проработок сравниваются несколько вариантов географического расположения терминала, несколько вариантов компоновочных решений с выполнением технико-экономического анализа по каждому из них. На последующих этапах проектирования вариантная проработка доходит до уровня сравнения конструктивных и объемно-планировочных решений для каждого из сооружений [1].

Выполнение вариантной проработки географического расположения терминала возможно с использованием результатов инженерных изысканий, вначале это результаты изысканий, доступные в открытых источниках, в последующем — результаты с площадки проектируемого объекта. Выполнение оценки эффективности использования бюджета рабочего времени терминала желательно проводить на этапе выбора географического положения объекта с использованием первичных доступных данных с последующим их уточнением после проведения инженерных изысканий [2], [3].

В работе [4] представлен детальный обзор научных исследований в области совершенствования технологических процессов работы морских портов. В частности, в работах А. Л. Кузнецова [5]–[7] показана необходимость выполнения моделирования процессов сложных технических объектов, к которым относятся морские терминалы.

Оценку эффективности использования бюджета рабочего времени морского терминала в данной статье предлагается выполнить с использованием метода Монте-Карло. Расчет выполнен на примере отгрузочных причалов сжиженного природного газа и газового конденсата, расположенных в морском порту Сабетта (Ямало-Ненецкий автономный округ, РФ). В качестве исходных данных были использованы материалы инженерных изысканий, выполненных АО «Ленморниипроект» в 2011–2013 гг.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Метод Монте-Карло можно определить как способ моделирования случайных величин с целью вычисления характеристик их распределений. Для решения задач методом Монте-Карло необходимо получить последовательность выборочных значений случайной величины с заданным распределением. Случайные величины обычно моделируются с помощью преобразования одного или нескольких независимых значений случайного числа, равномерно распределенного в интервале (0; 1). На практике обычно используются псевдослучайные числа, вычисляемые по определенным формулам и имеющим определенный конечный период [8], [9]. В зарубежной литературе процесс моделирования прикладных задач с целью дальнейшего их решения методом статистических испытаний принято называть *имитацией* (Simulation).

Суть метода Монте-Карло заключается в получении оценки разброса искомой величины, являющейся сложной функцией некоторых переменных случайных величин вокруг среднего значения a. Для этого известным образом конструируют случайную величину ξ, математическое ожидание которой равно a:

$$M\xi = a.$$

Многократно генерируя ξ, получим ряд значений $\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_n$, с помощью которых выполним оценку a:

$$a \approx \frac{1}{n}\left(\xi_1 + \xi_2 + \ldots + \xi_n\right).$$

Как правило, моделирование осуществляется с помощью компьютерных программных комплексов. Основная идея метода в контексте определения коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала заключается в многократном моделировании возникновения внешних факторов, ограничивающих работу терминала. Для каждого отдельного этапа моделирования значения внешних факторов выбираются случайным образом в соответствии с плотностью распределения вероятности возникновения для каждого из этих факторов. Выполнив сравнение значений внешних факторов для каждого этапа моделирования с их влиянием на коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала, оказывается возможным получить значения случайной величины — коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала по каждому из факторов.

Исходными данными для моделирования являются результаты инженерно-гидрометеорологических изысканий, полученных для района предполагаемого размещения терминала. В качестве критерия эффективности использования бюджета рабочего времени морского терминала рассмотрим коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала. В действующих нормативных документах (СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов») наиболее схожим с рассматриваемым коэффициентом использования бюджета рабочего времени терминала параметром является коэффициент использования бюджета рабочего времени причала, учитывающий простои причала по метеорологическим факторам в месяц наибольшей работы ($K_{\text{мет}}$). В соответствии с нормативными документами данный коэффициент предлагается принимать по рассчитанным табличным значениям для регионов с существующими морскими портами либо (при отсутствии табличных значений) рассчитывать арифметически как отношение разности календарного времени и продолжительности действия метеорологических факторов в течение месяца оптимальной работы, при которых нельзя производить погрузочно-разгрузочные операции, связанные с обработкой судов у причала, к общему календарному времени[1].

Под коэффициентом использования бюджета рабочего времени терминала будем понимать отношение времени работы терминала в штатном режиме с плановыми показателями T_w, к общему календарному времени T:

[1] Russian Federation. Set of rules SP 350.1326000.2018. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov. M.: Standartinform, 2018.

$$K = \frac{T_w}{T}.$$

Время работы терминала в штатном режиме определим как разность между календарным временем и простоями: $T_w = T - T_d$. Тогда приведенное ранее выражение примет следующий вид:

$$K = \frac{T - T_d}{T}.$$

Итоговое значение коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала рассчитывается по суммарным простоям на каждой из итераций модели, предполагающей различные комбинации внешних факторов, исходя из их вероятности возникновения.

Введем понятие коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала по каждому из внешних факторов:

K_w — коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала по ветру;

K_t — коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала по температуре;

K_i — коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала по ледовым условиям;

K_f — коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала по туману;

K_b — коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала по неисправностям оборудования и судов портового флота.

Рассмотрим методику расчета коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала по каждому из внешних факторов более подробно.

Ветер. При скорости ветра выше 12 м/с проведение погрузочно-разгрузочных операций замедляется. В связи с увеличением ледовой нагрузки суда прибывают в терминал с опозданием от планового времени примерно на 30 %.

При скорости ветра выше 15 м/с проведение погрузочно-разгрузочных операций запрещено. Судам, находящимся в порту, запрещается выходить в открытое море, приходящие суда также дожидаются улучшения погоды в безопасном месте за пределами терминала.

Коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала по ветру K_w в зависимости от скорости ветра принимает следующие значения:

$$K_w = \begin{cases} 1 & w < 12 \text{ м/с}; \\ 0{,}93 & 12 \text{ м/с} \le w < 15 \text{ м/с}; \\ 0{,}92 & w \ge 15 \text{ м/с}. \end{cases}$$

В табл. 1 и на рис. 1 приведена плотность распределения вероятности возникновения скоростей ветра.

Таблица 1

Скорость ветра и вероятность его возникновения

Скорость ветра, м/с	0–1	2–3	4–5	6–7	8–9	10–11	12–13	14–15	16–17	18–20	21–28	29–40
Вероятность, %	5,0	16,8	20,2	19,6	16,6	8,6	7,4	3,2	1,2	1,2	0,3	0,05

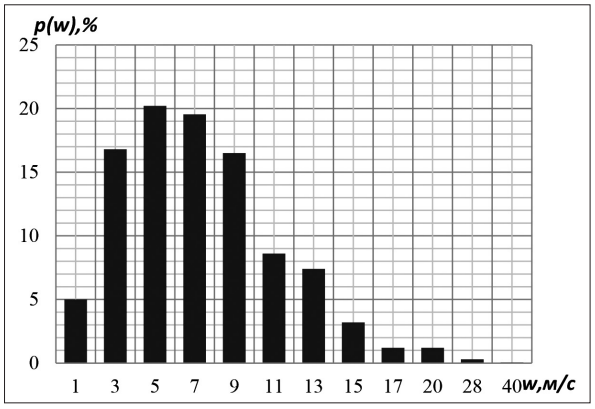


Рис. 1. Плотность распределения вероятности возникновения скорости ветра

Туман. Число дней с туманом составляет в среднем 76 за год (табл. 2). В годовом ходе максимум приходится на июль — 13 дней, минимум — на зимние месяцы, по три-четыре дня в каждом. Плотность распределения вероятности возникновения туманов показана на рис. 2.

Таблица 2

Продолжительность туманов

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Продолжительность, дни	3	3	3	6	7	11	13	10	8	5	4	3
Продолжительность, ч	8	5	11	18	24	61	109	71	44	22	12	10
Вероятность, %	5	5	5	10	11	18	21	16	13	8	7	5

Рассмотрим в качестве примера определение коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала по туману в июле. Худшим сценарием для июля является событие, вероятность которого составляет p = 21 %, а именно 13 дней с туманом общей продолжительностью 109 ч, при которых выполнение погрузочно-разгрузочных операций будет запрещено. Коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала по туману составит

$$K_f = \frac{31 \cdot 24 - 109}{31 \cdot 24} \approx 0,85.$$

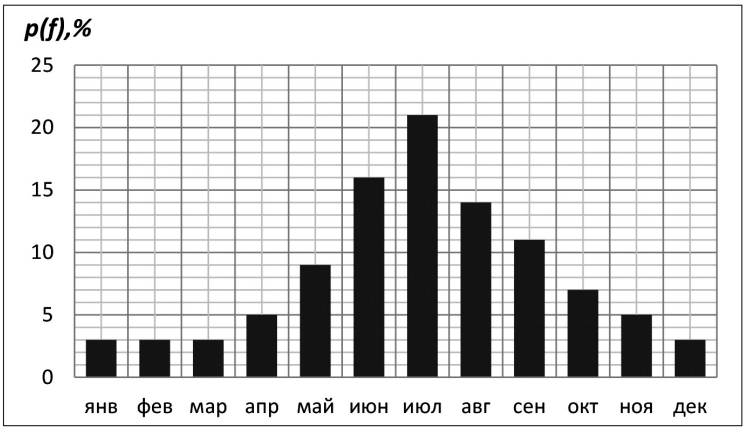


Рис. 2. Плотность распределения вероятности возникновения тумана

Ледовые условия. Ледовые условия оценивались как воздействие на время прибытия судна в терминал. При тяжелых ледовых условиях скорость движения судна уменьшается, в связи с чем возникают задержки в прибытии судов в терминал. По результатам изысканий приняты следующие допущения:

– вероятность своевременного прибытия судов — 95 %;

– вероятность задержки судов на 36 ч — 4 %;

– вероятность задержки судов на 72 ч — 1 %.

Используя выражение (*) получим, что коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала по ледовым условиям при задержке судна на 36 ч и 72 ч составит 0,95 и 0,90 соответственно:

$$K_i = \begin{cases} 1 & T_d = 0 \text{ ч}; \\ 0,95 & T_d = 36 \text{ ч}; \\ 0,9 & T_d = 72 \text{ ч}. \end{cases}$$

Температура. Коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала по температуре определим следующим образом:

$$K_t = \frac{T_{w1} + T_{w2} k_t}{T_{w1} + T_{w2}},$$

где T_{w1} — количество дней с температурами, не ограничивающими работу терминала;

T_{w2} — количество дней с температурами, ограничивающими работу терминала;

k — коэффициент влияния фактора температуры на уменьшение эффективности использования бюджета рабочего времени терминала (для текущего расчета принят равным 0,8 при температурах ниже –30 °С).

Снижение температуры замедляет процедуры по швартовке судна, присоединению / отсоединению стендеров.

Максимальные и минимальные значения температур воздуха, а также количество дней с температурой воздуха ниже определенных значений приведены в табл. 3 и 4 соответственно. На рис. 3 приведено распределение максимальных и минимальных температур.

Таблица 3

Температура воздуха

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Максимум, °С	1	0,3	1	6	6	26	30	26	20	10	3	1
Минимум, °С	–48	–49	–45	–41	–31	–13	–3	–3	–15	–33	–43	–46

Таблица 4

Количество дней с температурой воздуха ниже определенных значений

Предел температуры, °С	Январь	Февраль	Март	Апрель	Ноябрь	Декабрь
Ниже –40	2,5	1,3	–	–	0,4	1,4
Ниже –30	15,4	16,0	15,8	3,8	3,3	10,6

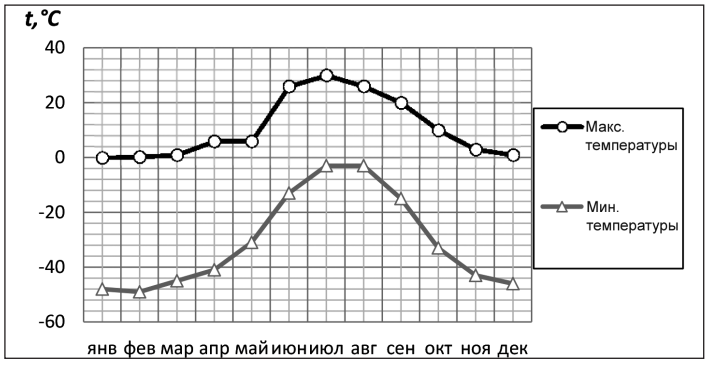


Рис. 3. Распределение максимальных и минимальных температур

Неисправности оборудования. В расчетной модели приняты вероятности возникновения неисправностей оборудования терминала: поломки стендеров, отгрузочных насосов и др. — p_{b1} = 0,385 %; грузовых судов и судов портового флота — p_{b2} = 0,2 %.

Устранение неисправностей оборудования терминала может продолжаться до трех дней, период устранения неисправностей оборудования грузовых судов и судов портового флота примем равным двум дням. Исходя из ранее изложенного, примем следующие значения коэффициентов использования бюджета рабочего времени терминала по неисправностям оборудования: $K_{b1} = 0{,}9$, $K_{b2} = 0{,}93$.

Алгоритм оценки значений коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала по внешним факторам с использованием метода Монте-Карло выглядит следующим образом [10], [11]–[13]:

1. Определение плотностей распределения вероятности возникновения внешних факторов
2. Определение количества итераций метода — *n*.
3. Выполнение первой итерации определения значений внешних факторов с использованием генератора случайных чисел.
4. Определение значений коэффициентов использования бюджета рабочего времени терминала по каждому из значений внешних факторов, полученных при первой итерации.
5. Определение итогового значения коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала для первой итерации.
6. Выполнение следующей (второй) итерации метода.
7. Повторение операций, изложенных в пп. 4 и 5, до достижения заданного количества итераций метода.
8. Визуализация полученных результатов в виде графика изменения значений коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала в зависимости от количества итераций.

Результаты (Results)

По результатам выполнения оценки коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала с применением метода Монте-Карло получены следующие значения (рис. 4).

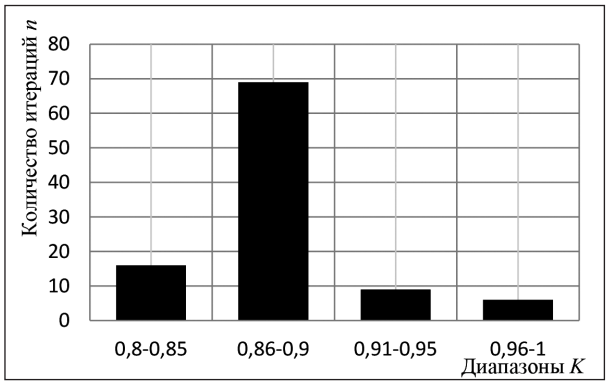


Рис. 4. Плотность распределения коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала

Из полученной плотности распределения коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала видно, что наибольшее количество итераций метода пришлось на значения коэффициента в диапазоне 0,86–0,9. Соответственно в связи с наибольшим количеством «попаданий» значений коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала в диапазон 0,86–0,9, можно сделать вывод о том, что значения из этого диапазона следует использовать для оценки эффективности использования бюджета рабочего времени терминала. При реализации сценариев с неблагоприятными внешними факторами коэффициент использования бюджета рабочего времени терминала варьируется в диапазонах 0,8–0,85.

Анализ результатов моделирования, показанный на рис. 4, позволяет сделать вывод о высоких значениях коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала и возможности реализации проекта в заданных условиях.

Обсуждение (Discussion)

Проектирование, строительство и эксплуатация морского терминала является весьма затратным мероприятием. Развитие подходов к концептуальному проектированию морских терминалов, основанных на статистическом моделировании гидрометеорологических условий

функционирования терминала, позволит снизить эксплуатационные издержки предприятия, связанные с простоями производственных мощностей.

Предлагаемые нормативными документами подходы не позволяют корректно определить коэффициент использования бюджета рабочего времени причала ввиду следующих причин:

– не учитываются простои терминала, вызванные неисправностями оборудования грузовых судов, судов портового флота и оборудования на причалах;

– учет простоев предлагается вести только по месяцу наибольшей работы терминала, а не в целом по году;

– метеорологические факторы предлагается учитывать только тогда, когда они достигают значений, при которых нельзя выполнять погрузочно-разгрузочные работы.

Практическая значимость работы выражается в том, что разработанный метод позволяет выполнить оценку коэффициента использования бюджета рабочего времени терминала морского терминала на основе стохастических моделей, использующих статистику реализации внешних факторов, характерных для данного района проектирования и ограничивающих работу предприятия. Учет получаемой в процессе моделирования информации позволяет проработать мероприятия, направленные на повышение качества принимаемых проектных решений, а также оценить их эффективность.

В связи с грядущими перспективами освоения ресурсной базы морей Северного Ледовитого океана, перспективами роста грузоперевозок по Северному морскому пути и недостаточной развитостью транспортной инфраструктуры создание морских терминалов в арктических и субарктических регионах становится особенно актуальным и, соответственно, решения о географическом расположении терминалов в указанных регионах должны приниматься на основе расчетного обоснования возможности функционирования объектов в заданных природно-климатических условиях.

В целях наглядной демонстрации работы модели в статье использованы данные инженерных изысканий, выполненных при проектировании морского порта Сабетта.

Выводы (Summary)

В результате проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. В статье кратко представлена суть метода Монте-Карло, описан алгоритм работы математической модели по определению коэффициента использования бюджета рабочего времени морского терминала, составленной на основе использования метода Монте-Карло; на конкретном примере изложены методика подготовки исходных данных и результат работы модели.

2. Проведенный анализ внешних факторов, ограничивающих работу морского терминала, показал, что эффективная работа предприятия будет зависеть от плотности распределения вероятностей возникновения внешних факторов.

3. Анализ подходов к оценке функционирования морского терминала показал, что наиболее удобным способом является ее выполнение с использованием метода Монте-Карло.

4. Модель, разработанная на основе метода Монте-Карло, позволяет реализовать различные сценарии работы морского терминала, сочетая внешние факторы, ограничивающие эффективное время работы терминала. Результатом, полученным в процессе работы модели, является диапазон значений коэффициента использования бюджета рабочего времени морского терминала.

5. Следует отметить, что для каждого конкретного случая перечень внешних факторов данных должен актуализироваться с учетом характерных для района проектирования гидрометеорологических условий и специфики технологических процессов.

6. Важно обратить внимание на необходимость решения задачи оптимизации в определении значений критериев эффективности морского терминала в сочетании с капитальными затратами, необходимыми для его создания, что является темой отдельного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Купцов Н. В.* Современные методы технологического проектирования морских портов в условиях Российской нормативной базы / Н. В. Купцов // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2012. — № 2. — С. 39–45.

2. *Спасский Я. Б.* Актуальные задачи автоматизации проектирования распределенных человеко-машинных систем на примере портовых терминалов / Я. Б. Спасский // Научно-технические ведомости Санкт- Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2012. — № 5 (157). — С. 85–88.

3. *Suarez-Aleman A.* When it comes to container port efficiency, are all developing regions equal? / A. Suárez-Alemán, J. M. Sarriera, T. Serebrisky, L. Trujillo // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2016. — Vol. 86. — Pp. 56–77. DOI: 10.1016/j.tra.2016.01.018

4. *Янченко А. А.* Научные подходы к исследованию процессов функционирования морских портов и портовых терминалов / А.А. Янченко // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 55. — С. 185–192.

5. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

6. *Кузнецов А. Л.* Роль имитационного моделирования в технологическом проектировании и оценке параметров грузовых терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. А. Погодин, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 93–102. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-93-102.

7. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование как инструмент расчета наземных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. С. Ткаченко, Г. Б. Попов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 1. — С. 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.

8. *Kwak Y. H.* Exploring Monte Carlo Simulation Applications for Project Management / Y. H. Kwak, L. Ingall // IEEE Engineering management review. — 2009. — Vol. 37. — No. 2. — Pp. 83–91.

9. *Fishman G. S.* Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications / G.S. Fishman. — Springer, 1996. —587 p.

10. *Захаров М. Н.* Оценка надежности системы снабжения предприятия на основе метода Монте-Карло / М. Н. Захаров, П. А. Николаев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2013. — № 1. — С. 75–83.

11. *Захаров М. Н.* Метод оценки надежности систем снабжения предприятий при выполнении госзаказа / М. Н. Захаров, П. А. Николаев // Контроллинг. — 2015. — № 57. — С. 30–36.

12. *McNamara D.* Application of the Monte Carlo method to marine system maintenance studies considering failure modes and spare part stock control / D. McNamara, A. Cunningham, I. Jenkinson, J. Wang // Journal of Marine Engineering & Technology. — 2014. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 37–58. DOI: 10.1080/20464177.2014.11020291.

13. *Marseguerra M.* Biased Monte Carlo unavailability analysis for systems with time-dependent failure rates / M. Marseguerra, E. Zio, F. Cadini // Reliability Engineering and System Safety. — 2002. — Vol. 76. — Is. 1. — Pp. 11–17. DOI: 10.1016/S0951-8320(01)00139-9.

REFERENCES

1. Kuptsov, Nikolay Vladimirovich. “Modern methods of port planning in Russian legal framework.” *Construction of Unique Buildings and Structures* 2 (2012): 39–45.

2. Spasskii, Ya. B. “Aktual’nye zadachi avtomatizatsii proektirovaniya raspredelennykh cheloveko-mashinnykh sistem na primere portovykh terminalov.” *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* 5(157) (2012): 85–88.

3. Suárez-Alemán, Ancor, Javier Morales Sarriera, Tomás Serebrisky, and Lourdes Trujillo. “When it comes to container port efficiency, are all developing regions equal?” *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 86 (2016): 56–77. DOI: 10.1016/j.tra.2016.01.018.

4. Yanchenko, A. A. "Scientific Approaches to the Sea Ports and Port Terminals Operating Processes Study." *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* 55 (2018): 185–192.

5. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Simulation in the tasks of sea port operational analyses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

6. Kuznetsov, Alexander L'vovich, Alexander Viktorovich Kirichenko, Vladimir Alekseyevich Pogodin, and Victoria Nikolaevna Shcherbakova-Slyusarenko. "Importance of simulation modelling for technological design and evaluating parameters of cargo terminals." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2017): 93–102. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-93-102.

7. Kuznetsov, Alexander L'vovich, Alexander Viktorovich Kirichenko, Andrei Stanislavovich Tkachenko, and German Borisovich Popov. "Simulation modelling as a dry cargo terminals' calculation tool." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2018): 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.

8. Kwak, Young Hoon, and Lisa Ingall. "Exploring Monte Carlo simulation applications for project management." *IEEE Engineering Management Review* 37.2 (2009): 83–91.

9. Fishman, G. S. *Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications*. Springer, 1996.

10. Zakharov, Mikhail Nikolaevich, and Peter Alexandrovich Nikolaev. "Assessment of the enterprise supply system reliability based on the Monte Carlo." *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building* 1 (2013): 75–83.

11. Zakharov, Michael, and Peter Nikolaev. "The method for assessing of enterprises supply systems reliability during realization of the state order." *Controlling* 57 (2015): 30–36.

12. McNamara, D., A. Cunningham, I. Jenkinson, and J. Wang. "Application of the Monte Carlo method to marine system maintenance studies considering failure modes and spare part stock control." *Journal of Marine Engineering & Technology* 13.1 (2014): 37–58. DOI: 10.1080/20464177.2014.11020291.

13. Marseguerra, Marzio, Enrico Zio, and Francesco Cadini. "Biased Monte Carlo unavailability analysis for systems with time-dependent failure rates." *Reliability Engineering & System Safety* 76.1 (2002): 11–17. DOI: 10.1016/S0951-8320(01)00139-9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sampiev, Adam M. —
PhD,
Chief Project Engineer
JSC «Lenmorniiproekt»
3/2 Mezhevoy kanal, St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *adam.sampiev@lenmor.ru*

Статья поступила в редакцию 14 января 2019 г.
Received: January 14, 2019.

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

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-78-86

ANALYSIS OF CHANGES IN THE BASIC PARAMETERS OF THE SYSTEM OF FILLING THE CHAMBER OF THE SHIP LOCK № 7 OF THE MOSCOW CANAL

A. M. Gapeev, K. P. Morgunov

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

The results of the analysis of hydraulic, energy and kinematic parameters of the system of the lock-chamber filling from under the segment lift-down gate with trench conduits and screen-beam absorbers are presented. Concentrated (head) filling systems are widely used in sluice construction because of the structures simplicity, ease of operation and efficiency. All the locks built on the shipping canals of Russia in the 20th century — the White Sea - Baltic Canal, the Moscow Canal, the Volga-Don Ship Canal and the Volga-Baltic Canal — have head power systems. The systems of these locks chambers filling differ only in the composition of the elements forming the quenching chamber. Their selection was carried out in laboratory studies on the conditions of stationing in the chamber vessels operated at that time without taking into account changes in the energy and kinematic flow parameters, as well as changes in the fleet structure in the future. The dramatic increase in the draft and displacement of ships during the further development of shipbuilding significantly changed the conditions for passing the ships through the locks, especially large-capacity ships. The berthing conditions at almost all gateways with the head power supply system turned up unsatisfactory, in this connection the number of emergency situations significantly increased. The most difficult conditions for the ships passage occur on the sluices of the Moscow Canal. At present, the large-tonnage vessels with a displacement of up to 64,000 kN and push-trains with a displacement of up to 180,000 kN are passed through the canal locks. The analysis of changes in the basic parameters of the filling system was first performed using the example of sluice № 7. It has been established that the total area of trench water outlets is taken in a somewhat smaller area, which is formed when the segmental gate is raised to its full height in the design mode. The accepted length of the quench chamber turned out insufficient for the flow energy parameters. There are large flow rates in the inlet and outlet sections of the water outlets and in addition, a significant irregularity in their distribution along the length can be in the sluice chamber, which leads to an increase in the slopes of the water surface, and consequently the hydrodynamic forces acting on the vessels. The chamber filling system from under the segment lift-down gate with trench water outlets and screen-beam absorbers in front of them turned out imperfect in all the considered flow parameters and it requires further design changes.

Keywords: shipping lock, chamber filling system, trench water outlets, segment lift-down gate, screen and beam absorbers.

For citation:
Gapeev, Anatolii M., and Konstantin P. Morgunov. "Analysis of changes in the basic parameters of the system of filling the chamber of the ship lock № 7 of the moscow canal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 78–86. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-78-86.

УДК 626.4: 626.421.4.001.2

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НАПОЛНЕНИЯ КАМЕРЫ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА № 7 КАНАЛА ИМЕНИ МОСКВЫ

А. М. Гапеев, К. П. Моргунов

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

Представлены результаты анализа гидравлических, энергетических и кинематических параметров системы наполнения камеры шлюза из-под сегментных подъемно-опускных ворот с траншейными водово-

дами и экранно-балочными гасителями. Сосредоточенные (головные) системы наполнения нашли широкое применение в шлюзостроении из-за простоты конструкций, удобства в эксплуатации и экономичности. Все шлюзы, построенные на судоходных каналах России в XX веке – Беломорско-Балтийский канал, канал имени Москвы, Волго-Донской судоходный канал и Волго-Балтийский канал, имеют головные системы питания. Системы наполнения камер этих шлюзов отличаются между собой только составом элементов, образующих камеру гашения. Их выбор осуществлялся при проведении лабораторных исследований по условиям стоянки в камере эксплуатируемых в то время расчетных судов без учета изменения энергетических и кинематических параметров потока, а также изменений структуры флота в перспективе. Резкое увеличение при дальнейшем развитии судостроения осадок и водоизмещения судов существенно изменило условия пропуска через шлюзы судов, в особенности крупнотоннажных. Отмечается, что условия стоянки практически на всех шлюзах с головной системой питания оказались неудовлетворительными, в связи с чем значительно увеличилось количество аварийных ситуаций. Наиболее сложные условия пропуска судов имеют место на шлюзах канала имени Москвы. В настоящее время через шлюзы канала пропускаются крупнотоннажные суда водоизмещением до 64 000 кН и толкаемые составы водоизмещением до 180 000 кН. Анализ изменения основных параметров системы наполнения впервые выполнен на примере шлюза № 7. Установлено, что общая площадь траншейных водовыпусков принята несколько меньшей площади, образуемой при подъеме сегментных ворот на полную высоту при проектном режиме. Принятая длина камеры гашения оказалась недостаточной по энергетическим параметрам потока. Во входных и выходных сечениях водовыпусков имеют место большие скорости течений и, кроме того, в камере шлюза может наблюдаться значительная неравномерность их распределения по длине, что приводит к увеличению уклонов поверхности воды, а следовательно, и действующих на суда гидродинамических сил. Система наполнения камеры из-под сегментных подъемно-опускных ворот с траншейными водовыпусками и экранно-балочными гасителями перед ними оказалась несовершенной по всем рассматриваемым параметрам потока и требует в дальнейшем конструктивных изменений.

Ключевые слова: судоходный шлюз, система наполнения камеры, траншейные водовыпуски, сегментные подъемно-опускные ворота, экранно-балочные гасители.

Для цитирования:
Гапеев А. М. Анализ изменения основных параметров системы наполнения камеры судоходного шлюза № 7 канала имени Москвы / А. М. Гапеев, К. П. Моргунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 78–86. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-78-86.

Введение (Introduction)

Система питания камеры является важнейшим элементом в устройстве судоходного шлюза, которая оказывает существенное влияние на его пропускную способность и условия стоянки шлюзуемых судов. В строительных правилах по проектированию судоходных шлюзов[1] определены основные гидравлические требования к системам наполнения и опорожнения камер и даны рекомендации по их выбору. При выборе систем питания учитываются размеры камеры и расчетного судна, напор на камеру, она должна обеспечивать безопасные условия стоянки судна при оптимальном времени шлюзования для рассматриваемого водного пути.

Обоснование системы питания судоходных шлюзов и выбор режимов наполнения и опорожнения камер производится с учетом результатов теоретических и экспериментальных исследований [1], [2]. Наиболее широкое применение в России и за рубежом получили головные системы питания камер, как наиболее простые в конструктивном отношении и экономичные, используемые при напорах до 15 м. Головную систему наполнения камер имеют шлюзы Беломорско-Балтийского канала (ББК), канала имени Москвы (КиМ), Волго-Донского судоходного канала (ВДСК), Волго-Балтийского канала (ВБК), отдельные шлюзы на Волге, Каме, а также других реках и шлюзованных водных системах России.

Анализ эксплуатационных показателей работы существующих шлюзов с головной системой наполнения камер показывает, что их проектирование осуществлялось по условиям стоянки расчетных судов без учета в большинстве случаев кинематических и энергетических параметров

[1] СП 101.13330.2012. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализир. ред. СНиП 2.06.07–87. М.: Минрегион России, 2012. 70 с.

потока, поступающего в камеру и изменений структуры флота в перспективе. Увеличение грузоподъемности и осадок судов привело к существенному увеличению коэффициентов стеснения живого сечения камер при уровне нижнего бьефа, достигающих величины 0,6 и более, а следовательно, и к значительному увеличению действующих на крупнотоннажные суда продольных гидродинамических сил. По данным натурных исследований, условия стоянки судов практически на всех шлюзах с головной системой питания оказались неудовлетворительными: отмечается многократное превышение действующих на суда гидродинамических сил над нормативными значениями, наблюдаются навалы судов на ворота и бетонные конструкции шлюзов. Для обеспечения безопасности шлюзования крупнотоннажных судов были разработаны замедленные режимы подъема затворов, которые приводили к увеличению времени наполнения камер.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для примера в табл. 1 приведены показатели шлюзов судоходных каналов России, имеющих головную систему наполнения камер. В таблице приведены основные размеры камер для отдельных шлюзов и их эксплуатационные показатели: максимальные расходы воды при проектных режимах подъема затворов $Q_{макс}$, средние значения энергии потока $Э_{ср}$, поступающего в камеру, коэффициенты стеснения живого сечения при уровне нижнего бьефа для расчетного и крупнотоннажного судна K, превышение продольной гидродинамической силы, действующей на крупнотоннажное судно, над нормативным значением n и время наполнения камеры (по проекту и фактическое) $T_{нап}$.

Таблица 1

Эксплуатационные показатели отдельных шлюзов судоходных каналов

№ пп.	Наименование, тип и система наполнения камеры	$H_к$, м	Полезные размеры, м			$Q_{макс}$, м³/с	$Э_{ср}$, тыс. кВт	$K = \Omega_н / \otimes$		$n = P_{макс}/P_н$	$T_{нап}$, мин	
			$L_{ПК}$	$B_{ПК}$	$h_п$			расчетное судно	крупнотоннажное судно		проект.	факт.
1	№ 7 ББК, однокамерный, через галереи в голове	5,35	135	14,5	3,7	45	0,5	0,34	0,78	8	6	10
2	№ 10 КиМ, однокамерный, из-под сегментных ворот	5,90	290	30	4,0	203	9,9	0,41	0,61	2,5	13,5	16,5
3	№ 2 ВДСК, однокамерный, из-под плоских ворот	9,45	145	17,8	4,0	101	3,2	0,39	0,66	2	8	9
4	№ 2 ВБК, однокамерный, из-под плоских ворот	12,75	270	17,8	4,2	203	5,3	0,57	0,68	3	12	13,5

Из табл. 1 видно, что увеличение коэффициентов стеснения в 1,5–2,0 раза привело к увеличению действующих на крупнотоннажные суда гидродинамических сил. Наиболее существенное их увеличение наблюдалось для шлюза № 7 ББК: при очень малой средней энергии потока 0,5 тыс. кВт оно составило восемь раз, что свидетельствует об отсутствии в шлюзах ББК эффективных гасительных устройств. Снижения гидродинамических сил в них удалось добиться за счет уменьшения скорости подъема затворов с 0,24 до 0,11–0,13 м/мин [3], но при увеличении времени наполнения камеры с шести до десяти минут. Система наполнения камер типа ББК — через галереи в головах под порогом — нуждается в реконструкции, и при проектировании новых шлюзов в России не рассматривалась.

Наибольшее значение средней энергии потока зафиксировано для шлюза № 10 КиМ — 9,9 тыс. кВт, увеличение гидродинамических сил составило 2,5 раза и их снижение достигнуто за счет уменьшения высоты подъема сегментных ворот с 2,0 до 1,2 м, а время наполнения

камеры увеличилось с 13,5 до 16,5 мин. В системе наполнения камер шлюзов канала им. Москвы, как и в шлюзах ББК, отсутствуют эффективные гасительные устройства.

Шлюзы № 2 ВДСК № 2 ВБК имеют меньшие значения средней энергии потока по сравнению со шлюзом № 10 КиМ, они обладают более совершенными гасительными устройствами и поэтому снижение гидродинамических сил для крупнотоннажных судов привело к незначительному увеличению времени наполнения камер: на 1,0–1,5 мин. Безопасность шлюзования судов в них достигнута за счет уменьшения скорости подъема плоских ворот [4], [5].

С пропусками крупнотоннажных судов через шлюзы судоходных каналов, как показывают данные эксплуатации, связаны и аварийные ситуации в камерах шлюзов и на подходах к ним [6]. В табл. 2 приведены сведения о навалах судов в шлюзах судоходных каналов России, зафиксированные за период наблюдений 1985–1998 гг., и указано количество шлюзов на судоходных каналах, год ввода их в эксплуатацию, продолжительность наблюдений и общее число навалов, а также количество навалов судов на элементы шлюзов.

Таблица 2

Сведения о навалах судов в камерах судоходных шлюзов

№ пп.	Судоходные каналы	Кол-во шлюзов	Год ввода в эксплуат.	Период наблюдений, лет	Всего навалов	Элементы шлюза		
						верхняя голова	камера	нижняя голова
1	Беломорско-Балтийский канал	19	1933	8	29	1	14	14
2	Канал им. Москвы	11	1937	14	120	28	33	59
3	Волго-Донской судоходный канал	13	1952	13	50	13	3	34
4	Волго-Балтийский канал	8	1964	13	49	18	10	21

Приведенные в таблице сведения свидетельствуют о том, что значительная часть навалов приходится на головы шлюзов, в особенности, на нижние, которые являются основными элементами напорного фронта сооружений. Наименьшее количество навалов за восьмилетний период наблюдений было зафиксировано на Беломорско-Балтийском канале, имеющем шесть однокамерных и 13 двухкамерных шлюзов. Однако следует отметить, что они эксплуатируются при менее интенсивном судоходстве по сравнению с другими судоходными каналами. Наибольшее число навалов имеют шлюзы Канала им. Москвы — 120, что почти в 2,5 раза больше по сравнению со шлюзами ВДСК и ВБК при одинаковом периоде наблюдений. Кроме того, шлюзы КиМ имеют ширину камеры в 1,7 – 2,0 раза больше по сравнению с другими шлюзами каналов (см. табл. 1).

Неудовлетворительные условия стоянки крупнотоннажных судов в шлюзах КиМ и большое количество навалов в них на элементы сооружений могут быть связаны в основном с системой питания камеры из-за отсутствия эффективных гасительных устройств. Оценка качества системы наполнения и опорожнения камеры в условиях пропуска крупнотоннажных судов в шлюзах КиМ по гидравлическим, энергетическим и кинематическим параметрам потока пока не выполнялась.

Результаты (Results)

Анализ изменения основных параметров системы наполнения камеры из-под сегментных ворот выполнен на примере шлюза № 7 КиМ, который является двухкамерным. Верхняя камера шлюза при напоре $H_к$ = 9,78 м имеет полезную длину $L_{ПК}$ = 290 м, ширину $B_{ПК}$ = 30 м, глубину воды $h_к$ = 5,59 м и глубину на пороге $H_п$ = 5,5 м. Верхняя голова шлюза (рис. 1) состоит из стенки падения высотой $h_с$ = 4,28 м, имеющей широкий прямоугольный неразрезной порог, и железобетонного устоя толщиной 10,18 м, к которому закреплены ноги подъемно-опускных сегментных ворот. Ниша для размещения ворот в судоходном положении имеет длину 9,08 м. В устое на уровне

днища головы расположены четыре траншейных водовода, диаметром по 4 м каждый, перед которыми на расстоянии 2,0 м установлены экранно-балочные гасители высотой 2,4 м. Дно камеры шлюза расположено на 1,6 м ниже дна траншейных водоводов.

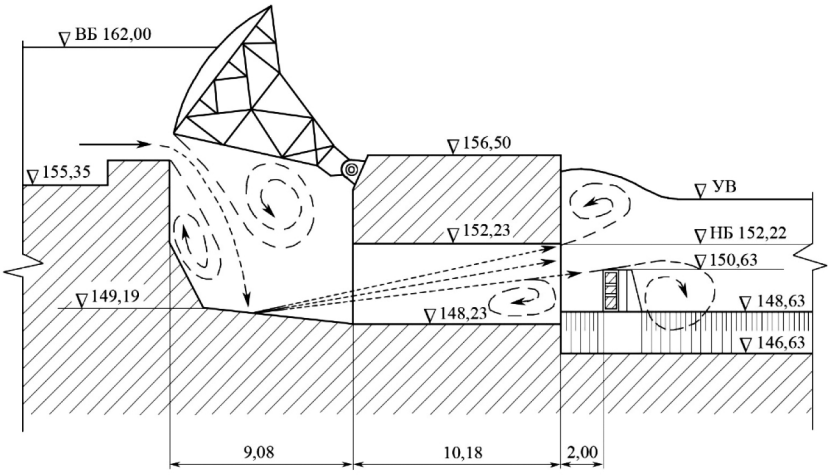


Рис. 1. Схема верхней головы шлюза № 7 КиМ

Гидравлические и энергетические параметры системы наполнения верхней камеры шлюза № 7 при проектном режиме подъема ворот даны на рис. 2.

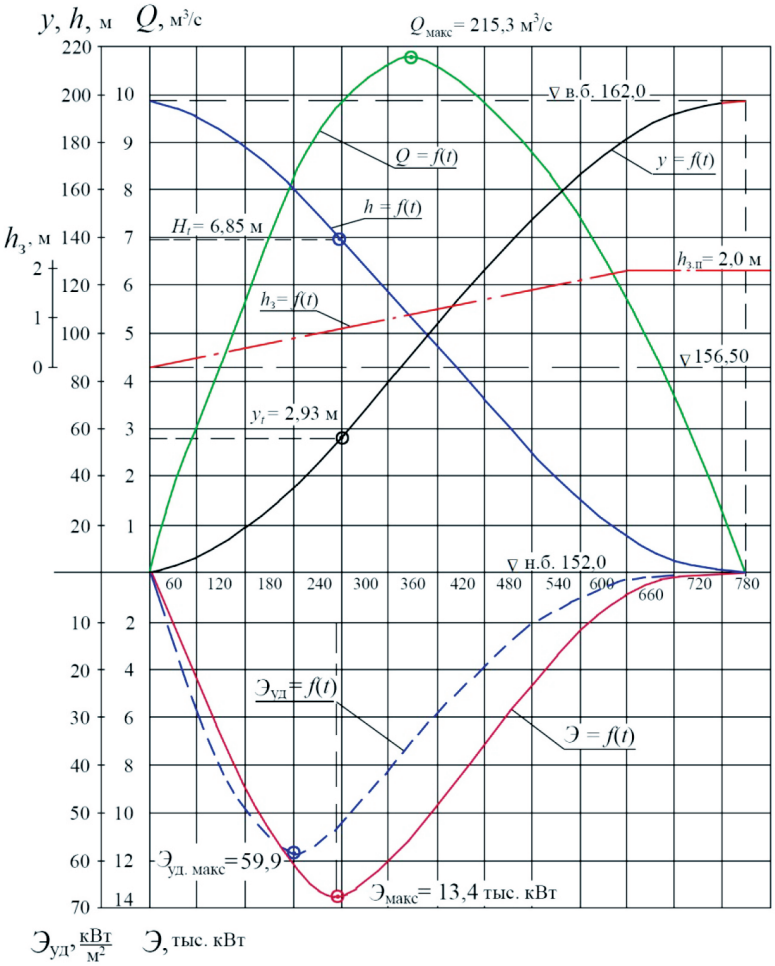


Рис. 2. Гидравлические и энергетические параметры наполнения камеры шлюза № 7 КиМ

При подъеме ворот на высоту 2,0 м с постоянной скоростью 0,2 м/мин время наполнения камеры при максимальной величине расхода 215,3 м^3/с составило 13,0 мин. Максимальная энергия потока $Э_{макс}$, поступающего в камеру, оказалось равной 13,4 тыс. кВт, она наступает при напоре $H_t = 0{,}7\ H_к$, так же, как при наполнении камеры из-под плоских ворот и через короткие обходные галереи [7], [8]. Максимальное значение удельной энергии потока $Э_{уд.\ макс}$ составило 59,9 кВт/м^2.

Анализ кинематических параметров потока показывает, что при наполнении (см. рис. 1) вихревые течения возникают при отрыве струй с кромки порога и носка сегментных ворот в нише верхней головы, с верхних кромок водопропускных отверстий и за балочным гасителем в камере шлюза, а также в водоводах перед гасителями.

Обсуждение (Discussion)

В вихревых зонах гасится значительная часть энергии потока, однако их положение может привести к сжатию водопропускных отверстий [9] и тем самым к увеличению скорости течения в пределах головы и в камере шлюза. Общая площадь траншейных водоводов $\omega_{вх} = 52{,}24$ м^2 принята меньше площади водопропускного отверстия, образующегося при подъеме ворот на полную высоту $\omega_о = 60{,}0$ м^2, что приводит к увеличению скорости во входных сечениях водоводов до 4,12 м/с. Скорость потока на выходе из водоводов при его сжатии перед экранно-балочными гасителями может увеличиваться примерно до 9,9 м/с. Кроме того, балочные гасители перед траншейными водоводами отклоняют поток к поверхности воды в камере, образуя бугры, которые растекаясь, увеличивают прямые уклоны водной поверхности, а следовательно, и гидродинамические силы, действующие на шлюзуемые суда. Наличие вихревых течений за гасителями может привести к изменению донных скоростей и неравномерности их распределения по глубине на значительном расстоянии по длине камеры шлюза. Этому также способствует значительное понижение отметки дна камеры. По данным натурных исследований, например, на Саратовских шлюзах, имеющих систему наполнения камер из-под плоских подъемно-опускных ворот при пониженной отметке дна камеры 0,5 м и наличии вихревого вальца за балочной решеткой неравномерное распределение скоростей наблюдается на расстоянии 120 м от верхней головы [7].

Установлено также, что длина камеры гашения шлюза № 7, равная длине ниши затвора 9,08 м, является недостаточной по энергетическим параметрам потока. Объем камеры гашения потока при любой схеме открытия затворов по А. В. Михайлову [10] определяется по зависимости

$$V = AЭ_{макс},$$

где $A = 0{,}20–0{,}25$ — коэффициент, характеризующий качество системы питания.

Учитывая т, что $V = l_{КГ} B_{ПК} h_с$, расчетная длина камеры гашения для рассматриваемой системы питания должна быть принятой не менее

$$l_{КГ} = \frac{AЭ_{макс}}{B_{ПК} h_с} = \frac{0{,}2 \cdot 13\,400}{30 \cdot 4{,}28} = 20{,}9 \text{ м } (\approx 21{,}0 \text{ м}),$$

т. е. почти в два раза больше первоначально принятой.

Расчетная длина успокоительного участка в камере шлюза, на котором должно происходить выравнивание скоростей потока по глубине,

$$l_у = AЭ_{уд.макс} = 0{,}2 \cdot 59{,}9 = 11{,}98 \text{ м } (\approx 12{,}0 \text{ м}).$$

Для систем наполнения из-под плоских ворот при наличии эффективных гасительных устройств она составляет около 5–6 м [11].

Заключение (Conclusion)

Выполненные исследования системы наполнения из-под сегментных подъемно-опускных ворот показывают, что она не удовлетворяет требованиям по гидравлическим, энергетическим и кинематическим параметрам потока, поступающего в камеру:

– недостаточная площадь водопропускных отверстий;

– небольшая длина камеры гашения;

– большие скорости потока на выходе из водопропускных отверстий;

– наличие перед траншейными водоводами гасителей, которое приводит к неравномерному распределению скоростей по глубине воды в камере.

Принятая длина камеры гашения 9,08 м по условиям размещения сегментных ворот в судоходное положение при высоте подъема 2,0 м, считается «тормозной», так как задерживает движение потока на входе в траншейные водовыпуски. В настоящее время шлюз № 7 КиМ эксплуатируется при режиме подъема затвора наполнения на высоту 1,32 м, что привело к уменьшению площади водопропускного отверстия до $\omega_o = 39{,}6$ м^2. Увеличение площади входных отверстий траншейных водоводов составило 1,32, но при этом время наполнения камеры увеличилось до 16,5 мин, а скорости на выходе потока существенно не изменились.

Экспериментальные и теоретические исследования влияния элементов на гидравлические параметры потока показали, что для уменьшения скоростей движения потока необходимо постепенно увеличивать площади водопропускных отверстий, образуемых элементами системы питания, примерно в 1,5 – 2,0 раза [10], [12]. Равномерное распределение скоростей по глубине воды в камере шлюза обеспечивается за счет устройства вертикальной распределительной решетки с неравномерным шагом отверстий между балками по высоте, увеличивающимся снизу вверх.

Система наполнения камер судоходных шлюзов канала имени Москвы из-под подъемно-опускных сегментных ворот с траншейными водовыпусками и экранными гасителями оказалась несовершенной по всем рассматриваемым параметрам потока. Безопасные условия шлюзования крупнотоннажных судов в шлюзах КиМ могут обеспечиваться при существующей системе питания только за счет уменьшения высоты подъема ворот при увеличении времени наполнения камеры, а следовательно, при существенном снижении пропускной способности. Кардинальным решением, учитывая срок эксплуатации более 80 лет является полная или частичная реконструкция систем питания и других элементов шлюзов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гапеев А. М.* Исследования вариантов верхней головы проектируемого шлюза Багаевского гидроузла / А. М. Гапеев, Г. Г. Рябов, Т. Ю. Нычик // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 524–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-524-536.

2. *Рябов Г. Г.* Моделирование процесса наполнения камеры судоходного шлюза с учетом данных натурных наблюдений / Г. Г. Рябов, А. Н. Ушакевич, Р. С. Смирнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 993– 1006. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-993-1006.

3. *Полилова А. И.* Уменьшение гидродинамической силы при наполнении шлюза / А. И. Полилова // Речной транспорт. — 1972. — № 3. — С. 43–45.

4. *Василевский В. П.* Исследования условий стоянки судов при наполнении камер типовых шлюзов ВБВП / В. П. Василевский // Проектирование и техническая эксплуатация судоходных сооружений и подходов к ним: сб. трудов. — Л.: ЛИВТ, 1984. — С. 31–40.

5. *Василевский В. П.* Исследования условий стоянки судов при наполнении камер типовых шлюзов ВДСК / В. П. Василевский // Интенсификация использования судоходных и портовых гидротехнических сооружений и повышение качества путевых работ по улучшению судоходных условий на реках: сб. трудов. — Л.: ЛИВТ, 1987. — С. 63–69.

6. *Нычик Т. Ю.* Анализ аварийных ситуаций при шлюзовании судов / Т. Ю. Нычик // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 4. — С. 105–112.

7. *Гапеев А. М.* Совершенствование системы наполнения камер судоходных шлюзов Саратовского гидроузла / А. М. Гапеев, К. П. Моргунов, А. В. Подрешетникова // Вестник Государственного университе-

та морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 984– 992. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-984-992.

8. *Гапеев А. М.* Оценка качества системы питания судоходного шлюза с короткими обходными галереями / А. М. Гапеев, К. П. Моргунов // Гидротехническое строительство. — 2018. — № 1. — С. 17–21.

9. *Гапеев А. М.* Влияние отдельных элементов верхней головы шлюза на гидравлические параметры потока / А. М. Гапеев // Гидротехнические сооружения и путевые работы на внутренних водных путях для судоходства: сб. трудов. — Л.: ЛИВТ, 1984. — С. 148–155.

10. *Михайлов А. В.* Головные системы питания судоходных шлюзов и их расчет / А. В. Михайлов. — М.: Минречфлот СССР, 1951. — 172 с.

11. *Гапеев А. М.* Результаты исследований процесса наполнения камеры второй нитки Шекснинского шлюза / А. М. Гапеев, Б.В. Коленко // Технический прогресс в проектировании и эксплуатации водных путей и гидротехнических сооружений: сб. трудов. — Л.: Транспорт, 1983. — № 176. — С. 48–54.

12. *Гапеев А. М.* Система наполнения камеры низконапорного судоходного шлюза из-под сегментных подъемно-опускных ворот / А. М. Гапеев, К. П. Моргунов, М. К. Карачева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1227–1233. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1227-1233.

REFERENCES

1. Gapeev, Anatolii M., Georgii G. Ryabov, and Tatyana Yu. Nychik. “Study of options for top head of designed gateway of Bagaevsk waterworks.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 524–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-524-536.

2. Ryabov, Georgiy G., Alexandr N. Ushakevich, and Ruslan S. Smirnov. “Simulation the filling navigation lock chamber process by results of field observations.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 993–1006. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-993-1006.

3. Polilova, A. I. “Umen’shenie gidrodinamicheskoi sily pri napolnenii shlyuza.” *Rechnoi transport* 3 (1972): 43–45.

4. Vasilevskii, V. P. “Issledovaniya uslovii stoyanki sudov pri napolnenii kamer tipovykh shlyuzov VBVP.” *Proektirovanie i tekhnicheskaya ekspluatatsiya sudo-khodnykh sooruzhenii i podkhodov k nim: sb. trudov.* L.: LIVT, 1984. 31–40.

5. Vasilevskii, V. P. “Issledovaniya uslovii stoyanki sudov pri napolnenii kamer tipovykh shlyuzov VDSK.” *Intensifikatsiya ispol’zovaniya sudokhodnykh i porto-vykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii i povyshenie kachestva putevykh rabot po uluchsheniyu sudokhodnykh uslovii na rekakh: sb. trudov.* L.: LIVT, 1987. 63–69.

6. Nyichic, T. Yu. “Analysis of emergency situations when locking ships.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 4 (2011): 105–112.

7. Gapeev, Anatolii M., Konstantin P. Morgunov, and Alisa V. Podreshetnikova. “Improvement of the system filling of the shipping lock’s chambers of Saratov’s hydroscheme.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 984–992. DOI: 10.21821/2309-5180- 2017-9-5-984-992.

8. Gapeev, A. M., and K. P. Morgunov. “Otsenka kachestva sistemy pitaniya sudokhodnogo shlyuza s korotkimi ob-khodnymi galereyami.” *Gidrotekhnicheskoe stroitel’stvo* 1 (2018): 17–21.

9. Gapeev, A. M. “Vliyanie otdel’nykh elementov verkhnei golovy shlyuza na gidravlicheskie parametry potoka.” *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya i putevye raboty na vnutrennikh vodnykh putyakh dlya sudokhodstva: sb. trudov.* L.: LIVT, 1984. 148–155.

10. Mikhailov, A. V. *Golovnye sistemy pitaniya sudokhodnykh shlyuzov i ikh raschet*. M.: Minrechflot SSSR, 1951.

11. Gapeev, A. M., and B. V. Kolenko. “Rezul’taty issledovanii protsessa napolneniya kamery vtoroi nitki Sheksninskogo shlyuza.” *Tekhnicheskii progress v proektirovanii i ekspluatatsii vodnykh putei i gidrotekhnicheskikh sooruzhenii: sb. trudov.* L.: Transport, 1983. № 176. 48–54.

12. Gapeev, Anatolii M., Konstantin P. Morgunov, and Mariya K. Karacheva. “Filling system of low-shipping shipping camera chamber from segment lifting-gate doors.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1227–1233. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1227-1233.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гапеев Анатолий Михайлович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf _gsk@gumrf.ru*

Моргунов Константин Петрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *morgunovkp@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gapeev, Anatolii M. —
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 _gsk@gumrf.ru*

Morgunov, Konstantin P. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *morgunovkp@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 30 января 2019 г.
Received: January 30, 2019.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-87-98

CHARACTERISTICS OF THE HYDRODYNAMIC PORTRAITS OF ACOUSTIC FIELDS OF THE SHALLOW AREAS OF PETER THE GREAT BAY OF SEA OF JAPAN

P. A. Starodubtsev[1], N. L. Khalaev[1], E. N. Baklanov[2]

[1] — Pacific Higher Naval School S. O. Makarov, Vladivostok, Russian Federation
[2] — Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

An approach to solve the problem of improving the technological methods of forming the means of investigation of the underwater environment through comprehensive studies of acoustic fields created by objects of artificial origin against the background of noise fields from natural phenomena of shallow areas is presented. The object of research is hydrodynamic acoustics, arisen from several scientific branches, including hydrodynamics, oceanology, hydrography and acoustics of the ocean. The subject of the research is a set of consistent theoretical, analytical and experimental results in the study of the basic concepts of hydrodynamic acoustics: the sea areas of Peter the Great Bay; geographical contours, allowing on a number of parameters to carry out their deterministic or uniquely prede-fined classification; hydrodynamic portraits of acoustic fields in order to identify their distinctive parameters. The multilevel systematics of the dynamics of hydrometeorological characteristics and its influence on the acoustic fields of geographic regions makes it possible to carry out field observation in a fractal-attractor way at those points that determine the structure of the aquatic environment. In this case, the fractal-attractor method of monitoring the environment and hydrodynamic portraits of acoustic fields can be used to study the various processes in the water environment whatever their nature. According to the research results it was noted that the occurrence of random variations of physical phe-nomena gradients considered in the paper is balanced on average by the processes of their dissipation and the appearance of fine structures in the marine environment; long-term continuous measurements and their analysis showed that changes in the acoustic field parameters, especially the acoustic signal phase, are associated not only with the geographical area of the equipment installation, but also with the influence of tidal forces, the bottom structure and natural and anthropogenic processes; tracks as "external influences" affect acoustic waves propagation in the marine environment due to the creation of an acoustic background on them that activates the environment and makes it possible to detect irregular acoustic changes in the shelf zone; the biological factors are sometimes crucial at the analysis of the acoustic field of the shallow sea. For the shelf waters of Sea of Japan, the parameters of internal waves, fluctuations of the thermohaline wedge, Brunt-Väisälä frequencies values can be considered dependent on the complex structure and size of bays and coves in the shelf zone. This negatively affects the equipment issues solution of marine areas with formed specific portraits on seiche of internal (gravitational) waves and the instrument constructions for solution of hydrodynamic acoustics problems. Such an object-subject approach depending on the totality of the obtained characteristics allows us to solve the problem of marine areas equipment with the instrument constructions at implementation of hydrodynamic acoustics tasks and making a certain contribution to the process of improving the monitoring systems of the underwater environment in the shallow areas of Peter the Great Bay, Sea of Japan.

Keywords: hydrodynamic acoustics, sea area, geographical contour, hydrodynamic portrait, fractal-attractor method, investigation of the underwater environment, environment monitoring.

For citation:
Starodubtsev, Pavel A., Nikolai L. Khalaev, and Evgenii N. Baklanov. "Characteristics of hydrodynamic portraits of acoustic fields of shallow-area district of Peter the Great, Japan Sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 87–98. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-87-98.

УДК 534.87

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОРТРЕТОВ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МЕЛКОВОДНЫХ РАЙОНОВ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ

П. А. Стародубцев[1], Н. Л. Халаев[1], Е. Н. Бакланов[2]

[1] — Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С. О. Макарова, Владивосток, Российская Федерация
[2] — Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет (Дальрыбвтуз), Владивосток, Российская Федерация

Представлен подход к решению проблемы совершенствования технологических методов формирования средств освещения подводной обстановки путем комплексных исследований акустических полей, создаваемых объектами искусственного происхождения на фоне шумовых полей от природных явлений мелководных районов. Объектом исследований является гидродинамическая акустика, возникшая из нескольких научных отраслей, в том числе гидродинамики, океанологии, гидрографии и акустики океана. Предметом исследования является набор последовательных теоретических, аналитических и экспериментальных результатов при изучении основных понятий гидродинамической акустики: морских районов залива Петра Великого; географических контуров, позволяющих по ряду параметров проводить их детерминированную или однозначно-предопределённую классификацию; гидродинамических портретов акустических полей с целью выявления их отличительных параметров. Многоуровневая систематика динамики гидрометеорологических характеристик и ее влияние на акустические поля географических районов позволяют проводить натурные исследования фрактально-аттракторным способом именно в тех точках, которые и определяют структуру водной среды. При этом фрактально-аттракторный способ мониторинга среды и гидродинамических портретов акустических полей может использоваться для исследования различных процессов в водной среде, независимо от их сущности. По результатам проведенных исследований отмечено, что возникновение случайных вариаций градиентов рассмотренных в работе физических явлений в среднем уравновешивается процессами их диссипации и появлением тонких структур в морской среде; выполненные в течение длительного периода времени непрерывные измерения и их анализ показали, что изменения параметров акустического поля, особенно фазы акустического сигнала, связаны не только с географическим районом установки аппаратуры, но и с влиянием приливных сил, со структурой дна и процессов природного и антропогенного характера; трассы как «внешние воздействия» оказывают влияние на распространение акустических волн в морской среде по причине создания на них акустического фона, активирующего среду и позволяющего обнаруживать нерегулярные акустические изменения в шельфовой зоне; биологические факторы имеют порой решающее значение при анализе акустического поля мелкого моря. Для шельфовой акватории Японского моря можно считать параметры внутренних волн, флуктуации термохалинного клина и значения частот Брента – Вяйсяля, зависимыми от сложной структуры и размеров акваторий заливов и бухт в шельфовой зоне. Это оказывает отрицательное влияние на решение вопросов оборудования морских районов со сформированными специфическими портретами по сейши внутренних (гравитационных) волн и на приборные конструкции для решения задач гидродинамической акустики. Такой объектно-предметный подход позволяет в зависимости от всей совокупности полученных характеристик в дальнейшем находить решение проблем оборудования морских районов приборными конструкциями при реализации задач гидродинамической акустики и внесения определенного вклада в процесс совершенствования систем освещения подводной обстановки в мелководных районах залива Петра Великого Японского моря.

Ключевые слова: гидродинамическая акустика, морской район, географический контур, гидродинамический портрет, фрактально-аттракторный способ, освещение подводной обстановки, мониторинг среды.

Для цитирования:
Стародубцев П. А. Характеристики гидродинамических портретов акустических полей мелководных районов залива Петра Великого Японского моря / П. А. Стародубцев, Н. Л. Халаев, Е. Н. Бакланов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 87–98. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-87-98.

Введение (Introduction)

Уменьшение гидролокационной заметности морских объектов, изменение принципов их обнаружения в пассивных режимах и технологических подходов к структуре формирования средств освещения подводной обстановки заставляет специалистов, работающих в области анализа акустических полей, перейти к их комплексным исследованиям. Возникшая из нескольких научных отраслей, в том числе гидродинамики, океанологии, гидрографии и акустики, гидродинамическая акустика начинает все более четко определять свои условия комплексного описания акустических полей. Как новейшее направление в гидроакустике она предлагает ряд концептуальных решений в теорию комплексных исследований, изменяющих весь алгоритм действий, начиная от замены теоретических трактовок до перехода на современный уровень математического исследования полей, лабораторного физического моделирования и конструирования типа *LabVIEW* (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Как показала практика экспериментальных исследований, проведенных авторами статьи в 2014–2017 гг. в мелководных районах залива Петра Великого (Приморский край), наиболее значимыми направлениями, формирующими современную теоретическую основу комплексных исследований в гидродинамической акустике, являются следующие:

– длительный мониторинг динамики изменения гидрометеорологических характеристик с учетом географического расположения исследуемых морских районов залива Петра Великого;

– формирование по результатам мониторинга гидрометеорологических характеристик морских районов географических контуров, позволяющих по ряду параметров проводить их детерминированную или однозначно-предопределённую классификацию;

– продолжительный анализ степени влияния атмосферы, литосферы, гидросферы на исследуемые географические контуры и получение на его основе отличительных характеристик для формирования гидродинамических портретов акустических полей;

– систематическое наблюдение в рамках гидродинамических портретов за характеристиками акустических полей залива Петра Великого с целью выявления их отличительных параметров.

Такая многоуровневая систематика (рис. 1) динамики гидрометеорологических характеристик и ее влияние на акустические поля географических районов дает возможность проводить натурные исследования именно в тех точках, которые и определяют структуру водной среды. При этом морской район не всегда совпадает с исследуемым географическим контуром. Как показали проведенные исследования, полузамкнутые морские районы являются структурой двух и более географических контуров по динамике гидрометеорологических характеристик[1].

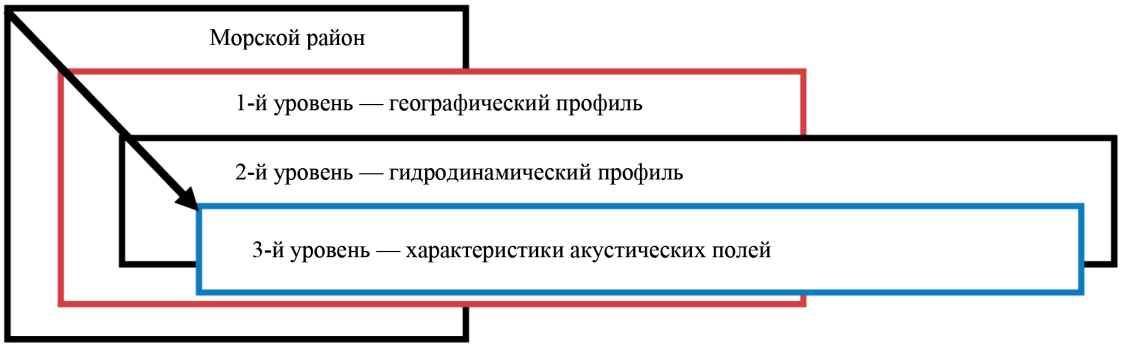


Рис. 1. Многоуровневая систематика процесса динамики гидрометеорологических характеристик

При интеграции выводов, представленных в работе [1], с направлениями формирования гидродинамической акустики, предметом дальнейших научных исследований является объяснение степени влияния динамики изменения отдельных гидрометеорологических характеристик на весь процесс ее развития. Объектом изучения являются проведенные авторами статьи экспериментальные, модельные исследования, измерения, а также структура и параметры акустического поля мелководных районов залива Петра Великого. Такой объектно-предметный подход позволяет в зависимости от всей совокупности полученных характеристик в дальнейшем решать вопрос об оборудовании морских районов со сформированными специфическими портретами теми или иными приборными конструкциями для реализации задач гидродинамической акустики с целью внесения определенного вклада в теорию процесса совершенствования систем освещения подводной обстановки в мелководных районах залива Петра Великого.

С учетом таких концептуальных решений в теории комплексных исследований акустических полей в дальнейшем можно говорить о натурных измерениях, как о достижении высших

[1] Дальнее обнаружение слабозаметных неоднородностей морской среды маломощными просветными сигналами: отчет по НИР ГБТ № 406/2008. Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2008. 161 с.

технических и организационных мероприятий при проведении научных экспериментов в рамках гидродинамической акустики.

Результаты (Results)

В пределах натурных исследований, проведенных в военно-научной школе № 37 «Низкочастотная активно-пассивная и параметрическая (просветная) гидролокация морской среды» в 2014–2017 гг. были получены многочисленные результаты, выходящие за рамки рассматриваемых в статье вопросов[1]. Поэтому в дальнейшем будут представлены только некоторые их фрагменты, связанные с конкретными частными научными задачами (например, частная научная задача натурных проверок лабораторных моделей в мелководных районах залива Петра Великого). Одним из ее этапов была необходимость исследования структуры рельефа дна мелководных (шельфовых) зон и ее влияния на отличительные характеристики гидродинамических портретов акустических полей путем изучения процессов обтекания водными массами возвышенностей дна, в том числе подводных банок.

Морскими экспедициями Тихоокеанского океанологического института Дальневосточного отделения РАН в 1977 г. в Японском море были обнаружены и изучены следующие аномалии дна: хребет Васильковского, хребет Берсенева, гора Петра Великого, гора Сибирь (рис. 2). Рельефные неоднородности шельфовой зоны Японского моря (рис. 3), обнаруженные в XVIII в. прошлого столетия, составили в 2014–2017 гг. основу натурных измерений гидроакустических полей [2] на протяженных низкочастотных гидроакустических трассах.



Рис. 2. Рельефные неоднородности на шельфе Японского моря

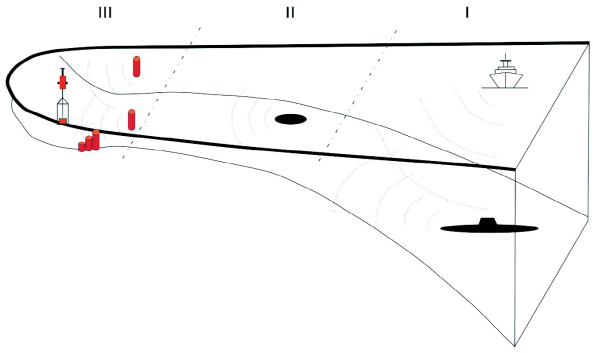


Рис. 3. Схематическое изображение шельфовой зоны Японского моря

[1] Разработка теоретических основ просветных технологий гидроакустического мониторинга океанской среды: отчет по НИР ГБТ 668/2016–2017. Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный уни-верситет, 2017. 130 с.

Выполненный анализ натурных измерений полей шельфовой зоны в районе низкочастотных гидроакустических трасс как географического контура показал, что она может условно делиться на три конфигурации (рис. 3):

I. *Первый географический контур* — это материковый склон, который является переходной наклонной областью подводной окраины материка, расположенной между шельфом и его подножием, граничащим с ложем океана [3].

II. *Второй географический контур* — это материковая отмель, которая представляет собой выровненную область подводной окраины материка, примыкающую к суше и характеризующуюся общим с ней геологическим строением [3].

III. *Третий географический контур* — это закрытая бухта со специальным режимом судоходства, а именно: порты, места базирования судов, прибрежные сооружения.

Переменный рельеф дна акватории материкового склона и закрытых бухт со специальным режимом судоходства на протяжении всей экономической зоны Российской Федерации формирует в Японском море донные и приповерхностные аномалии, которые создают интересные, с точки зрения гидродинамической акустики, линейные и нелинейные эффекты. Поэтому в течение последних десяти лет на хребтах и банке Бонсдорфа были проведены все основные исследования акустического поля, представленные в статье [4] — рис. 4.

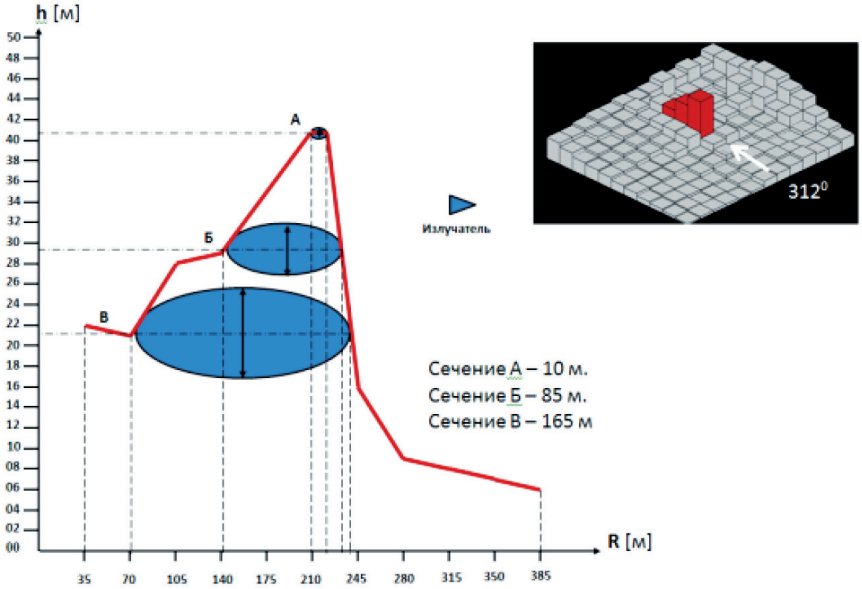


Рис. 4. Схематическое изображение по результатам эхолоцирования подводной банки Бонсдорфа в районе залива Петра Великого



Рис. 5. Судно, выполняющее акустическое зондирование акватории

Исследования акустического поля осуществлялись на стационарных трассах в летне-осенний период [5] в низкочастотном диапазоне от десятков до сотен герц (Гц) в динамичной по глубине точке приема с переменной позицией излучателя на частотах, измеряемых в сотнях Гц (рис. 4–6). Это позволило сформировать гидродинамические портреты акустического поля географических контуров: материковый склон, материковую отмель, закрытую бухту на банке Бонсдорфа и периодичность их возможных изменений.

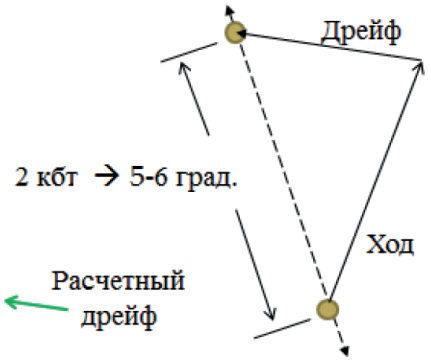


Рис. 6. Схема движения судна, проводящего зондирование акватории

В одной из бухт залива Петра Великого был сформирован следующий гидродинамический портрет акустического поля географического контура:

– по прогнозируемому вертикальному распределению скорости звука он имеет вид аномалии на глубине 8 м — рис. 7, *а*;

– измерения вертикального распределения скорости звука в течение двух недель с разницей в четыре, двенадцать и шестнадцать часов дали картину с аномалией от 0 до 15 м — рис. 7, *б*.

Такая изменчивость профиля вертикального распределения скорости звука, показанная на рис. 7, *б*, свидетельствует о теплообмене, при котором внутренняя энергия передается струями и потоками водной толщи в заливе и связана с динамикой изменения пространственных характеристик течений. При формировании гидродинамического поля (см. рис. 7, *б*) не были учтены результаты поглощения сигнала, возникающие при отражении от дна и рассеяния от поверхности [3], [6].

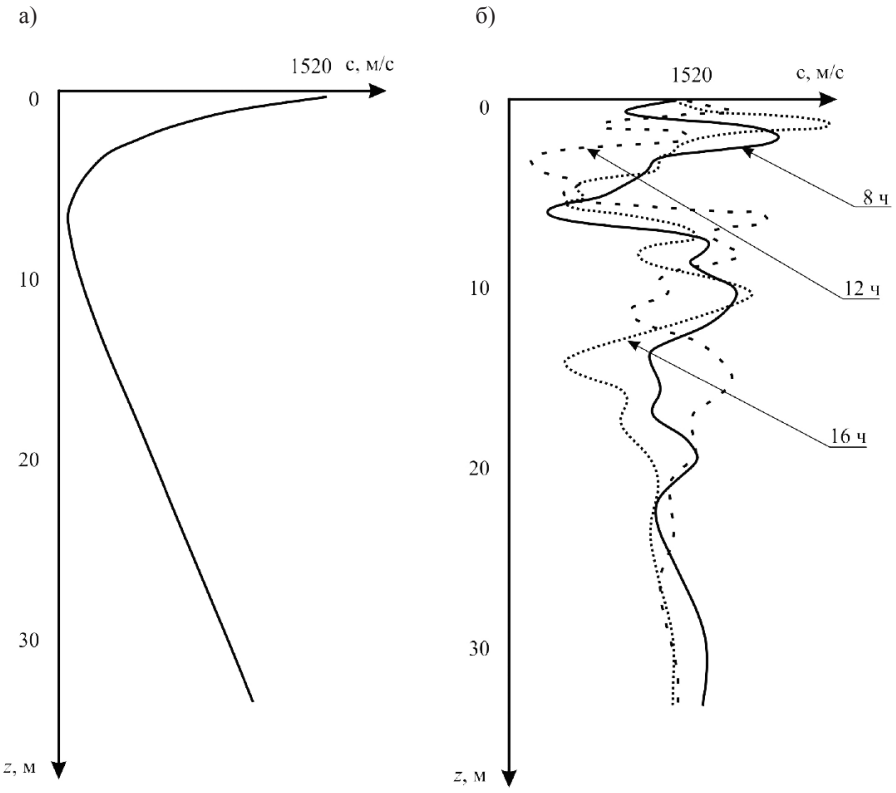


Рис. 7. Гидродинамический портрет акустического поля по значениям скорости звука:
а — по прогнозируемому вертикальному распределению;
б — по измеренному вертикальному распределению

Аномалия динамичности водной толщи (см. рис. 7, *б*), как показали многие эксперименты, характеризуется линейными и нелинейными эффектами, а именно:

– силами Кориолиса, приливным и отливным движением водных масс, поверхностными и внутренними волнами;

– достаточно сложной вертикальной и горизонтальной стратификацией водной среды.

Большое значение для объяснения данной изменчивости профиля вертикального распределения скорости звука имеет реальный рельеф дна в конкретном районе (в бухте).

Основными особенностями, которые характеризуют рельефную зависимость акустических полей, являются следующие [3]:

– котловинная форма, достаточно сложный рельеф дна и скальная его структура;

– выступы дна, выходящие на поверхность и создающие переотраженные звуковые волны;

– наличие на дне осадков, позволяющих формировать поперечные и продольные звуковые волны.

Как показали натурные измерения гидроакустических полей, на протяженных низкочастотных гидроакустических трассах (2014–2017 гг.) в третьем географическом контуре (закрытая бухта) не существует единой модели и технологии, позволяющих учесть влияние всех вышеуказанных особенностей на формирование акустического поля от объектов естественного и искусственного происхождения и его распространение.

Рассматривая многоуровневую систематику процесса динамики гидрометеорологических характеристик как комплекс организационных мер, операций и приемов, направленных на наблюдение и регистрацию данных об акустическом поле, авторами статьи был разработан и использован *нелинейный фрактально-аттракторный способ* дистанционного мониторинга закрытых бухт. В его основу были положены шумовые фракции акустического поля как элементы гидродинамического портрета.

По мнению авторов данного исследования, гидродинамический портрет аттрактора в динамической системе есть пространственная структура с передвигающимися элементами среды (носителями акустической энергии) в ходе теплового их перемещения с образованием вихревых и турбулентных потоков [7], [8]. Для удобства упрощенного объяснения сути фрактально-аттракторного способа дистанционного мониторинга закрытых бухт был взят акустический луч (рис. 8 [3]), идущий прямо и изменяющий свое направление на границах с быстрым изменением градиента скорости звука. Пренебрегая потерями сигнала, можно отметить, что пути, пройденные лучами, напоминают аттрактор, вращающийся против часовой стрелки при отсутствии бифуркаций. В теории динамического хаоса они называются *странными аттракторами*, способными при определенных параметрах к автогенерации. При этом чем больше вязкость жидкости, тем выше вероятность появления аттракторов, переходящих в автоколебательно-хаотический режим.

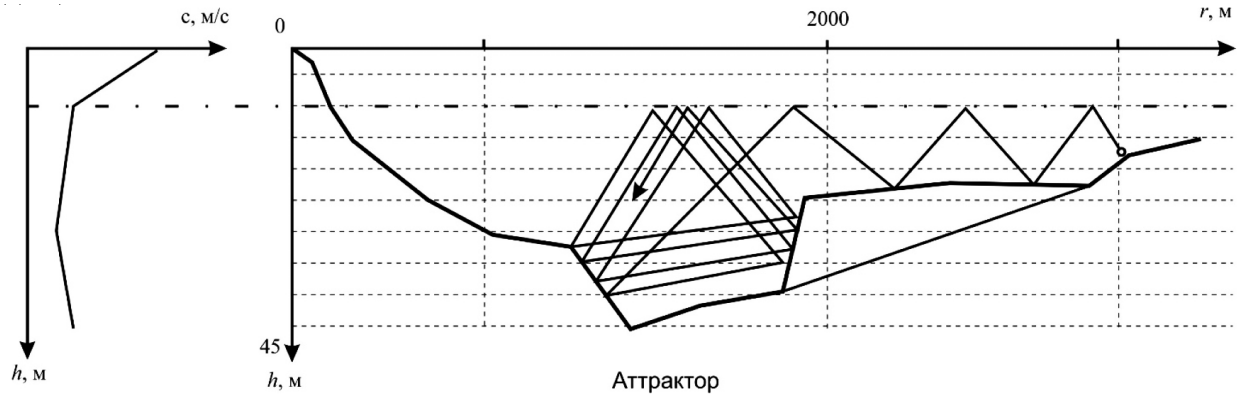


Рис. 8. Путь луча в водной среде с рельефом дна, напоминающим линзу

Для примера, выступы дна (банка Бонсдорфа), заметные на поверхности и находящиеся в области с высокими скоростями течения водных масс закрытых бухт (до 0,5 м/с), формируют аттракторы, переходящие во фрактальные области, аналогичные приведенным на рис. 9. Динамика формы аттрактора постоянно в различных масштабах монотонно убывает, затем возрастает и проявляет фрактальное «самоподобие». Эти факты дали возможность пояснить причины, послужившие основанием для обнаружения звуковых вариаций самого аттрактора и шумового поля движущегося морского объекта без визуального его наблюдения на поверхности, а интеграция

аттрактора и его динамики в виде фрактала явилась условием обнаружения акустического поля от объектов естественного и искусственного происхождения в водной среде в условиях материковой отмели и закрытых бухт [9].

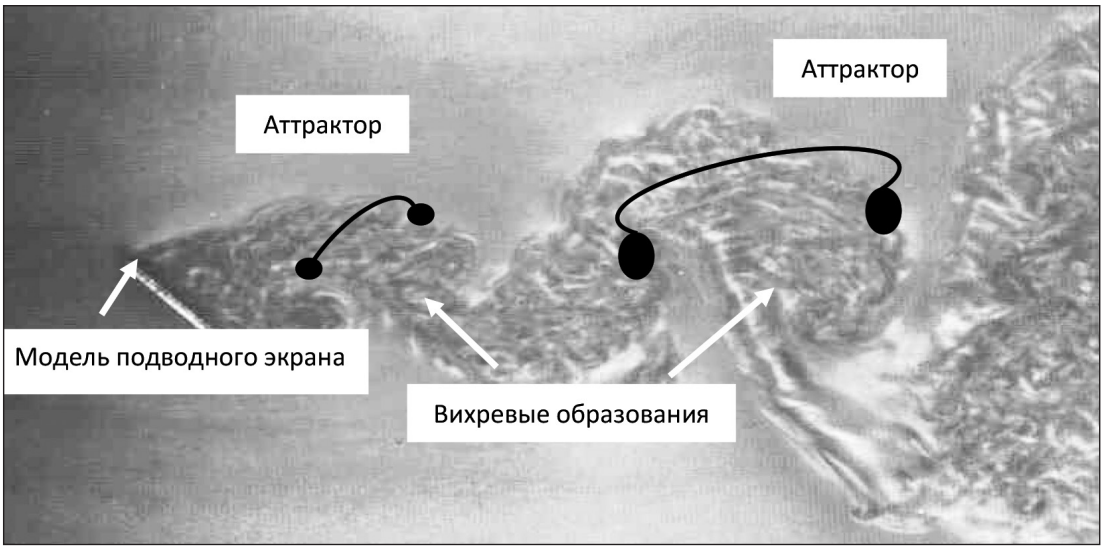


Рис. 9. Странные аттракторы, переходящие во фрактальные области

При проведении реальных измерений (2014–2017 гг.) в заливе Петра Великого был обнаружен в полосе частот от нескольких сотен герц до нескольких килогерц природный источник шумов [3]. Амплитуда сигнала от такого источника была примерно равна 110 мВ и не меняла своего тона в диапазоне частот от нескольких сотен герц до нескольких килогерц. Сам сигнал был схож по звучанию и тональной окраске с «пересыпанием крупного песка». Ранее такой звук наблюдался и фиксировался от банки Бонсдорфа (рис. 10 [3]) и представлял собой шумовой фрактал, по структуре подобный вихревым и турбулентным шумам.

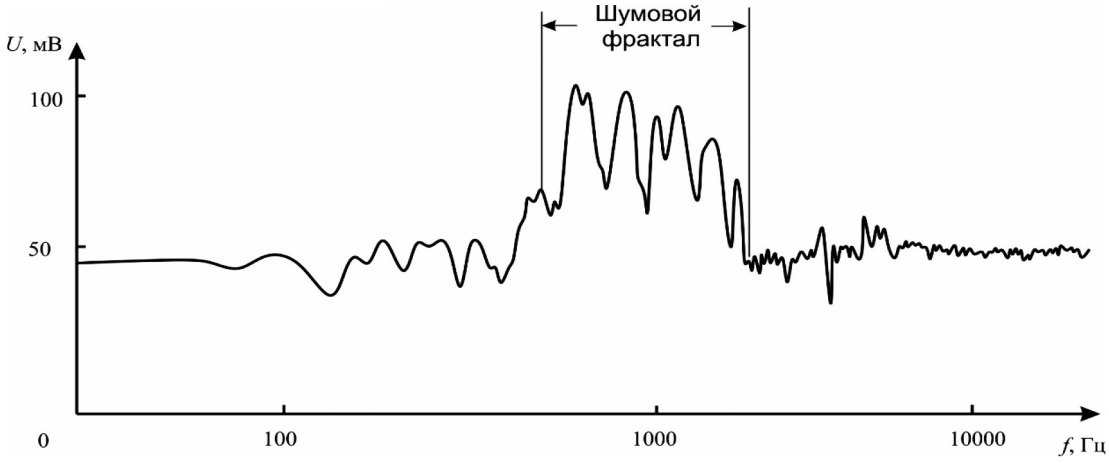


Рис. 10. Шумы от банки Бонсдорфа

Для анализа таких установившихся вихревых и турбулентных шумов стационарных природных и искусственных источников в [3] были предложены современные способы вейвлет-анализа. Для томографирования данного процесса была использована «подсветка среды» для изучения природы формирования акустических полей от источников естественного и искусственного происхождения в закрытых бухтах. Разовый фрагмент такого томографирования сигналов представлен на рис. 11 [3].

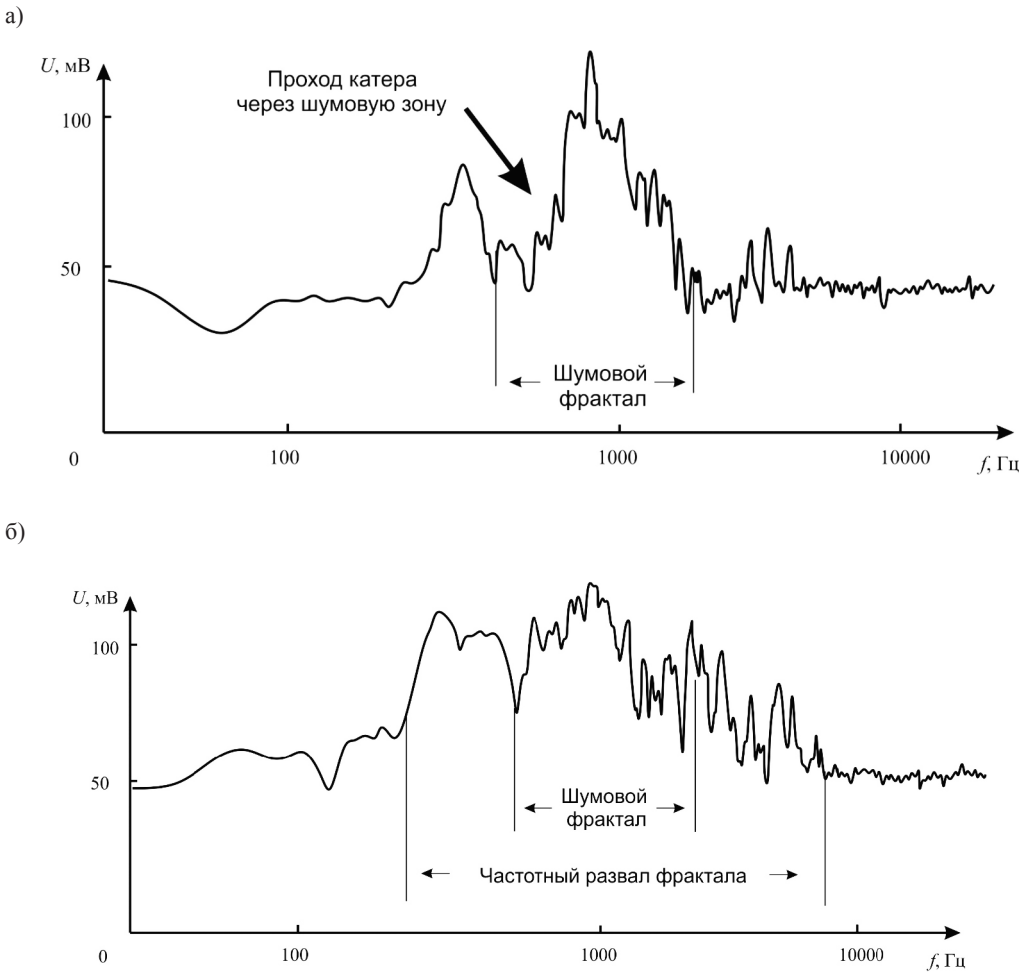


Рис. 11. Фрагменты томографирования сигналов: *а* — при прохождении быстроходным катером шумовой зоны от банки; *б* — при выходе быстроходного катераиз шумовой зоны от банки

Другим интересным обстоятельством явилось то, что донные отложения большой пористости являются одной из основных характеристик грунта закрытых бухт. В такой пористой среде хорошо формируются продольные волны, по своей структуре похожие на волны Био [10]. Знание характеристик волн Био позволяет учесть возможность формирования аттракторов в придонных слоях и степень их влияния на процесс распространения сигналов от морских объектов и физических явлений.

Традиционно во всех проведенных авторами статьи экспериментах скальные донные структур оказывали максимальное влияние на процесс формирования акустического поля в мелком море. Нормальная звуковая волна в скальном грунте относительно водной среды движется со скоростью звука около 3000 м/с и появляется в точке приема тогда, когда объект не наблюдается визуально.

Обсуждение (Discussion)

Как показали натурные исследования, возникновение случайных вариаций градиентов рассмотренных ранее физических явлений в среднем уравновешивается процессами их диссипации, что неизбежно влечет за собой появление тонких структур в морской среде.

Проведенные в течение длительного периода времени непрерывные измерения и их анализ показали, что вариации параметров акустического поля, особенно фазы акустического сигнала, связаны не только с географическим районом установки аппаратуры, но и с влиянием приливных сил, со структурой дна и процессов природного и антропогенного характера на поверхности воды.

Было установлено, что трассы как «внешние воздействия» оказывают влияние на распространение акустических волн в морской среде. На них создается акустический фон, активирующий среду и позволяющий обнаруживать нерегулярные акустические изменения в шельфовой зоне. При рассмотрении вопроса состояния водной среды мелкого моря не принималось во внимание влияние биологических факторов, имеющих место в водной среде, хотя они имеют порой решающее значение при анализе акустического поля мелкого моря.

Дальнейшие расчеты, исследования и анализ измерений показали, что для шельфовой акватории Японского моря можно считать параметры внутренних волн, флуктуации термохалинного клина, значения частот Брента – Вяйсяля, зависимыми от сложной структуры и размеров акваторий заливов и бухт в шельфовой зоне. Это оказывает отрицательное влияние на решение вопроса оборудования морских районов со сформированными специфическими портретами по сейши, а также на влияние внутренних (гравитационных) волн, на приборные конструкции для решения задач гидродинамической акустики.

Предложенный и теоретически обоснованный в статье фрактально-аттракторный способ мониторинга среды и гидродинамических портретов акустических полей может быть использован для исследования различных процессов в водной среде, независимо от их сущности. Его структура представляется как некая последовательность технологических операций [11], [12]:

– определение границ динамической системы с уяснением степени ее хаотичности (детерминированности);

– анализ динамической системы с выявлением аттракторных явлений и уточнением их фазовых портретов;

– определение математической модели фрактала с определением его размерности;

– выявление по фракталу всех свойств системы и модификация системы по математической модели.

Заключение (Conclusion)

Рассмотренный объектно-предметный подход позволяет в зависимости от всей совокупности полученных характеристик в дальнейшем решить вопрос об оборудовании морских районов со сформированными специфическими портретами теми или иными приборными конструкциями для реализации задач гидродинамической акустики и внесения определенного вклада в процесс совершенствования систем освещения подводной обстановки в мелководных районах залива Петра Великого.

Многоуровневая систематика динамики гидрометеорологических характеристик и ее влияние на акустические поля географических районов позволяют проводить натурные исследования именно в тех точках, которые и определяют структуру водной среды. При этом следует отметить, что морской район не всегда совпадает с исследуемым географическим контуром. Как показали проведенные исследования, полузамкнутые морские районы являются структурой двух и более географических контуров по динамике гидрометеорологических характеристик.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам кафедры физики и общетехнических дисциплин Тихоокеанского высшего военно-морского училища имени С. О. Макарова и кафедры судовождения Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета (*Дальрыбвтуз*) *за оказанную помощь при подготовке акустических приборов к проведению натурных экспериментов и обработке полученных при морских измерениях данных.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стародубцев П. А.* Исследование процесса влияния сейши на акустическое поле замкнутых акваторий мелководных районов / П. А. Стародубцев, Н. Л. Халаев, Е. Н. Бакланов // Вестник Государственного

университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 183–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-183-190.

2. *Бондарь Л. Ф.* Влияние прилива на распространение звука в шельфовой зоне Японского моря/ Л. Ф. Бондарь, Л. К. Бугаева, А. Н. Рутенко. // Акустический журнал. 2000. Т. 46. — № 5. С. 613–623.

3. *Халаев Н. Л.* Обнаружение акустически малозаметных морских объектов в мелком море закрытых бухт: монография / Н. Л. Халаев. — Владивосток: Издательство ВГУЭС, 2016. — 298 с.

4. *Мироненко М. В.* Информационно-аналитическая система расчета и анализа просветного гидроакустического поля в системах мониторинга морских акваторий / М. В. Мироненко, А. М. Василенко, Л. Э. Карачун // Датчики и системы. — 2015. — № 9–10 (196). — С. 12–16.

5. *Буренин А. В.* Экспериментальные исследования особенностей распространения низкочастотных псевдослучайных сигналов из прибрежной зоны в глубокое море в условиях слабого отрицательного градиента скоростей звука на шельфе / А. В. Буренин, Е. А. Войтенко, Ю. Н. Моргунов // Технические проблемы освоения мирового океана. — 2015. — Т. 6. — С. 192–196.

6. *Моргунов Ю. Н.* Экспериментальная апробация аппаратно-программного комплекса для дистанционного измерения скорости течений и температур в мелководных акваториях / Ю.Н. Моргунов, В.В. Безответных, А. А. Голов, М. С. Лебедев // Акустический журнал. — 2014. — Т. 60. — № 6. — С. 623. DOI: 10.7868/S0320791914060112.

7. *Моргунов Ю. Н.* Исследование влияния гидрологических условий на распространение псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море / Ю. Н. Моргунов, В. В. Безответных, А. В. Буренин, Е. А. Войтенко // Акустический журнал. — 2016. — Т. 62. — № 3. — С. 341. DOI: 10.7868/S0320791916030114.

8. *Bowlin J. B.* Ocean acoustical ray-tracing: Software Ray / J. B. Bowlin, J. I. Spiesberger, T. F. Duda, L. E. Freitag. — Woods Hole Oceanografic Institution, 1992.

9. *Рутенко А. Н.* Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе / А. Н. Рутенко, С. В. Борисов, Д. Г. Ковзель, В. А. Гриценко // Акустический журнал. — 2015. — Т. 61. — № 4. — С. 500–511. DOI: 10.7868/S0320791915040097.

10. *Evgrafova A.* Influence of geometrical parameters on convective flows in non-uniformly heated cylindrical fluid layers / A. Evgrafova, A. Sukhanovskii, M. Kuchinskii, E. Popova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 208. — Pp. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/208/1/012016.

11. *Сухановский А. Н.* Структура течений в пограничном слое интенсивного циклонического вихря / А. Н. Сухановский, А. В. Евграфова, Е. Н. Попова // XX Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл. — Пермь: Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, 2017. — С. 329.

12. *Spindel R. C.* Acoustic tomography for monitoring the Sea of Japan: a pilot experiment / R. C. Spindel, J. Na, P. H. Dahl, S. Oh, C. Eggen, Y. G. Kim, V. A. Akulichev, Yu. N. Morgunov // IEEE Journal of Oceanic Engineering. — 2003. — Vol. 28. — Is. 2. — Pp. 297–302. DOI: 10.1109/JOE.2003.811896.

REFERENCES

1. Starodubtsev, Pavel A., Nikolai L. Khalaev, and Evgenii N. Baklanov. “Investigation of the process of the seishi influence on the acoustic field of closed shallow water areas.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 183–190. DOI: 10.21821/2309-5180- 2018-10-1-183-190.

2. *Bondar L. F.* Influence of the tide on the sound propagation in the shelf zone of the sea of Japan/ Bondar L. F., Bugaeva L. K., Rudenko A. N. / / Acoustic journal. 2000. Vol. 46. - № 5. P. 613-623.

3. Khalaev, N.L. *Obnaruzhenie akusticheski malozametnykh morskikh ob”ektov v melkom more za-krytykh bukht: monografiya*. Vladivostok: Izdatel’stvo VGUES, 2016.

4. Mironenko, Mihail V., Anna M. Vasilenko, and Leonard E. Karachun. “Information-analytical system of calculation and analysis of translucent hydroacoustic field in monitoring of sea areas.” *Sensors and Systems* 9-10 (196) (2015): 12–16.

5. Burenin, A. V., E. A. Voitenko, and Yu. N. Morgunov. “Eksperimental’nye issledovaniya osobennostei rasprostraneniya nizkochastotnykh psevdosluchainykh signalov iz pribrezhnoi zony v glubokoe more v usloviyakh slabogo otritsa-tel’nogo gradienta skorostei zvuka na shel’fe.” *Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana* 6 (2015): 192–196.

6. Morgunov, Y. N., V. V. Bezotvetnykh, A. A. Golov, M. S. Lebedev, K. Kim, and J.-S. Park. “Experimental testing of a hardware and software complex for remote measurement of current velocities and temperatures in shallow sea water areas.” *Acoustical Physics* 60.6 (2014): 657–665. DOI: 10.1134/S1063771014060116.

7. Morgunov, Y. N., V. V. Bezotvetnykh, A.V. Burenin, and E. A. Voitenko. "Study of how hydrological conditions affect the propagation of pseudorandom signals from the shelf in deep water." *Acoustical Physics* 62.3 (2016): 350–356. DOI: 10.1134/S1063771016030118.

8. Bowlin, James B., J. I. Spiesberger, T. F. Duda, and L. E. Freitag. *Ocean acoustical ray-tracing: Software Ray*. Woods Hole Oceanographic Institution, 1992.

9. Rutenko, A. N., S. V. Borisov, D.G. Kovzel', and V. A. Gritsenko. "A radiohydroacoustic station for monitoring the parameters of anthropogenic impulse and noise signals on the shelf." *Acoustical Physics* 61.4 (2015): 455–465. DOI: 10.1134/S1063771015040090.

10. Evgrafova, A., A. Sukhanovskii, M. Kuchinskii, and E. Popova. "Influence of geometrical parameters on convective flows in non-uniformly heated cylindrical fluid layers." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 208. No. 1. IOP Publishing, 2017. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/208/1/012016.

11. Sukhanovskii, A. N., A. V. Evgrafova, and E. N. Popova. "Struktura techenii v pogranichnom sloe intensivnogo tsiklonicheskogo vikhrya." *XX Zimnyaya shkola po mekhanike sploshnykh sred: Tezisy dokladov*. Perm': Institut mekhaniki sploshnykh sred Ural'skogo otdeleniya RAN, 2017. 329.

12. Spindel, Robert C., J. Na, P. H. Dahl, S. Oh, C. Eggen, Y. G. Kim, V. A. Akulichev, and Yu. N. Morgunov. "Acoustic tomography for monitoring the Sea of Japan: A pilot experiment." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 28.2 (2003): 297–302. DOI: 10.1109/JOE.2003.811896.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стародубцев Павел Анатольевич —
доктор технических наук, профессор
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С. О. Макарова
690062, Российская федерация, Владивосток, Камский пер., 6
e-mail: *spa1958@mail.ru*

Халаев Николай Лукич —
кандидат технических наук, доцент
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С. О. Макарова
690062, Российская федерация, Владивосток, Камский пер., 6
e-mail: *halaevn@mail.ru*

Бакланов Евгений Николаевич —
доцент
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет (Дальрыбвтуз)
690087, Российская федерация, Владивосток, ул. Луговая, 52Б
e-mail: *baklanoven@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Starodubtsev, Pavel A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Pacific Higher Naval School S. O. Makarov
6 Kamskii Lane, Vladivostok, 690062, Russian Federation
e-mail: *spa1958@mail.ru*

Khalaev, Nikolai L. —
PhD, associate professor
Pacific Higher Naval School S. O. Makarov
6 Kamskii Lane, Vladivostok, 690062, Russian Federation
e-mail: *halaevn@mail.ru*

Baklanov, Evgenii N. —
Associate professor
Far Eastern State Technical Fisheries University
52-B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087, Russian Federation
e-mail: *baklanoven@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 31 октября 2018 г.
Received: October 31, 2018.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-99-112

SELECTION OF THE CRANE MECHANISM TRANSMISSION PARAMETERS AT EARLY DESIGN STAGE

E. N. Andrianov, A. N. Ivanov

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

Against the background of current design developments, new elements included in the design of the mechanisms of ship jib cranes and cranes with articulated jib are highlighted in the paper. In this regard, the designs of planetary gearboxes are considered including fully embedded inside the drums, creating a compact drive, allowing in conditions of constrained dimensions to provide on the crane sites the volume of installation space for safe operation. The designs are created exclusively on planetary single-row mechanisms 2k-h of A type as the most advantageous in terms of simplicity in the design-technological and energy terms. Based on new and available data, the recommendations that reduce the amount of design works at determination of the gearboxes diametrical dimensions and that play an important role in the layout of crane mechanisms in the early stages of design are given. Wherein the geometric constraints and strength parameters providing the decline of the technological net cost of gearbox and the crane mechanism as a whole are taken into account. The advisability of the planetary gears creation, where only the teeth of external involute gearing are hardened and polished to a high hardness, is justified, and besides the wheel with internal teeth is made of thermally improved steel. The approaches to ensure the correct geometry of the open gears of mechanisms, which simplify the time-consuming calculation process without introducing an error in the result are proposed. To calculate the geometry of the rack-and-pinion gears and gear pairs of rotation mechanisms, including on the slewing rings with a modular system of the initial circuit with parameters corresponding to the domestic standards, a calculation system is recommended, which maintains a constant tooth height. For the mechanism of rotation of the crane mechanisms, the laws of distribution of operational loads obtained as a result of the numerous full-scale tests in the river and sea ports are given.

Keywords: lifting mechanism, derricking gear, slewing mechanism, load distribution law, inline reducers, bipartite graph, single-row planetary mechanisms, gearing geometry, strength.

For citation:
Andrianov, Evgenii N., and Anatoly N. Ivanov. "Selection of the crane mechanism transmission parameters at early design stage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 99–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-99-112.

УДК 621.873.019.3

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧ КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ НА РАННЕЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов

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

На фоне текущих конструкторских разработок в статье выделены новые элементы, которые внесены в конструктивную систему механизмов судовых стреловых кранов и кранов с шарнирно-сочлененной стрелой. В этой связи рассмотрены конструкции планетарных редукторов, в том числе полностью встраиваемые внутрь барабанов, создающие компактный привод, позволяющий в условиях стесненных габаритов обеспечить на площадках крана объем монтажного пространства в соответствии с нормами безопасной эксплуатации. Отмечается, что их конструкции созданы исключительно на планетарных однорядных механизмах 2k-h типа А как наиболее выгодных с точки зрения простоты в конструктивно-технологическом и энергетическом плане. На основании новых и имеющихся данных даны рекомендации, снижающие объем расчетных работ при определении диаметральных габаритов передач редукторов, играющие важную роль

при компоновке крановых механизмов на ранних стадиях проектирования. При этом учтены геометрические ограничения и прочностные параметры, обеспечивающие снижение технологической себестоимости редуктора и механизма крана в целом. Обоснована целесообразность создания планетарных передач, в которых до высокой твердости закалены и отшлифованы только зубья колес внешнего эвольвентного зацепления, при этом отмечается, что колесо с внутренними зубьями изготовлено из термически улучшенной стали. Предложены подходы к обеспечению правильной геометрии открытых зубчатых передач механизмов, упрощающие трудоемкий процесс расчета без внесения погрешности в результат. Для расчета геометрии реечных механизмов и зубчатых пар механизмов вращения, в том числе на опорно-поворотных кругах с модульной системой исходного контура с параметрами, отвечающими отечественным стандартам, рекомендована система расчета, при которой сохраняется постоянная высота зуба. Для механизма вращения крановых механизмов приведены законы распределения эксплуатационных нагрузок, полученные в результате многочисленных натурных испытаний в речных и морских портах на кранах.

Ключевые слова: механизм подъема, механизм изменения вылета, механизм поворота, закон распределения нагрузок, встроенные редукторы, двудольный граф, однорядные планетарные механизмы, геометрия зацепления, прочность.

Для цитирования:
Андрианов Е. Н. Выбор параметров передач крановых механизмов на ранней стадии проектирования / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 99–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-99-112.

Введение (Introduction)

В статье особое внимание уделяется рассмотрению характерных особенностей конструкций крановых механизмов, выявленных на фоне текущих конструкторских разработок, направленных на обеспечение требуемого нормами безопасной эксплуатации объема монтажного пространства в условиях стесненных габаритов на площадках крана. В настоящее время в эксплуатации судовых стреловых кранов и кранов с шарнирно-сочлененной укосиной (ШСУ) — рис. 1, все большее распространение получают приводы крановых механизмов, построенные на планетарных передачах.

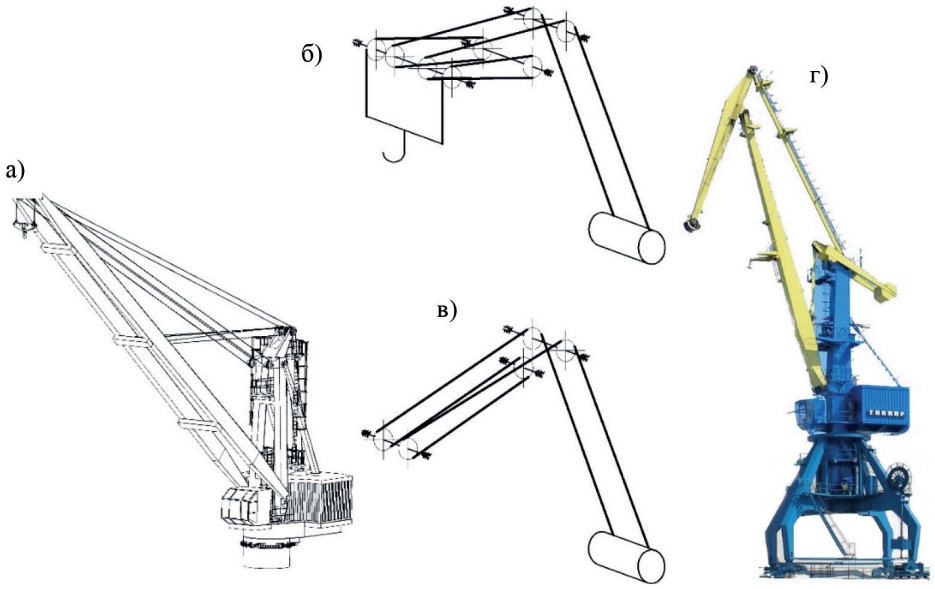


Рис. 1. Конструкции кранов: *а* — общий вид стрелового крана и схемы запасовки: *б* — механизма подъема; *в* — механизма изменения вылета стрелы; *г* — кран с ШСУ типа АРК, модификация крана Сокол 500-3616/20/32 т × 36/28/20 … 8 м

Замена традиционной компоновки силового привода с рядовым редуктором (рис. 2, *а*, *б*) на соосный привод (рис. 2, *в*, *г*) позволила, во-первых, создать компактный привод с высоким КПД и, во-вторых, расширить область эффективного применения планетарных передач,

реализуя их важные ожидаемые преимущества, определяемые компоновкой и спецификой работы. В частности, повышение компактности привода канатных лебедок механизма подъема (см. рис. 1, *б*) и изменение вылета стрелы (см. рис. 1, *в*) судовых стреловых кранов обеспечено путем применения конструкций планетарных редукторов полностью встраиваемых внутрь барабанов (см. рис. 2, *в*). Соосная компоновка на базе планетарных редукторов получила распространение и в силовом приводе механизма вращения крана как стрелового (рис. 3, *а*), так и крана с ШСУ (рис. 3, *б*). В конструкциях по рис. 3, *а*, *б* использовано внешнее зацепление опорно-поворотного устройства (ОПУ); аналогичные конструкции построены также с использованием внутреннего зацепления ОПУ (рис. 3, *г*).

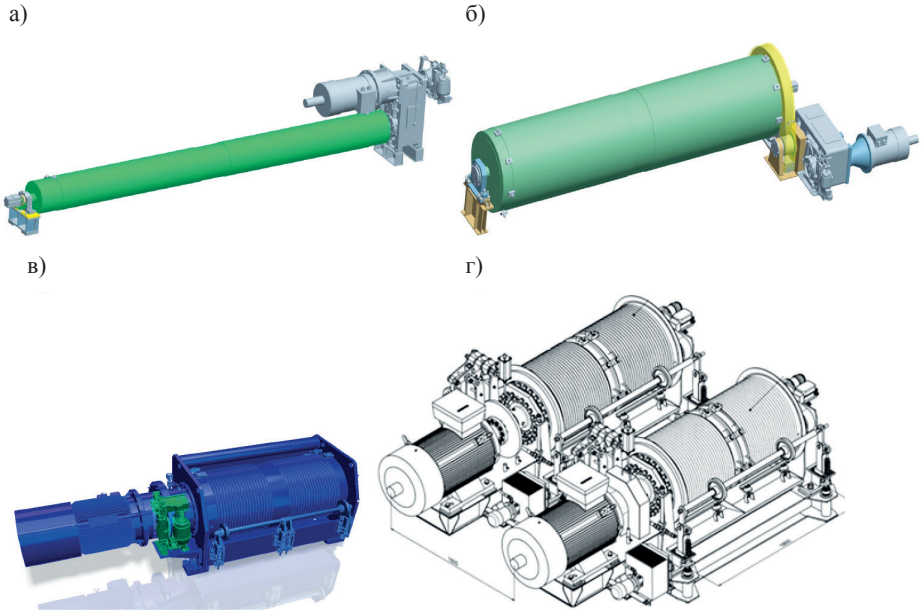


Рис. 2. Компоновка канатных лебедок:
а, *б* — традиционные компоновки привода; *в* — лебедка со встроенным редуктором;
г — грейферный механизм подъема со встроенными редукторами и дисковыми тормозами

Другой характерной особенностью таких устройств, как механизм поворота крана (рис. 3, *а*, *б*), привод румпельного механизма винторулевой колонки движительного комплекса (рис. 3, *в*) и механизм изменения вылета стрелы реечного типа крана с ШСУ (рис. 4) является наличие высоконагруженных открытых зубчатых передач. В связи с этим разработку подобных приводов нужно выполнять с учетом специфических вопросов геометрии для формирования зацепления, предотвращающего поломку зубьев и появление значительного износа открытых зубчатых передач.

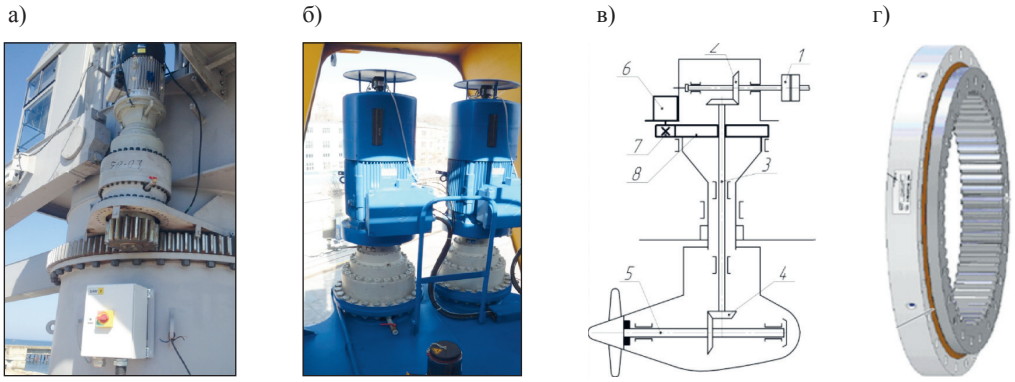


Рис. 3. Конструкции приводов механизма поворота: *а* — стационарного стрелового крана;
б — крана с шарнирно-сочлененной стрелой; *в* — румпельный механизм винторулевой колонки с механической передачей мощности: *1* — разобщительная муфта; *2*, *4* — конические передачи; *3* — промежуточный вал; *5* — гребной вал; *6* — привод; *7*, *8* — зубчатая цилиндрическая передача;
г — подшипник ОПУ с внутренним зацеплением

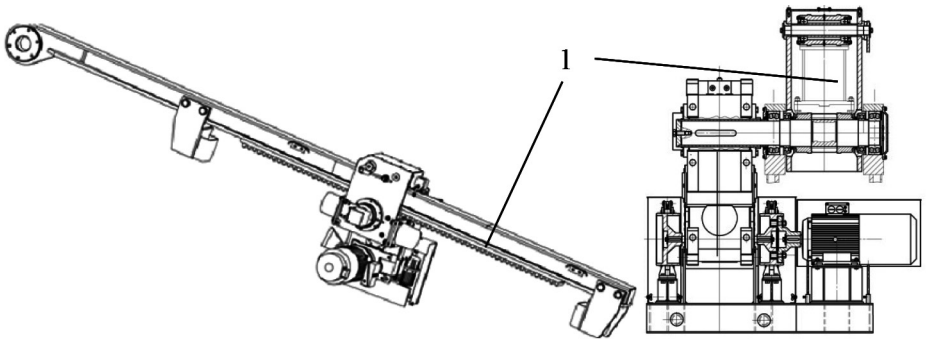


Рис. 4. Реечный механизм изменения вылета стрелы портального крана:
1 — зубчатая рейка

Из теории проектирования планетарных редукторов известно, что компоновки крановых механизмов создавались на базе планетарных редукторов европейских производителей (Brevini, Zollern, Siebenhaar)[1], чему способствовала, во-первых, следующая практика проектирования машин: не разрабатывать и изготавливать новый, тем более в условиях технологического состояния настоящего производства редукторов, а выбирать готовый редуктор; во-вторых, проектировщики, к большому сожалению, не располагали информацией об отечественных разработках в исследуемой области. Последнее обстоятельство заставляет обратить внимание работников конструкторских бюро на основные источники информации по данному вопросу. Так, в работе [1] рассмотрены встроенные в мотор-колесо конструкции редукторов, созданные на базе планетарных передач 2*k*-*h* типа *A*, наиболее выгодных с точки зрения простоты в конструктивно-технологическом плане. На базе хорошо известной в отечественной литературе структурной схемы построен планетарный редуктор европейских производителей (см., например, конструкцию Brevini по рис. 5, *а*): на рис. 5, *б* эта схема показана в концепции работы [2], на рис. 5, *в* — в концепции работы [3], на рис. 5, *г* данная структура выполнена в виде двудольного графа [4], где светлыми кружками отмечены вершины, отображающие дифференциалы, образующие множество X^m, темными — вершины, отображающие основные звенья, создающие множество X^z. Ребра двудольного графа соединяют вершины-звенья x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 с вершинами, отображающими дифференциалы u_1, u_2, u_3. Двудольный граф обозначается $G=\left(X^z, X^m, U\right)$, причем $X^z \cup X^m = X$, $X^z \cap X^m = \varnothing$, ребра U соединяют между собой только подмножества X^z и X^m [5].

а) б) в) г)

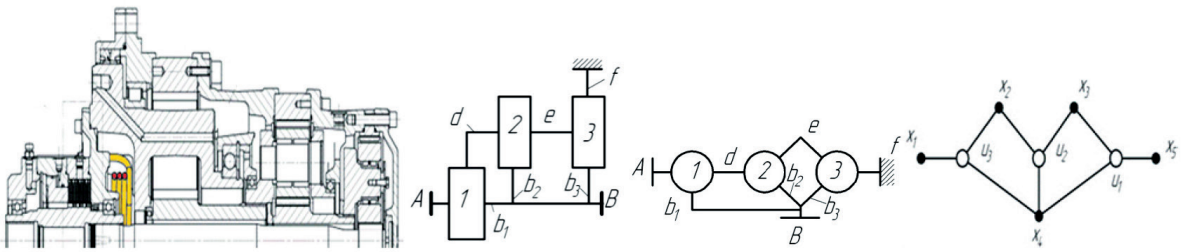


Рис. 5. Типовой редуктор канатного механизма: *а* — конструкция встроенного редуктора фирмы Brevini; *б* — представление структуры редуктора в виде обобщенной схемы; *в* — представление структуры редуктора на базе теории силового потока; *г* — представление структуры двудольным графом

Полный обзор методов представления сложных схем планетарных передач можно найти в работе [6]. В работе [4] на базе трех рядов получены 23 обобщенные структуры, каждая из которых включает $\sigma(\pi, k_m) = \pi^{k_m}$ кинематических схем, среди которых которых находятся как редукторы, так и мультипликаторы, где π — число схем, реализуемых на базе одного механизма;

[1] Планетарные редукторы Brevini: каталог продукции. ЗАО «НТЦ “Приводная техника”», 2003.

k_m — количество однорядных механизмов в конструкции. Введение в построение схем встроенных редукторов ограничений, накладываемых на расположение рабочих звеньев, снижает количество всевозможных конструктивных решений [7]. Отечественная теория проектирования оказалась востребованной только с момента запрета использования импортных изделий в определенных областях техники. В результате на базе имеющейся теории совместными с разработчиками машин усилиями были созданы собственные конструкции встроенных планетарных редукторов (рис. 6).

а) б)

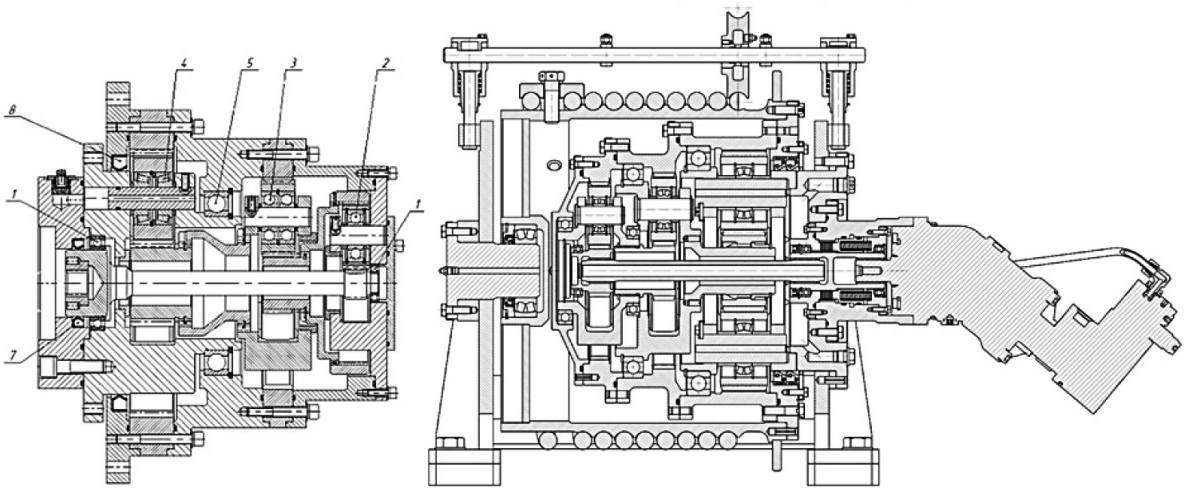


Рис. 6. Отечественные конструкции встроенных редукторов канатного механизма, в которых ведущий и ведомый валы имеют:
а — одинаковое направление вращения; *б* — разное направление вращения
Условные обозначения: *1-5* — подшипники качения, *7*, *8* — уплотнения

Редуктор механизма поворота строится на структуре, аналогичной рис. 5, *б–г*, в которой выходное звено *B* является опорным: $B \rightarrow f$, а опорное звено *f* выполнено выходным: $f \rightarrow B$. Заказ на проектирование и изготовление планетарного редуктора собственной конструкции для данного механизма судовых кранов в настоящее время получил ОАО «ЗАРЕМ». Таким образом, на фоне конструкторских разработок новых крановых механизмов получила стимулирование теория проектирования планетарных редукторов и появилась необходимость принятии дополнительных решений, позволяющих на ранних стадиях проектирования быстро определять диаметральные габариты.

Рассматривая открытые зубчатые передачи крановых механизмов, отметим следующее. Так, в новых разработках механизмов вращения ОПУ портальных кранов широко применяются опорно-поворотные круги (ОПК) компаний: *PSL*, *Rote-Erde*, *IMO* как с внешним, так и с внутренним прямозубым зацеплением с заданными параметрами колеса ОПК, несмотря на то, что изготовителями ОПК определена модульная система исходного контура с параметрами, отвечающими отечественным стандартам: $h_a^* = 1$, $\alpha = 20°$, $c = 0{,}25$. Тем не менее при проектировании подобных передач приходится сталкиваться со специальными системами расчетами их геометрии. Определенные вопросы вызывает также геометрия реечной зубчатой передачи механизма изменения вылета. В частности, следует отметить, что в обоих случаях не находит использования система расчета геометрии данных передач, сохраняющая в зацеплении стандартный радиальный зазор.

Основная часть (Main Part)

Рассмотрим основные вопросы, на которые следует обратить внимание на ранней стадии проектирования встроенных планетарных редукторов и открытых зубчатых передач исследуемых крановых механизмов.

Канатные барабаны. В связи с установкой редуктора внутрь барабана были приняты во внимание проведенные исследования четырех конструкций барабана с канатами, навитыми

по всей его длине (рис. 7). Первая конструкция по рис. 7, *а* имеет кольца и продольные ребра жесткости; конструкция по рис. 7, *б* отличается от первой конструкции только отсутствием колец жесткости; конструкция по рис. 7, *в*, как и первая, сделана с двумя кольцами жесткости и креплением полуосей опорного узла барабана с применением конической диафрагмы; конструкция по рис. 7, *г* выполнена без колец жесткости с конической диафрагмой для обеих полуосей опор барабана.

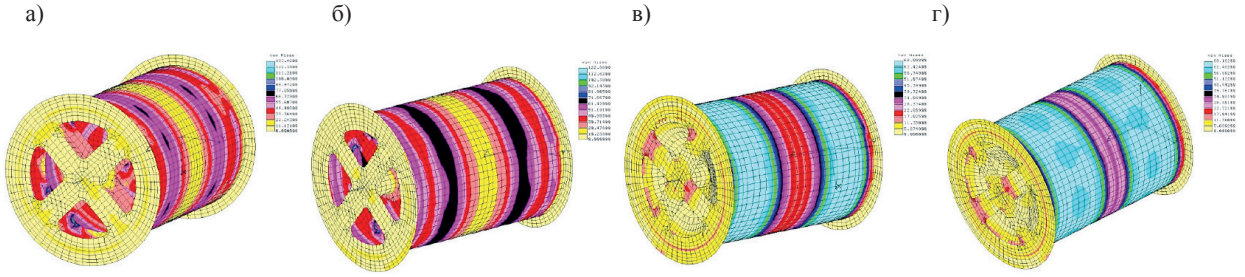


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние в различных конструкциях барабана:
а — конструкция, имеющая кольца и продольные ребра жесткости;
б — конструкция с отсутствием колец жесткости; *в* — конструкция с двумя кольцами жесткости и креплением полуосей опорного узла барабана с применением конической диафрагмы;
г — конструкция без колец жесткости с конической диафрагмой для обеих полуосей опор барабана

Напряженно-деформированное состояние во всех четырех конструкциях барабанов показано на рис. 7. В первой и второй конструкциях максимальные напряжения, равные, соответственно, 135 и 123 МПа, имеют место в зоне соединения сваркой колец жесткости с цилиндрической обечайкой барабана, против значений, соответственно, 56 и 61 МПа, имеющих место в стенках барабана. В третьей и четвертой конструкции максимальные напряжения в стенках барабана одинаковы и равны 68 МПа.

Данное исследование показывает возможность установки редуктора внутрь канатного барабана, не имеющего подкрепляющих элементов: колец жесткости и продольных ребер, без снижения устойчивости его стенки. При этом барабан может ставиться на две опоры: *трехподвижную фиксирующую опору*, устанавливаемую внутри редуктора, и *плавающую четырехподвижную опору*, устанавливаемую чаще в выносной стойке, создавая, таким образом, следующую статически определяемую схему:

$$q = W - 6n + 5p_1 + 4p_2 + 3p_3 + 2p_4 + p_5 = 1 - 6 \cdot 1 + 3 \cdot 1 + 2 \cdot 1 = 0,$$

где q — число избыточных связей;

W — число степеней свободы;

n — здесь число валов;

$p_1, p_2, \ldots, p_5$ — количество подвижностей в паре.

Все это делает схему нечувствительной к температурным и силовым деформациям, а также к отклонениям в расположении осей элементов соединения, но увеличивает воспринимаемую неподвижной опорой радиальную нагрузку. Последнее следует иметь в виду при выборе подшипника данной опоры [11].

Планетарный редуктор. Рассмотрим некоторые рекомендации, которые следует иметь в виду на ранней стадии проектировочного расчета. Основными напряженными узлами планетарных редукторов являются зубчатые зацепления, подшипники сателлитов, шлицевые соединения и валы. В первую очередь, как показала практика, выполняются расчеты зубчатых зацеплений. В соответствии с видами разрушений зубьев зубчатых зацеплений ГОСТом 21354–87, Правилами Регистра судоходства и Руководством Р.007–2004 Российского речного регистра судоходства установлено четыре основных вида расчета номинальных значений напряжений, которые затем уточняются коэффициентами, полученными на основе опыта.

При расчете однорядной планетарной передачи $2k - h$ (рис. 8) определяют раздельно внешнее зацепление $a - g$ и внутреннее $b - g$ с учетом условий связности. Поскольку каждое зацепление планетарной передачи рассчитывают на прочность по формулам цилиндрической зубчатой передачи, каждому зубчатому колесу помимо буквенных обозначений a, g, b присваивают индексы: 1 — меньшему, 2 — большему зубчатому колесу. В каждом зацеплении центрального колеса с сателлитом выделяют шестерню и колесо, присваивая, помимо буквенных обозначений, шестерне — индекс *1*, колесу — индекс *2* (рис. 8). В расчетах используют модуль передаточного отношения $\left|i_{ab}^{h}\right| = p$, который называют *конструктивным параметром планетарного ряда*.

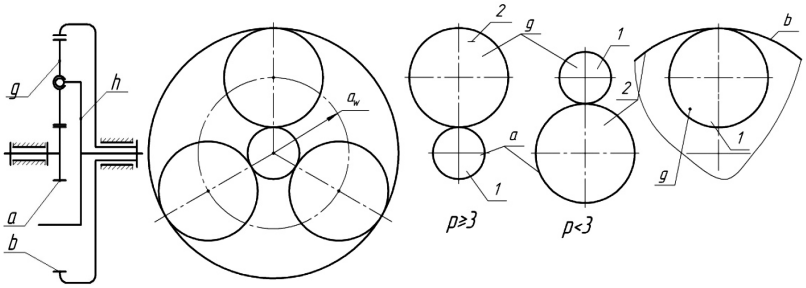


Рис. 8. Зубчатые передачи механизма типа *A* (по классификации В. Н. Кудрявцева)

Необходимо выявить, какое зацепление из двух является определяющим на стадии проведения проектировочного расчета. Для этого определим отношение нормальной нагрузки допустимой контактной выносливостью σ_{HP} внутреннего зацепления к нормальной нагрузке допустимой контактной выносливостью внешнего зацепления. Данное отношение: $F_{Hba} = (F_{nP})_b / (F_{nP})_a$, с учетом известной формулы Герца и условия прочности: $\sigma_н = Z_E \sqrt{F_n / l_\Sigma \rho_{пр}} \le \sigma_{HP}$, для прямозубых передач принимает вид

$$F_{нba} = p \frac{\left(4 - \varepsilon_{\alpha a}\right)}{\left(4 - \varepsilon_{\alpha b}\right)} \frac{K_{нa}}{K_{нb}} \frac{\sigma_{HPb}{}^2}{\sigma_{HPa}{}^2}, \qquad (1)$$

где ε_α — коэффициент торцового перекрытия;

$K_н$ — коэффициент расчетной нагрузки, определяемой во внешнем и внутреннем зацеплении.

Поскольку, как правило, $p > 2$ и, обычно, $p \ge 3$ (особенно в определяющей ступени), из равенства (1) видим, что нагрузочная способность внутреннего зацепления существенно выше, чем внешнего зацепления, и значит, механические характеристики материала колеса с внутренними зубьями могут назначаться гораздо ниже, чем у колес внешнего зацепления. Учитывая очевидное неравенство $\varepsilon_{\alpha b} > \varepsilon_{\alpha a}$ и принимая $K_{нb} \approx K_{нa}$, можно с достаточной для практики точностью необходимую твердость колеса с внутренними зубьями рассчитать по формуле

$$\left(H_{НВ}\right)_b \ge \left[0{,}45\left(\sigma_{н\lim b}\right)_a / \sqrt{p}\right] - 35. \qquad (2)$$

По этой формуле на рис. 9 для цементированного и закаленного до расчетной поверхностной твердости 58 HRC и шлифованного внешнего зацепления построены графики, определяющие требуемую среднюю твердость колеса с внутренними зубьями. Видно, что в интервале конструктивного параметра $p \ge 3$ колесо с внутренними зубьями достаточно подвергнуть объемной закалке (улучшению) и только в довольно редком интервале конструктивного параметра $p < 2{,}25$ колесо с внутренними зубьями должно быть подвергнуто поверхностной закалке (например, азотированию).

Полученные результаты позволяют начинать проект с расчета внешнего зацепления, а оценку работоспособности внутреннего зацепления выполнять на стадии проверочного расчета изделия и дают обоснование использованию в технике планетарных передач, в которых поверхностному упрочнению до высокой твердости подвергаются только зубья колес внешнего зацепления,

а колеса с внутренними зубьями могут изготавливаться из термически улучшенной стали. Более того, такие передачи сохраняют за счет «мягкого» колеса удовлетворительную прирабатываемость и поэтому их можно изготавливать с более низкой точностью, а также применять в тех механизмах, где вследствие недостаточной жесткости деталей и других конструктивных особенностей высокая точность зацепления не может быть реализована.

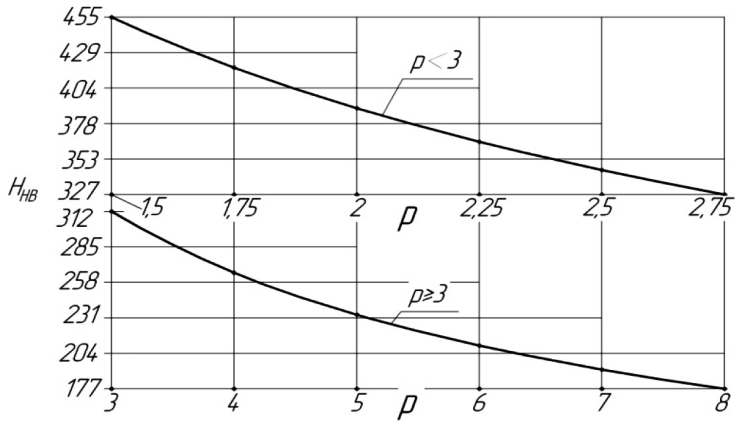


Рис. 9. График для определения твердости колеса с внутренними зубьями:
внешнее зацепление шлифованное и закаленное до расчетной поверхностной твердости 58 HRC

В планетарных редукторах, построенных на однорядной передаче типа *A*, предельное наибольшее значение конструктивного параметра ограничено условием соседства сателлитов, которое с учетом числа зубьев солнечного колеса z_a и заданного числа n_w сателлитов необходимо представить в виде

$$p_{\lim z} \le \frac{1+\sin(180/n_w)}{1-\sin(180/n_w)} - \frac{4}{z_a\left(1-\sin(180/n_w)\right)}. \qquad (3)$$

С целью получения простого конструктивного решения в выполненных конструкциях количество сателлитов обычно задают в крановых механизмах равное трем, которое, на основании выражения (3), ограничивает предельное наибольшее значение параметра по условию соседства неравенством $p \le 12$, при четырех сателлитах — неравенством $p \le 5{,}2$. В судовых газотурбинных установках число сателлитов доходит до восьми.

Исследования показали, что наименьший диаметральный габарит планетарного однорядного ряда имеет место в окрестности значения $p = 3$. Поэтому в тихоходной ступени, определяющей диаметральные размеры редуктора, значение конструктивного параметра p_T следует устанавливать, не строго придерживаясь данного значения. Поскольку диаметральный габарит других ступеней редуктора гораздо меньше, выбор значений их конструктивных параметров может быть подчинен особым требованиям компоновки планетарного редуктора (например, можно выдержать заданное отношение диаметров эпициклических колес ступеней редуктора и т. д.). Окончательные значения конструктивных параметров уточняются с учетом выбранных чисел зубьев при проработке конструкции редуктора.

Планетарный однорядный механизм является соосным механизмом, т. е. механизмом, в котором оси вращения основных звеньев совпадают. Другими словами, в соосном механизме зубчатые пары имеют одинаковые межосевые расстояния, определяемые следующим образом:

$$\left(a_w\right)_{ag} = \left(a_w\right)_{bg};\ \left(z_a + z_g\right)\cos\alpha_{twb} = \left(z_b - z_g\right)\cos\alpha_{twa}. \qquad (4)$$

Применительно к механизму *A* (см. рис. 8) с несмещенными зубчатыми колесами условие соосности принимает вид: $z_g^* = 0{,}5\left(z_b - z_a\right)$. Во многих работах это условие ошибочно преподносится как обязательное, его включают в так называемые *генеральные уравнения* и тем самым сужают возможности в отношении выбора передаточных отношений. В то же самое время, как это следу-

ет на основании выражения (3), разность $(z_b - z_a)$ может быть как четной, так и нечетной. В связи с этим количество зубьев сателлита может отличаться от $z_g^* = 0{,}5(z_b - z_a)$ на величину v:

$$z_g = z_g^* + v. \tag{5}$$

В выполненных конструкциях планетарных редукторов, в частности редукторов трансмиссий автомобилей, можно найти значение $v \le 1{,}5$. В работе [5] для увеличения количества возможных комбинаций числа зубьев, обеспечивающего заданное значение конструктивного параметра, рекомендуется принимать $v = \pm 0{,}5$.

Исследования геометрии планетарного ряда показали, что при проектировании рациональным решением следует считать такое, при котором соблюдаются следующие условия: назначение параметра $v \le 0$, причем желательно $v = -0{,}5$; выполнение внутреннего зацепления с углом $\alpha_{twb} = \alpha = 20°$; назначение коэффициента смещения у центрального солнечного колеса, обеспечивающего во внешней паре угол зацепления:

$$x_a = x_\Sigma = \left[\left(inv\,\alpha_{twa} - inv\,\alpha\right)\left(z_a + z_g\right)\right] \Big/ 2\mathrm{tg}\,\alpha\,. \tag{6}$$

Здесь $\alpha_{twa} = \arccos\left[(z_\Sigma / z_d)\cos\alpha_{twb}\right]$, где $z_\Sigma = z_a + z_g$; $z_d = z_b - z_g$, и, следовательно, на стадии проектирования должно выполняться условие: $x_g = x_b = 0$; рекомендацию $x_a = x_g = 0{,}5$ следует считать нерациональной, т. е. формирующей неудовлетворительные параметры внутреннего зацепления [11].

Механизм изменения вылета стрелы. Отметим основные особенности, на которые следует обратить внимание при проектировании реечного зацепления.

1. Влияние радиуса переходной поверхности на изгибную прочность зуба рейки. На величину максимальных напряжений изгиба в корне зуба рейки большое влияние оказывает радиус переходной поверхности в основании зуба. Исследованиями доказано определяющее влияние на величину напряжений изгиба геометрического соотношения $2\rho/s$, где ρ — радиус переходной поверхности в основании зуба; s — толщина зуба в опасном сечении. Коэффициент K_ρ, показывающий, во сколько раз снижается изгибная прочность зуба рейки с нестандартным радиусом ρ_{ff} скругления и толщиной S_{ff} по сравнению с зубом рейки, выполненным со стандартными значениями ρ_{fo} и S_{fo}, выражен известной формулой Linke:

$$K_\rho = \sqrt[3]{\left(S_{ff}\rho_{f_0}\right) / \left(S_{f_0}\rho_{ff}\right)}\,, \tag{7}$$

откуда видно, что если радиус ρ_{ff} стремится к нулю, то передаваемая нагрузка также устремляется к нулю. Расчеты показали, что при отклонении коэффициента радиуса переходной поверхности от значения $0{,}38m$ до значения $0{,}2m$ напряжения изгиба увеличиваются в 1,23 раза.

Данное решение подтверждено вычислением напряжений в корне зуба методом конечных элементов (рис. 10). Как видно из рисунка, отношение напряжений в узловой точке 717/614 = 1,17, которое даже при значении коэффициента радиуса скругления, равного 0,05, довольно хорошо согласуется с расчетами по формуле (7). На этом основании на ранней стадии проектирования влияние радиуса переходной поверхности зуба на прочность зуба рейки можно учитывать по формуле (7).

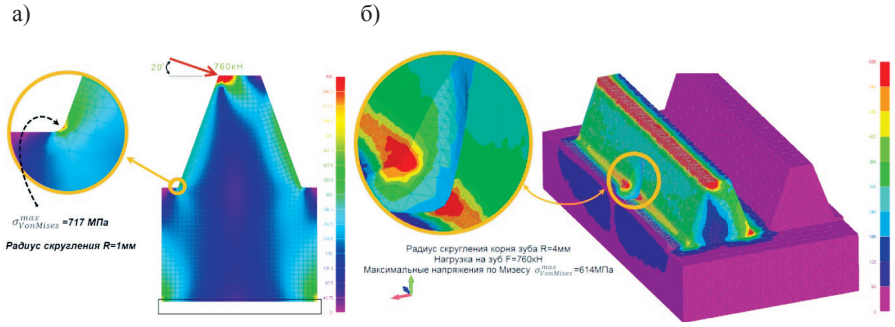


Рис. 10. Напряженно-деформированное состояние в зубьях рейки:
а — радиус скругления 1 мм; *б* — радиус скругления 4 мм

2. Геометрия открытой реечной зубчатой передачи. На рис. 11 показан общий случай геометрии реечного зацепления: поскольку рейка имеет прямолинейный профиль зубьев, угол зацепления $\alpha_{tw} = \alpha = 20°$, где α — угол профиля зуба, а делительный и начальный диаметр численно равны. Диаметр впадин шестерни зависит только от способа нарезания и при нарезании инструментом реечного типа определяется формулой

$$d_{f1} = d_1 - 2(h_a^* + c^* - x_1)\, m, \tag{8}$$

где $h_a^* = 1$, $c^* = 0{,}25$ — параметры исходного контура.

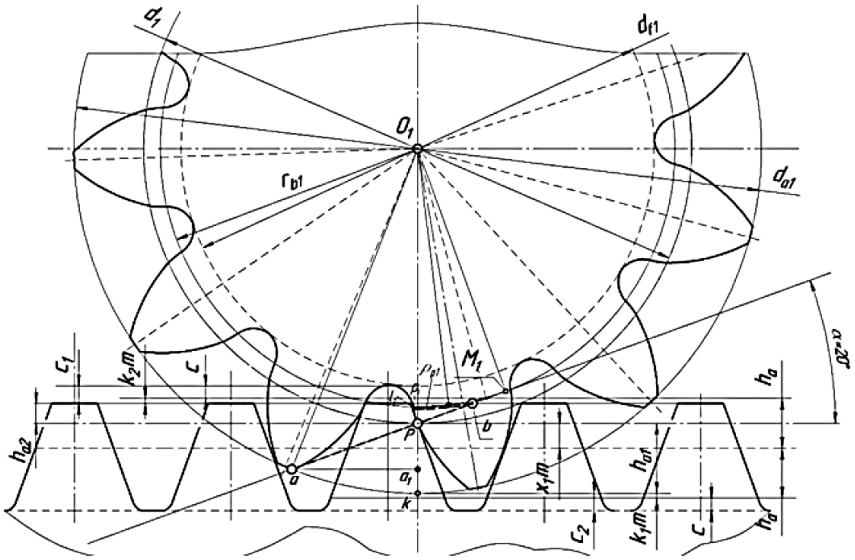


Рис. 11. Геометрия реечного зацепления механизма изменения вылета

Коэффициент смещения x_1 при полной высоте зуба предлагается выбирать с помощью графика на рис. 12 из условия $S_{a1} \geq 0{,}3$, обеспечивающего требуемую толщину зуба на окружности вершин шестерни. При этом учитывается условие неподрезания и коэффициент торцового перекрытия ε_α. Последний не требует проверки, поскольку лежит в области $\varepsilon_\alpha \geq 1{,}2$, рекомендуемой стандартом.

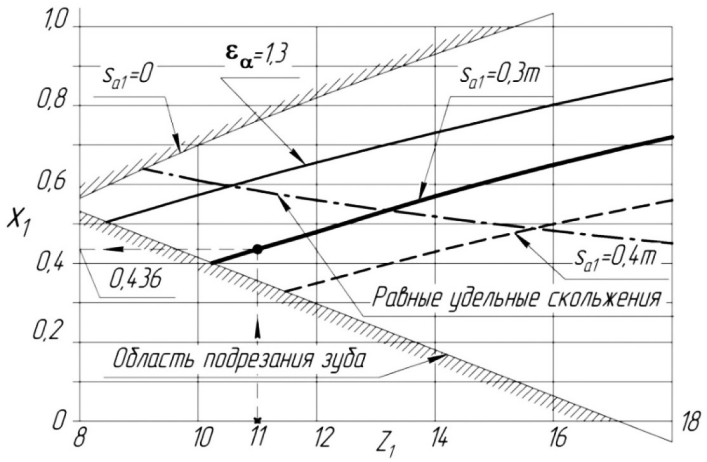


Рис. 12. Коэффициент смещения у шестерни при полной высоте зуба $k_1 = 0$

Из рис. 12 следует также, что рекомендация по выбору коэффициента смещения из условия получения равных удельных скольжений в области наиболее часто используемых чисел зубьев шестерни неприменима. Диаметр вершин шестерни определяется конструктором и может быть

найден по разным системам расчета, при этом, естественно, будут получаться различные значения диаметра вершин. Для расчета диаметра вершин рекомендуется система расчета, при которой сохраняется постоянная высота зуба полная либо уменьшенная по сравнению с полной стандартной высотой:

$$d_{a1} = d_1 + 2m(h_a^* + x_1 + k_1), \tag{9}$$

где $k_1 \le 0$ — коэффициент укорочения высоты зуба шестерни, назначаемый разработчиком (обычно $k_1 = 0 \ldots -0{,}2$).

В случае назначения коэффициента укорочения коэффициент торцового перекрытия необходимо проверить расчетом по следующей формуле:

$$\varepsilon_\alpha = \left[\frac{\sqrt{\left(0{,}5 z_1 \sin^2 \alpha + \left(z_1 + h_{a1}^*\right) h_{a1}^*\right)}}{\cos \alpha} - \frac{z_1 \operatorname{tg} \alpha}{2} + \frac{2h_{a2}^*}{\sin 2\alpha} \right] \frac{1}{\pi} \ge 1{,}2 . \tag{10}$$

где $h_{a1}^* = 1 + x_1 + k_1$, $h_{a2}^* = 1 - x_1 + k_2$ — коэффициенты высоты начальной (делительной) головки зуба, соответственно, шестерни и рейки.

Механизм поворота. В крановых механизмах, как правило, механизм поворота проектируется на опорно-поворотном круге с трехрядным подшипником. Создать правильное зацепление при известных параметрах колеса можно только выбором параметров шестерни, количество зубьев которой устанавливают обычно в пределах $z_1 = 10 \ldots 18$, учитывая требуемое передаточное отношение и обеспечение технологичной конструкции вала. Диаметры впадин и вершин шестерни определяются по формулам, соответственно, (8) и (9). При назначении коэффициента смещения следует использовать рис. 12 с дополнительной проверкой по общепринятым формулам на стадии проверочных расчетов коэффициента торцового перекрытия и условий интерференции.

Диаметр вершин колеса ОПК задан. В случае необходимости его проверяют по формуле, записанной с учетом знаков при коэффициентах x_2 и k_2, принятых фирмой-изготовителем ОПК:

$$d_{a2} = d_2 \pm 2(h_a^* + x_2 + k_2)m,$$

где верхние знаки для колеса с внешним зацеплением: для внешнего зацепления $x_2 > 0$, $k_2 < 0$; для колеса с внутренним зацеплением $x_2 < 0$, $k_2 = 0$.

В ГОСТе 19274–73 коэффициенту смещения колеса присвоено положительное значение и, следовательно, расчетная формула для внутреннего зацепления будет иметь иной вид: $d_{a2} = d_2 - 2(h_a^* - x_2 + k_2)m$. График может быть использован при проектировании открытой передачи румпельного механизма — главной винторулевой [13].

Законы распределения эксплуатационных нагрузок. Силовой процесс, протекающий в различных элементах несущих конструкций и деталях механизмов кранов во время их эксплуатации, представляет собой реакцию на случайное воздействие поднимаемого груза, собственного веса конструкции, нагрузки, возникающей вследствие отклонения канатов от вертикали, влияние ветровых нагрузок и динамических, связанных с пусками и остановками, рабочих механизмов. В результате многочисленных натурных испытаний в речных и морских портах на кранах, работающих в естественных условиях по вариантам: *судно–склад* и *судно–вагон*, были получены и обобщены в относительной системе координат характеристики эксплуатационных нагрузок для проведения расчетов элементов на прочность и выносливость [14], [15]. Было установлено, что распределение эксплуатационной нагрузки достаточно точно описывается следующими законами распределения приведенных к симметричным циклам нагрузок: для крюкового и грейферного механизмов подъема — усеченный нормальный, для механизмов изменения вылета стрелы и механизма поворота — полунормальный.

В результате обработки осциллограмм (при испытаниях проводилась непрерывная запись нагрузок) по времени и множеству были получены статистические характеристики нагрузок: математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение. В частности, нагрузки механизма

вращения хорошо описываются нормальным законом с относительной величиной разброса среднеквадратического отклонения $x_\sigma = 0{,}3$, математическим ожиданием $\langle x \rangle = 0$. Относительная величина среднеквадратического отклонения определяется зависимостью $x_\sigma = \delta_s / S_p$, где $S_p = 2(S_т + S_с) \times$ $\times \delta J_{ПЧ} / (J_{ПЧ} + J_м) - S_с$ — максимальная расчетная нагрузка; δ_s — среднеквадратическое отклонение нагрузки; $S_т$ — усилие, вызванное тормозным моментом; $S_с$ — усилие, вызванное моментом статических сопротивлений; δ — коэффициент затухания упругих колебаний; $J_м$ — момент инерции двигателя; $J_{ПЧ}$ — момент инерции поворотной части.

Для вновь проектируемых кранов законы распределения перестроены в относительной системе координат $f(x) - x$, где $f(x)$ — плотность распределения относительной случайной величины $x = S / S_р$; S — случайное значение нагрузки; $S_р$ — расчетная (нормативная) нагрузка, зависящая от параметров проектируемого крана.

Значения относительных математических ожиданий и среднеквадратических отклонений: $\langle x_\sigma \rangle = \langle S_\sigma \rangle / S_р$; $x_\sigma = \sigma_\sigma / S_р$ текущих значений ординат процессов нагружения, используемых для расчета валов на изгиб, зубчатых передач и подшипников, а также характеристик процессов нагружения, систематизированных по экстремумам $\langle x_\tau \rangle = \langle S_\tau \rangle / S_р$; $x_\tau = \sigma_\tau / S_р$, приведены в следующей таблице:

Механизмы	Текущие значения ординат			Систематизация по экстремумам		
	$\langle x_\sigma \rangle$	x_δ	c	$\langle x_\tau \rangle$	x_τ	c
Крюковой подъем	0,50	0,20	1,55	0,25	0,14	1,5
Грейферный подъем	–	0,4	–	0,21	0,1	1,05
Поворота	–	0,3	–	–	0,24	–
Изменения вылета	–	0,2	–	–	0,15	–

Примечание: c — коэффициент усеченности нормального закона.

Выводы (Summaru)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Из всего многообразия конструкций планетарных передач отмечено, что при создании рациональной конструкции приводов судовых и крановых механизмов используются исключительно планетарные однорядные механизмы *2k-h* типа *A*. Подобные механизмы наиболее выгодны с точки зрения передаточного числа, простоты в конструктивно-технологическом плане. Зацепление эвольвентное, закаленное, шлифованное. На этом основании они способны передавать любые окружные скорости, вращающие моменты и мощности. Планетарные передачи типа 3*k* применению не подлежат.

2. Обоснована целесообразность создания планетарных передач, в которых поверхностному упрочнению до высокой твердости подвергаются только зубья колес внешнего зацепления, а колесо с внутренними зубьями при значении конструктивного параметра $p > 2{,}25$ может изготавливаться из термически улучшенной стали. Такая конструкция позволяет за счет «мягкого» колеса сохранить удовлетворительную прирабатываемость и поэтому ее можно изготавливать с более низкой точностью, а также применять в тех механизмах, где вследствие недостаточной жесткости деталей и других конструктивных особенностей высокая точность зацепления не может быть реализована. В таких передачах имеется возможность, не прибегая к помощи автоматизированных систем, ускорить этап раннего проектирования, выполняя оценку работоспособности внутреннего зацепления изделия на стадии проверочного расчета.

3. На основании изучения напряженно-деформированного состояния зуба рейки с использованием компьютерных технологий показана возможность использования для оценки влияния радиуса переходной поверхности зуба рейки на ее изгибную прочность формулы *Linke*. Для расчета геометрии реечных механизмов и механизмов вращения на опорно-поворотных кругах компаний *Rote-Erde*, *IMO*, *PSL*, изготовителем которых определена модульная система исходного кон-

тура с параметрами, отвечающими отечественным стандартам, рекомендована система расчета, при которой сохраняется постоянная высота зуба, полная либо уменьшенная по сравнению с полной стандартной высотой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кулешов А. А.* Пневмоколесные машины с бортовыми приводами и мотор-колесами / А. А. Кулешов, И. И. Марголин. — М.: Машиностроение, 1995. — 312 с.

2. *Кирдяшев Ю. Н.* Проектирование сложных зубчатых механизмов / Ю. Н. Кирдяшев, А. Н. Иванов. — Л.: Машиностроение, 1973. — 352 с.

3. *Пыж О. А.* Редукторы судовых турбоагрегатов / О. А. Пыж, Л. М. Гаркави, Ю. А. Державец, Р. Р. Гальпер. — Л.: Судостроение, 1975. —272 с.

4. *Кудрявцев В. Н.* Планетарные передачи: справ. / В. Н. Кудрявцев [и др.]. — Л.: Машиностроение, 1977. — 536 с.

5. *Зыков А. А.* Основы теории графов / А. А. Зыков. — М.: Наука, 1987. — 384 с.

6. *Барышников С. О.* Обзор методов представления структуры зубчатых механизмов / С. О. Барышников, А. Н. Иванов // Морской вестник. — 2011. — № 2. — С. 108–110.

7. *Андрианов Е. Н.* Методика проектирования схем специальных встроенных планетарных редукторов судовых и крановых канатных лебедок / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов, Е. В. Матвеева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 50–61. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-50-61.

8. *Кудрявцев В. Н.* Расчет и проектирование зубчатых редукторов / В. Н. Кудрявцев, И. С. Кузьмин, А. Л. Филиппенков. — СПб.: Политехника, 1993. — 448 с.

9. *Филипенков А. Л.* Планетарные редукторы, встраиваемые в барабаны грузовых лебедок судовых кранов / А. Л. Филипенков, А. К. Пшизов // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. — 2017. — Т. 20. — № 2. — С. 90–93. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-90-93.

10. *Пшизов А. К.* К теории проектирования и расчета конструкции судовой лебедки со встроенным планетарным редуктором / А. К. Пшизов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 39–49. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-39-49.

11. *Иванов А. Н.* Перспективы развития грузоподъемных машин / А. Н. Иванов, С. Н. Федотов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2009. — № 3. — С. 22–32.

12. *Бабичев Д. Т.* Обзор работ русской школы по теории геометрии зацеплений / Д. Т. Бабичев, С. А. Лагутин, Н. А. Бармина // Теория механизмов и машин. — 2017. — Т. 15. — № 3 (35). — С. 86–130. DOI: 10.5862/TMM.35.1.

13. *Иванченко А. А.* Обзор опыта совершенствования конструкции и применения движительных систем в современном судостроении / А. А. Иванченко, В. А. Шишкин, В. Н. Окунев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 156–176. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-156-176

14. *Андрианов Е. Н.* Определение эквивалентных нагрузок и надежности элементов портальных кранов / Е. Н. Андрианов, В. И. Брауде // Тр. ЛИВТа. — 1984. — № 60. — С. 30–33.

15. *Андрианов Е. Н.* Особенности проектирования и расчета механизмов вращения портальных кранов / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 46–56.

REFERENCES

1. Kuleshov, A. A., and I. I. Margolin. *Pnevmokolesnye mashiny s bortovymi privodami i motor-kolesami*. M.: Mashinostroenie, 1995.

2. Kirdyashev, Yu. N., and A. N. Ivanov. *Proektirovanie slozhnykh zubchatykh mekhanizmov*. L.: Mashinostroenie, 1973.

3. Pyzh, O. A., L. M. Garkavi, Yu. A. Derzhavets, and R. R. Gal'per. *Reduktory sudovykh turboagregatov*. L.: Sudostroenie, 1975

4. Kudryavtsev, V. N., Yu.N. Kirdyashev, Yu. A. Derzhavets, et al. *Planetarnye peredachi: spravochnik*. L.: Mashinostroenie, 1977.

5. Zykov, A. A. *Osnovy teorii grafov*. M.: Nauka, 1987.

6. Baryshnikov, S. O., and A. N. Ivanov. "Obzor metodov predstavleniya struktury zubchatykh mekhanizmov." *Morskoi vestnik* 2(2011): 108–110.

7. Andrianov, Evgenii N., Anatoly N. Ivanov, and Elena V. Matveeva. "Methods of design of special integrated planetary gear units of marine and crane drives." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 50–61. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-50-61.

8. Kudryavtsev, V. N., I. S. Kuz'min, and A.L. Filippenkov. *Raschet i proektirovanie zubchatykh reduktorov*. SPb.: Politekhnika, 1993.

9. Filipenkov, A. L., and A. K. Pshizov. "Integrated Planetary Gearboxes for Hoisting Winches in Shipboard Cranes." *Bulletin of Kalashnikov ISTU* 20.2 (2017): 90–93. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-90-93.

10. Pshizov, Aydamir K. "For the theory of designing and calculation construction of shipboard hoisting winches with integrated planetary gearbox." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 39–49. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-39-49.

11. Ivanov, A. N., and C.N. Fedotov. "Perspectives of development of load-lifting machines." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2009): 22–32.

12. Babichev, D. T., S. A. Lagutin, and N. A. Barmina. "Russian school in the theory and geometry of gearing." *Theory of mechanisms and machines* 15.3(35) (2017): 86–130. DOI: 10.5862/TMM.35.1

13. Ivanchenko, A. A., V. A. Shishkin, and V.N. Okunev. "Review of experience improvement designs and propulsion systems in modern shipbuilding." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 156–176. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-156-176.

14. Andrianov, E. N., and V. I. Braude. "Opredelenie ekvivalentnykh nagruzok i nadezhnosti elementov portal'nykh kranov." *Tr. LIVTa* 60 (1984): 30–33.

15. Andrianov, E. N., and A. N. Ivanov. "Features of designing and calculation of mechanisms of rotation of portal cranes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 46–56.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Андрианов Евгений Николаевич — кандидат технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *fkt_pt@gumrf.ru* **Иванов Анатолий Николаевич** — кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *fkt_pt@gumrf.ru*	**Andrianov, Evgenii N.** — PhD, professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation e-mail: *fkt_pt@gumrf.ru* **Ivanov, Anatoly N.** — PhD, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *fkt_pt@gumrf.ru*

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-113-120

THE WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL TRANSSHIPPING EQUIPMENT MAINTENANCE

Y. E. Ezhov, A. K. Bardin, V. A. Sidorenko

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

It is noted that on the background of rapidly developing technologies and economic-industrial relations, the service of maintenance and repair of industrial equipment is undergoing a significant transformation. It is emphasized that the effective performance of industrial equipment is largely determined by the perfection of the methods of maintenance and repair. Equipment maintenance costs account for up to 60% of total operating costs. Therefore, improving the maintenance system to reduce costs is the most important reserve of efficiency. Currently, there are active searches for ways to improve the quality and efficiency of equipment maintenance and repair. The strategies for the maintenance and repair of industrial equipment have reviewed and analyzed in the paper, a strategy is proposed and a way to improve the efficiency of maintenance and repair of rotary equipment by using technologies to monitor the actual condition of the equipment is described. The use of the actual state monitoring system is based on the fact that the interrelation between the technical malfunctions of the equipment and the diagnosable parameters (vibration, temperature, rotation frequency, etc.) has been revealed. With regard to expensive transshipping machines with unique equipment, a stationary system for the actual state monitoring is proposed to use. It is noted that the actual state monitoring system contributes to identify the majority of recognizable defects that can occur in the equipment by fixing the diagnostic signs and parameters, warning that the defects are present, developing and can lead to the equipment failure. The compiled and processed results of equipment monitoring are provided in a convenient form to the computer of employee responsible for the technical condition of the equipment. Based on the obtained results, the conclusion on advisable use of stationary systems for the monitoring of the equipment actual condition is made.

Keywords: maintenance, repair, efficiency, monitoring system, actual condition, rotary equipment, sensor, parameter.

For citation:
Ezhov, Yurii 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.

УДК 62–91

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПЕРЕГРУЗОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ю. Е. Ежов, А. К. Бардин, В. А. Сидоренко

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

Отмечается, что на фоне быстро развивающихся технологий и экономико-промышленных отношений, сервис технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования претерпевает значительную трансформацию. Подчеркивается, что эффективная работоспособность промышленного оборудования во многом определяется совершенствованием методов технического обслуживания и ремонта. Затраты на техническое обслуживание оборудования составляют до 60 % от общих эксплуатационных затрат. Поэтому совершенствование системы технического обслуживания с целью снижения затрат является важнейшим резервом эффективности. В настоящее время ведутся активные поиски путей повышения качества и эффективности технического обслуживания и ремонта оборудования. В статье выполнены обзор и анализ стратегий технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования, предложена стратегия и описан путь повышения эффективности технического обслуживания и ремонта

оборудования роторного типа путем использования технологий мониторинга фактического состояния оборудования. Использование системы мониторинга фактического состояния основано на том, что выявлена взаимосвязь между техническими неисправностями оборудования и диагностируемыми параметрами (вибрация, температура, частота вращения, и т.д.). Применительно к дорогостоящим перегрузочным машинам с уникальным оборудованием предлагается применение стационарной системы мониторинга фактического состояния. Отмечается, что система мониторинга фактического состояния помогает выявлять большинство распознаваемых дефектов, которые могут возникать в оборудовании, путем фиксирования диагностических признаков и параметров, предупреждая о том, что дефекты присутствуют, развиваются и могут привести к отказу оборудования. Скомпилированные и обработанные результаты мониторинга оборудования предоставляются в удобной форме на компьютер ответственного за техническое состояние оборудования сотрудника. На основе полученных результатов сделан вывод о целесообразности использования стационарных систем мониторинга фактического состояния оборудования.

Ключевые слова: техническое обслуживание, ремонт, эффективность, система мониторинга, фактическое состояние, роторное оборудование, датчик, параметр.

Для цитирования:
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.

Введение (Introduction)

What gets measured gets improved
(*Что измеряется, улучшается*).
П. Друкер

В современном мире новые технологии меняют жизнь людей и экономико-промышленные отношения. В последнее время все большую силу набирает так называемая «Индустрия 4.0». Данная концепция направлена на повышение эффективности использования производственных мощностей. Концепция «Индустрия 3.0», как правило, требовала автоматизации отдельных машин и процессов, в то время как концепция «Индустрия 4.0» предлагает использование технологии *IoT* (англ. *Internet of Things)* для всех физических активов. Внедрение концепции «Индустрия 4.0» возможно при наличии хорошо налаженных процессов получения и анализа данных, а также обмена между ними. Реализация этой концепции демонстрирует доходы от цифровых решений и экономию операционных затрат.

Эффективная работоспособность промышленного оборудования во многом определяется совершенством методов технического обслуживания и ремонта (ТО и Р). При этом затраты на техническое обслуживание оборудования составляют до 60 % от общих эксплуатационных затрат. Поэтому совершенствование системы технического обслуживания с целью снижения затрат является важнейшим резервом [1]–[3].

Эффективность ТО и Р определяется отношением максимально возможного его результата (высокое качество работ при соблюдении нормативного срока ремонта) к минимально возможным эксплуатационным расходам (минимально обоснованный уровень затрат без потери качества и объема выполненных работ). Для достижения данной цели следует выбрать методы, исходя из имеющегося опыта [2], [4].

В настоящее время большинство владельцев оборудования придерживаются традиционных, или дискретных, плановых ТО и Р по машино-часам или интервалам времени, которые не гарантируют безаварийную работу оборудования [2], [4], [5]. При этом даже увеличение объема и стоимости ТО и Р не гарантирует достаточности выполненных работ, что приводит к увеличению затрат на простои и аварийные ремонты оборудования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Обзор стратегий ТО и Р. Условно можно выделить три направления развития стратегий ТО и Р.

Первое направление — I стратегия — предполагает эксплуатацию оборудования до отказа. По факту такая стратегия используется, но этот вид ТО снижает рабочий ресурс оборудования, безопасность эксплуатации и противоречит действующему законодательству РФ.

Второе направление — II стратегия — основана на широко распространенной и отлаженной системе планово-предупредительных работ (ППР);

Третье направление — III стратегия — основана на предупреждении отказа оборудования за счет применения диагностики и мониторинга технического состояния и прогнозирования отказов. Данная стратегия не противоречит классическому подходу ППР, а наоборот, делает их более эффективными за счет более точного прогнозирования технического состояния отдельных узлов и механизмов, а также анализа последствий возможных отказов конкретного оборудования.

Каждая из указанных стратегий имеет свои аргументы «за» и «против» использования. У предприятий, планирующих устойчивое долгосрочное развитие, наблюдается постоянное стремление к объединению достоинств основных стратегий ТО и Р путем использования совмещенного ТО, направленного как на снижение общего объема ТО, так и на максимизацию срока службы оборудования [4]–[6].

Стратегия использования данных о фактическом состоянии оборудования. Данная стратегия базируется на проведении постоянного мониторинга и анализа оборудования специально обученным высококвалифицированным персоналом. Часть информации об оборудовании специалист может получать в результате «оцифровки» существующего старого оборудования путем установки соответствующих датчиков (вибродатчик, датчик соосности, состояния масла и т. д.) или использования информации с «цифровых носителей» в случае эксплуатации нового оборудования (например, с частотных преобразователей, ПЛК и т. д.) [7]. На рис. 1 показана разница стоимости обслуживания оборудования в зависимости от выбранных стратегий с учетом затрат от простоев оборудования.

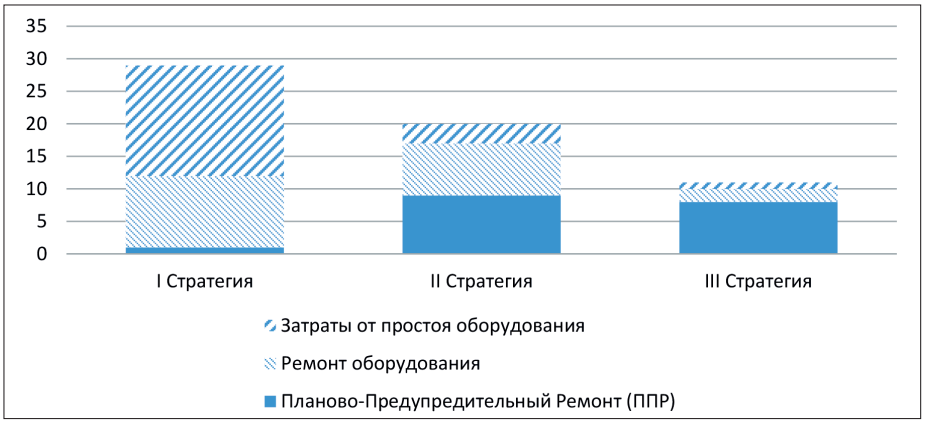


Рис. 1. Статистическая стоимость обслуживания оборудования при разных стратегиях ТО и Р

Стратегия мониторинга фактического состояния оборудования. В перегрузочной технике наиболее распространено оборудование роторного типа. Применительно к дорогостоящим перегрузочным машинам с уникальным оборудованием, с нашей точки зрения, наиболее целесообразно применить стационарную систему мониторинга фактического состояния (МФС). Использование системы МФС основано на том, что выявлена взаимосвязь между техническими неисправностями оборудования и диагностируемыми параметрами. Система МФС помогает выявлять большинство распознаваемых дефектов, которые могут возникать в оборудовании, путем фиксирования диагностических признаков и параметров, сигнализируя о том, что дефекты присутствуют, развиваются и могут привести к отказу оборудования [4]–[6]. Мониторинг состояния механизмов оборудования целесообразно проводить по следующим параметрам: вибрация, температура, частота вращения, момент. Для измерения параметров должны использоваться соответствующие стационарные датчики и модули. Замеры параметров предлагается выполнять автоматически с фиксированным интервалом времени, например, 0,5–1 ч.

Датчики устанавливаются на контролируемые объекты оборудования. Монтаж датчиков производится болтовым или шпилечным соединениями. Датчики соединяются с «переходными» блоками, которые, в свою очередь, обеспечивают ремонтопригодность оборудования.

Датчики соединяются с «Блоком управления» (БУ) — рис. 2, который производит первичную обработку сигналов. Далее по каналу связи выполняется передача результатов диагностирования и первичного анализа на «Сервер» владельца оборудования. «Сервер» выполняет функции хранения данных мониторинга и конечного анализа полученных результатов. Вывод скомпилированной информации производится в удобной форме (например, на монитор ответственного лица за техническое состояние оборудования эксплуатирующей организации).

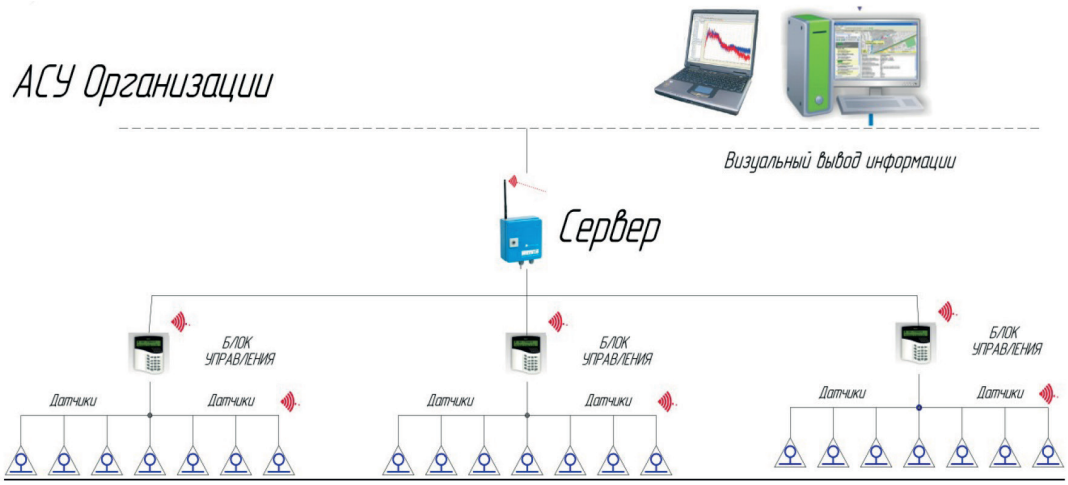


Рис. 2. Схема мониторинга фактического состояния оборудования

На практике исходными данными для проведения анализа является история измерения параметров во времени, которая представлена в цифровом и визуальном виде в работах [6], [7]. Визуализацию результатов анализа необходимо разделить на четыре зоны тремя условными линиями: оповещения, предупреждения и сигнализации (рис. 3). Применение средств визуализации позволяет добиться значительного повышения эффективности и необходимого качества использования системы МФС, максимальной производительности труда сотрудников, обслуживающих систему МФС и оптимизации трудозатрат на поддержание оборудования в работоспособном состоянии.

Среди особенностей, предлагаемых МФС, необходимо выделить следующие:

– возможность запоминания и обработки (Big Data), в том числе измеряемых параметров, без искажений и потерь информации;

– многоканальность с возможностью синхронной записи и анализа сигналов измерительных систем различных измеряемых физических процессов;

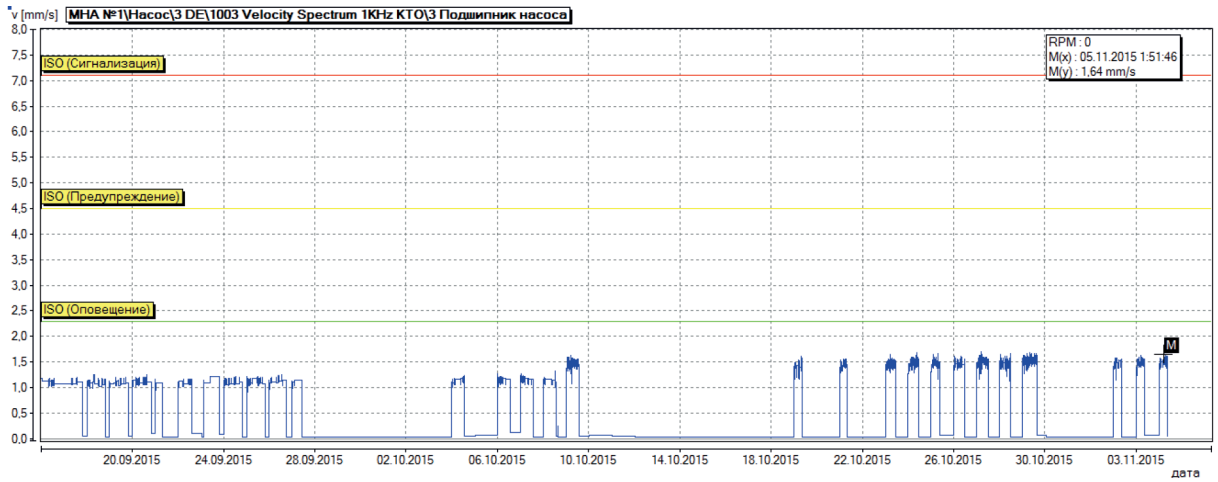
– возможность анализа сигналов и вывод информации в удобной форме.

Зона D (выше красной линии) — уровни значений замеряемых параметров, которые в этой зоне могут вызвать серьезные повреждения машины.
Красная линия
Зона C (между красной и желтой линиями) — в эту зону попадают замеры машин, непригодных для длительной непрерывной эксплуатации (такие машины могут функционировать ограниченный период времени до начала ремонтных работ).
Желтая линия
Зона B (между желтой и зеленой линиями) — в эту зону попадают замеры машин, пригодных для эксплуатации без ограничения сроков.
Зеленая линия
Зона A (ниже зеленой линии) — в эту зону попадают замеры новых машин.

Рис. 3. Зоны визуализации результатов анализа

Пример визуализации системы контроля оборудования по фактическому состоянию. Как видно, уровни вибрации на подшипниках электропривода механизмов подъема перегрузочного крана [1] находятся в зонах *A* и *B* (см. рис. 3 и 4), что характерно для новых машин и машин, пригодных для эксплуатации без ограничения сроков.

а)



б)

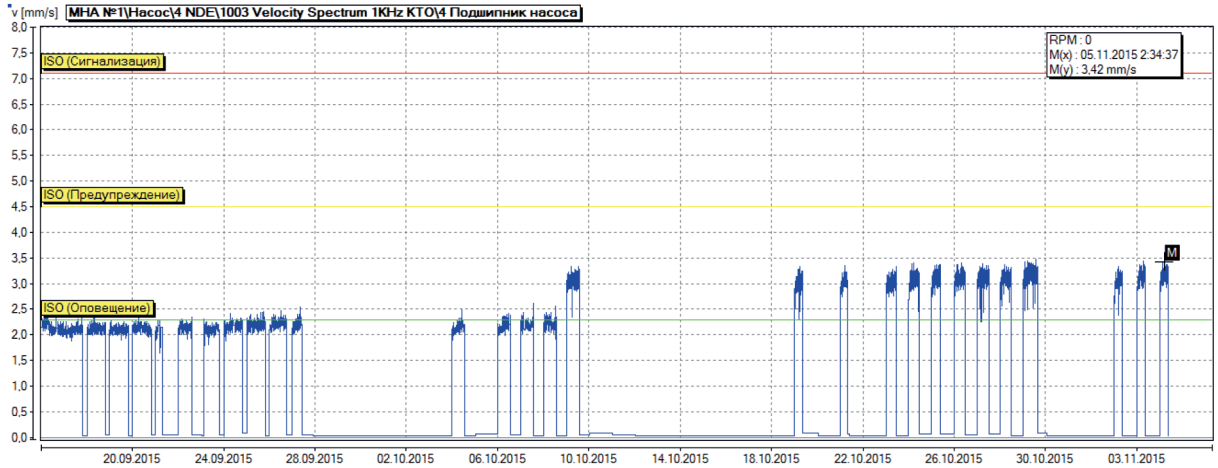


Рис. 4. Пример вывода информации датчиков измерения виброскорости, установленных на подшипниках электропривода механизмов подъема перегрузочного крана:
а — зеленый уровень (уровень А) — дефекта нет;
б — желтый уровень — признаки зарождения дефекта

На рис. 5 показаны спектры виброскорости при наличии повышенной вибрации на элементах механизмов, анализ которых позволяет определить причину роста вибрации — дефект, и степень его развития. На графике спектра виброскорости преобладает составляющая на оборотной частоте 50 Гц, что, вероятнее всего, вызвано дисбалансом ротора двигателя.

Диагностика механизмов роторного типа основана на том факте, что каждому дефекту свойственны свои диагностические признаки. Дефекты механизмов наблюдаются в распределении мощности сигнала, в форме временной реализации, в спектральной картине автоспектров, в распределении различных дополнительных параметров вибрации [8]–[10]. Большая часть дефектов роторных механизмов проявляет себя в спектрах гармониками «пиками» или «всплесками». Некоторые виды дефектов проявляются в виде изменения общего фона в высокочастотных диапазонах (дефекты смазок в узлах, кавитация, резонансы и т. д.).

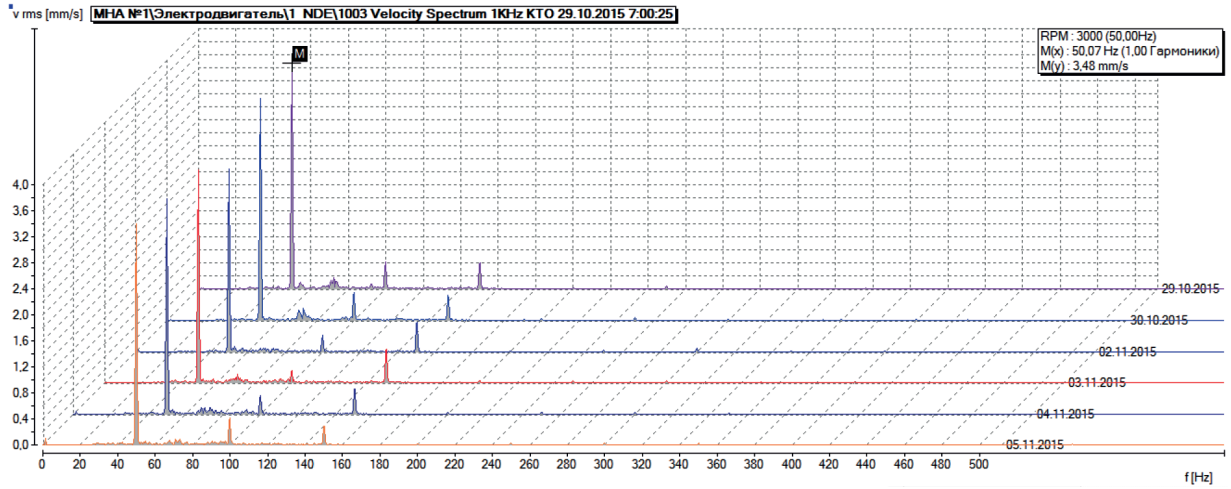


Рис. 5. Спектры виброскорости в «Подшипник ЭД»

Для материалов с высокой степенью поглощения, когда деформация практически полностью переходит в тепло, характерным является изменение общей тепловой картины в местах начала образования усталостных трещин [9], [10]. Таким образом, использование систем МФС может обеспечивать контроль за состоянием механизмов без остановки машин в режиме реального времени и позволяет осуществлять плановое ТО по техническому состоянию. В случае удаленного расположения оборудования можно передавать данные с помощью удаленного мониторинга функционального состояния (УМФС) — удаленного доступа. Благодаря оптимальному соотношению между традиционными способами и методами ФМС и УФМС можно добиться оптимизации прогнозов состояния роторного оборудования.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение УФМС систем помогает более точно планировать необходимые ресурсы (запчасти, инструмент, технику, специалисты и т. д.) для проведения работ во время плановой остановки оборудования в отличие от проведения стандартного ППР, при котором необходимость ремонтов может обнаружиться в процессе выполнения работ. При этом будет увеличен срок ремонта оборудования или ремонт будет перенесен на другое время с уменьшением надежности работы оборудования.

2. Внедрение систем мониторинга фактического состояния требует новых компетенций от персонала. На конференции «Профессии будущего в IT и IoT», состоявшейся 16 февраля 2017 г. в г. Санкт-Петербурге в Конгресс-центре ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ», в качестве профессий «будущего» были выделены в том числе следующие: специалист автоматизированной промышленной диагностики, прогнозист отказа оборудования, команда «Ремонтник 2.0» [9], [11]. На технологичных предприятиях уже началась самостоятельная подготовка «специалистов по качеству», которые должны заниматься планированием ТО и Р в зависимости от фактического состояния оборудования на основе «больших баз данных». Это направление, по нашему мнению, следует развивать и техническим вузам, разрабатывая курсы и открывая новые специальности.

3. Внедрение УФМС позволяет концентрировать внимание на определенных «критических» элементах оборудования роторных механизмов, что дает возможность существенно сократить число элементов, *требующих постоянного контроля*. Опыт показывает, что возникновение ущерба связано в основном с конструктивными недостатками, неправильной эксплуатацией или с комбинацией этих факторов. Производственные ошибки в основном отсутствуют, так как они в подавляющем большинстве случаев проявляются в начале эксплуатации. Применение методов УФМС

показывает необходимость использования системного подхода к анализу различных параметров с прогнозированием возможной погрешности их измерений или определением диапазона разброса значений их характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sada Shiva Bayya.* Vibration Monitoring Mathematical Modelling and analysis of Rotating Ma-chinery / Sada Shiva Bayya, I. S. Rajay Vedaraj S., K. Sivasubramanian // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. — 2013. — Vol. 2. — Pp. 1325–1329.

2. АО «СИ-ЭЛ» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://si-el.ru/ (дата обращения: 10.11.2018).

3. *Uhlemann T. H. J.* The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0 / T. H. J. Uhlemann, C. Lehmann, R. Steinhilper // Procedia Cirp. — 2017. — Vol. 61. — Pp. 335–340. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.

4. *Русов В. А.* Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Русов. — Пермь: Изд-во «Вибро-Центр», 2012. — 252 с.

5.*Минаев В. И.* Цена ремонта / В. И. Минаев // Вестник АТОМПРОМа. — 2009. — № 5. — С. 40–45.

6. *Соколова А. Г.* Метод локализации источников повышенной виброреактивности машинного оборудования по данным дискриминантного анализа в задачах вибромониторинга и диагностики неисправностей / А. Г. Соколова // Вестник научно-технического развития. — 2010. — № 1 (29). — С. 26–42.

7. *Rabah S.* Towards improving the future of manufacturing through digital twin and augmented re-ality technologies / S. Rabah, A. Assila, E. Khouri, F. Maier, F. Ababsa, P. Maier, F. Mérienne // Procedia Manufacturing. — 2018. — Vol. 17. — Pp. 460–467. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.070.

8. *Pan H.* Symplectic geometry mode decomposition and its application to rotating machinery com-pound fault diagnosis / H. Pan, Y. Yang, X. Li, J. Zheng, J. Cheng // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2019. — Vol. 114. — Pp. 189–211. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.05.019.

9. *Lee J.* Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, meth-odology and applications / J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari, L. Liao, D. Siegel // Mechanical systems and signal processing. — 2014. — Vol. 42. — Is. 1–2. — Pp. 314–334. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004.

10. *Захаров С. И.* Формирование акустических сигналов машин для цифровой обработки результатов испытаний и диагностики / С. И. Захаров // Вестник машиностроения. — 2009. — № 12. — С. 88–90.

11. Проектная сессия FUTURESKILLS: новые кадры для IT и IOT [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://worldskills.ru/nashi-proektyi/futureskills.html (дата обращения: 30.09.2018).

REFERENCES

1. Lee, Jay, Fangji Wu, Wenyu Zhao, Masoud Ghaffari, Linxia Liao, and David Siegel. “Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications.” *Mechanical systems and signal processing* 42.1–2 (2014): 314–334. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004.

2. AO «SI-EL». Web. 10 Nov. 2018 <http://si-el.ru/>.

3. Uhlemann, Thomas H-J., Christian Lehmann, and Rolf Steinhilper. “The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0.” *Procedia Cirp* 61 (2017): 335–340. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.

4. Rusov, V. A. “*Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam*.” Perm:Izd-vo Vibro-Tsentr, 2012.

5. Minaev, V. I. “Tsena remonta.” *Vestnik ATOMPROMa* 5 (2009): 40–45.

6. Sokolova, A. G. “Metod lokalizatsii istochnikov povyshennoi vibroreaktivnosti ma-shinnogo oborudovaniya po dannym diskriminantnogo analiza v zadachakh vibromonitoringa i diagnostiki neispravnostei.” *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* 1(29) (2010): 26–42.

7. Rabah, Souad, Ahlem Assila, Elio Khouri, Florian Maier, Fakreddine Ababsa, Valérybourny, Paul Maier, and Frédéric Mérienne. “Towards improving the future of manufacturing through digital twin and augmented reality technologies.” *Procedia Manufacturing* 17 (2018): 460–467. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.070.

8. Pan, Haiyang, Yu Yang, Xin Li, Jinde Zheng, and Junsheng Cheng. “Symplectic geometry mode decomposition and its application to rotating machinery compound fault diagnosis.” *Mechanical Systems and Signal Processing* 114 (2019): 189–211. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.05.019.

9.Lee, Jay, Fangji Wu, Wenyu Zhao, Masoud Ghaffari, Linxia Liao, and David Siegel. "Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications." *Mechanical systems and signal processing* 42.1–2 (2014): 314–334. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004.

10. Zakharov, S. I. "Formirovanie akusticheskikh signalov mashin dlya tsifrovoi obrabotki rezul'tatov ispytanii i diagnostiki." *Vestnik mashinostroeniya* 12 (2009): 88–90.

11. Project Session FUTURESKILLS: new frames for IT and IOT. Web. 30 Sept. 2018 <https://worldskills.ru/nashi-proektyi/futureskills.html>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ежов Юрий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *ezhovye@gumrf.ru*

Бардин Алексей Константинович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *akbardin@mail.ru*

Сидоренко Владимир Александрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *vsidd@mail.ru*, *kaf_texp@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ezhov, Yurii E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *ezhovye@gumrf.ru*

Bardin, Aleksey K. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: *akbardin@mail.ru*

Sidorenko, Vladimir A. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *vsidd@mail.ru*, *kaf_texp@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.
Received: November 15, 2018.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-121-129

INFLUENCE OF THE MULTIGRAPHEN NANOPARTICLES CONCENTRATION IN THE HEAT CARRIER OF SHIP AND TRANSPORT PROPULSION PLANTS COOLING SYSTEMS ON ITS VISCOSITY

R. V. Gorshkov[1], A. V. Zharov[1], V. V. Skosar[2]

[1] — Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation
[2] — Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

The possibility of using coolants modified with high-heat-conducting solid nanoparticles is being considered recently for the intensification of heat transfer in the cooling systems of forced ship and transport internal combustion engines. Modifying by such particles the basic heat carriers, such as water, and aqueous solutions of ethylene glycol, the stable two-phase suspensions are obtained, which have a higher thermal conductivity coefficient than base fluids. The well-known theoretical models describing the viscosity of "liquid-solid particles" suspensions are considered and it is shown that the addition of high-heat-conducting solid nanoparticles to the base heat carrier leads to its dynamic viscosity coefficient increase. The experimental studies of influence the concentration of multigraphene particles on the dynamic viscosity coefficient of suspensions at their different temperatures are carried out using a highly sensitive rheometer, in a measuring cell of which a construction with coaxially arranged cylinders with a double gap is realized. As a result, the relevant regularities are detected. Based on the obtained experimental data and well-known viscosity model, an equation for calculating the dynamic viscosity coefficient of the studied coolants samples at their different temperatures, depending on the mass concentration of multigraphene nanoparticles has been derived. The modification of base coolants with the properties of Newtonian fluid by multigraphene can lead to a change in the rheological behavior of the resulting suspension. The rheological studies on suspensions modified with multigraphene have been carried out and rheological curves of shear stress and dynamic viscosity coefficient versus shear rate have been obtained. As a result, it was established that the presented samples of suspensions are Newtonian liquids, therefore the corresponding hydrodynamic equations and equations characterizing a heat transfer at the "wall - cooling liquid" boundary are applied to describe the regularities of heat exchange processes with the presented liquids and the movement features of such suspensions in the cavities of the engine cooling system. Due to a significant increase in the dynamic viscosity coefficient of suspensions modified with multigraphene, we are tasked with detection the possibility of viscosity reducing of such heat carriers while keeping the effect of high thermal conductivity coefficient.

Keywords: heat transfer intensification, engine cooling system, coolant, multigraphene nanoparticles, dynamic viscosity coefficient, rheological studies.

For citation:
Gorshkov, Roman V., Aleksandr V. Zharov, and Vladimir V. Skosar. "Influence of the multigraphen nanoparticles concentration in the heat carrier of ship and transport propulsion plants cooling systems on its viscosity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 121–129. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-121-129.

УДК 621.4:620.3

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ МУЛЬТИГРАФЕНА В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ЕГО ВЯЗКОСТЬ

Р. В. Горшков[1], А. В. Жаров[1], В. В. Скосарь[2]

[1] — Ярославский государственный технический университет,
Ярославль, Российская Федерация;
[2] — Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва, Российская Федерация

Для интенсификации теплоотдачи в системах охлаждения форсированных судовых и транспортных двигателей внутреннего сгорания в последнее время рассматривается возможность использования теплоносителей, модифицированных высокотеплопроводными твердыми наночастицами. Модифицируя частицами базовые теплоносители, такие как вода, водные растворы этиленгликоля, получают стабильные двухфазные суспензии, имеющие более высокий коэффициент теплопроводности по сравнению с базовыми жидкостями. Рассмотрены известные теоретические модели, описывающие вязкость суспензий «жидкость – твердые частицы», и показано, что добавление высокотеплопроводных твердых наночастиц в базовый теплоноситель приводит к увеличению его коэффициента динамической вязкости. С использованием высокочувствительного реометра, в измерительной ячейке которого реализована конструкция с коаксиально расположенными цилиндрами с двойным зазором, проведены экспериментальные исследования влияния концентрации частиц мультиграфена на коэффициент динамической вязкости суспензий при их различных температурах, в результате чего выявлены соответствующие закономерности. На основе полученных экспериментальных данных и известной модели вязкости выведено уравнение по расчету коэффициента динамической вязкости исследованных образцов теплоносителей при разных их температурах в зависимости от массовой концентрации наночастиц мультиграфена. Модификация базовых теплоносителей со свойствами ньютоновской жидкости мультиграфеном может приводить к изменению реологического поведения получаемой суспензии. Проведены реологические исследования модифицированных мультиграфеном суспензий и получены реологические кривые, выражающие зависимость от скорости сдвига напряжения сдвига и коэффициента динамической вязкости. В результате установлено, что представленные образцы суспензий являются ньютоновскими жидкостями, поэтому для описания закономерностей процессов теплообмена с представленными жидкостями и особенностей движения таких суспензий в полостях системы охлаждения двигателя применимы соответствующие уравнения гидродинамики и уравнения, характеризующие теплообмен на границе «стенка – охлаждающая жидкость». Вследствие значительного увеличения коэффициента динамической вязкости суспензий, модифицированных мультиграфеном, поставлена задача выявить возможность снижения вязкости таких теплоносителей при сохранении эффекта повышенного коэффициента теплопроводности.

Ключевые слова: интенсификация теплоотдачи, система охлаждения двигателя, теплоноситель, наночастицы мультиграфена, коэффициент динамической вязкости, реологические исследования.

Для цитирования:
Горшков Р. В. Влияние концентрации наночастиц мультиграфена в теплоносителе систем охлаждения судовых и транспортных энергетических установок на его вязкость / Р. В. Горшков, А. В. Жаров, В. В. Скосарь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 121–129. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-121-129.

Введение (Introductoin)

Форсирование транспортных и в том числе судовых двигателей внутреннего сгорания приводит к высоким температурам их теплонапряженных деталей, ограничивающих камеру сгорания. Методы интенсификации теплообмена в системах охлаждения (СО) силовых установок как за счет конструктивных решений по оптимизации направлений потоков теплоносителя, так и за счет совершенствования режимных параметров движения охлаждающей жидкости, видимо, достигли своих максимальных возможностей. Поэтому важным способом влияния на теплоотдачу в СО является введение различных присадок в базовые охлаждающие жидкости (ОЖ), представляющие собой в основном водные растворы этиленгликоля [1]. Так, введением в ОЖ поверхностно-активных веществ и растворимых полимеров удалось изменить параметры пограничного слоя и уменьшить коэффициент динамической вязкости, что положительно сказалось на теплообменных процессах в СО двигателя [2]. В связи с этим перспективным, на наш взгляд, является создание устойчивых двухфазных суспензий на основе базовых ОЖ и твердых наночастиц с высоким коэффициентом теплопроводности.

С целью интенсификации теплоотдачи в системе охлаждения перспективных транспортных и судовых двигателей внутреннего сгорания создали теплоноситель с увеличенным на 60 % коэффициентом теплопроводности, представляющий собой устойчивую стабильную суспензию на основе водного раствора этиленгликоля и твердых наночастиц мультиграфена (МГ) с концентрациями от 0,2 до 0,75 % [3].

Известно, что добавление твердых частиц в базовые (несущие) жидкости приводит к увеличению коэффициента динамической вязкости суспензии, что оказывает влияние на толщину пограничного слоя и на интенсивность турбулентного смешивания в нем, а увеличение коэффициента динамической вязкости теплоносителя приводит, в свою очередь, к уменьшению интенсивности теплоотдачи в СО двигателей внутреннего сгорания. Согласно модели Альберта Эйнштейна (1) [4], увеличение массовой концентрации φ_m твердых частиц от 0,2 до 0,75 % приводит к двукратному увеличению коэффициента динамической вязкости суспензии η_{nf}:

$$\eta_{nf} = \eta_f (1 + k\varphi), \tag{1}$$

где η_f — коэффициент динамической вязкости базовой жидкости; φ — объемная концентрация частиц; k — коэффициент, учитывающий форму частиц ($k = 2{,}5$ для сферических частиц).

Взаимосвязь массовой и объемной концентраций приведена в [3]. Уравнение (1) учитывает влияние частиц на гидродинамическое поле скоростей базовой жидкости и на тензор дополнительных напряжений. Позднее Х. Бринкман [5] модифицировал уравнение (1) для его использования при концентрациях частиц $\varphi < 4$ %:

$$\eta_{nf} = \eta_f \frac{1}{(1-\varphi)^{2,5}}. \tag{2}$$

Такое же увеличение концентрации частиц, согласно уравнению (2), свидетельствует о повышении η_{nf} в семь раз.

Дж. Батчелор [6] предложил модель (3), учитывающую эффект броуновского движения частиц, для изотропных суспензий с твердыми частицами сферической формы:

$$\eta_{nf} = \eta_f (1 + 2{,}5\varphi + 6{,}5\varphi^2). \tag{3}$$

Представленная модель свидетельствует о повышении η_{nf} суспензии в 3,5 раза при увеличении концентрации твердых частиц от 0,2 до 0,75 %. Таким образом, рассмотренные модели, описывающие вязкость суспензий «жидкость – твердые частицы», демонстрируют существенное изменение η_{nf} при одинаковом изменении концентрации частиц (рис. 1). При этом оказались различными и виды функций, описывающие повышение вязкости суспензий при увеличении φ_m.

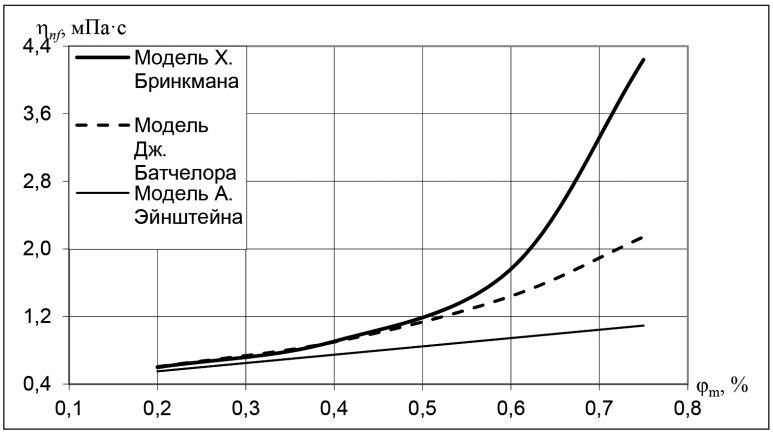


Рис. 1. Влияние концентрации твердых частиц в суспензии на коэффициент динамической вязкости по трем моделям при температуре 90 °С

Следует отметить, что полученныее методом электрохимической эксфолиации частицы мультиграфена в данном случае представляют собой плоские высокотеплопроводные наночастицы, состоящие из нескольких слоев графена [7]. Исходя из ранее изложенного, важно отметить, что рассмотренные теоретические модели разрабатывались для частиц иной формы, и эти модели могут не учитывать различные факторы, влияющие на η_{nf}, к которым относятся: размеры частиц [8], физические свойства базовой жидкости [9], [10], шероховатость краев частиц, удельная

площадь поверхности частиц, масса, плотность частиц и др. [11], [12]. Многие из этих факторов определяются технологией получения наночастиц, а также способом их диспергирования в базовых жидкостях [13]. Поэтому значения η_{nf} образцов наножидкостей с концентрацией частиц МГ от 0,2 до 0,75 % были определены в данном исследовании экспериментально.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для измерений η_{nf} указанных образцов суспензий использовался реометр Physica MCR-301, в измерительной ячейке которого реализована конструкция с коаксиально расположенными цилиндрами с двойным зазором в 0,42 и 0,46 мм. Исследуемый образец наножидкости помещался в измерительную ячейку, окруженную водой с постоянной температурой, и термостатировался с точностью до 0,1 °С. Реологические измерения проводились в диапазоне скоростей сдвига 0,1–450 $с^{-1}$. При этом задавалась скорость вращения внутреннего цилиндра и измерялся момент сил, действующий на цилиндр, а далее определялось напряжение сдвига. Точность реометра проверялась путем измерений коэффициента динамической вязкости базовой жидкости и сравнивалась с данными источника [14]. Точность измерений момента сил составляет 0,5 %. Пределы относительной погрешности измерений коэффициента динамической вязкости данным прибором составляет ±2 %. Значения средних квадратичных отклонений при измерениях коэффициента динамической вязкости находились в пределах 3 % от измеряемых величин.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Влияние массовой концентрации наночастиц МГ на значения η_{nf} описываются квадратичной функцией (рис. 2). Аналогичную закономерность, подобно модели Дж. Батчелора (3), получили авторы работ [15], [16]. Увеличение концентрации частиц МГ от 0,2 до 0,75 % в базовой жидкости привело к увеличению ее коэффициента динамической вязкости на 45 % при температуре 90 °С.

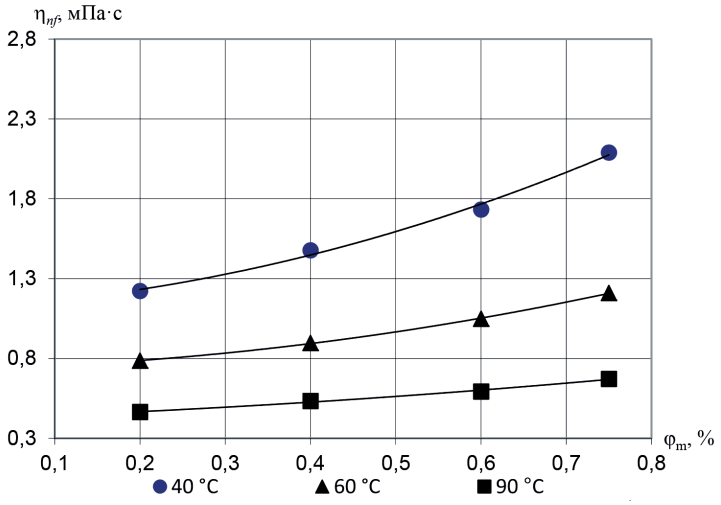


Рис. 2. Влияние массовой концентрации наночастиц мультиграфена на коэффициент динамической вязкости наножидкостей при различных температурах

Вязкость всех образцов суспензий, как и вязкость базовой жидкости, экспоненциально уменьшается с увеличением температуры испытаний охлаждающих жидкостей. Так, η_{nf} теплоносителя с массовой концентрацией частиц МГ 0,75 % уменьшился в 4,4 раза при увеличении температуры от 20 до 90 °С (рис. 3), что обусловлено ослаблением сил межмолекулярных и межчастичных адгезий. Такая тенденция наблюдается у большинства других исследователей, которые работали как с этиленгликолем [18], так и с его водными растворами [16], [17], [19]. Было установлено, что η_{nf} суспензии с концентрацией частиц МГ в 0,75 % увеличился на 49 % по сравнению с вязкостью базовой жидкости при ее температуре 90 °С.

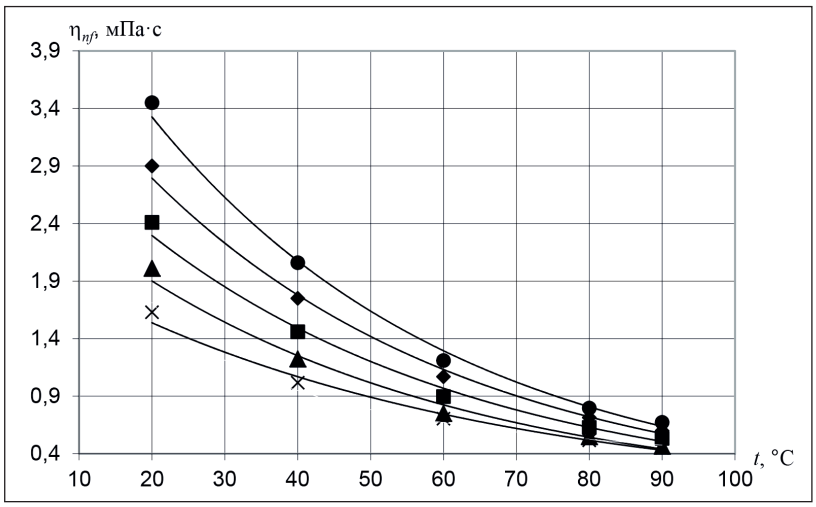


Рис. 3. Влияние концентрации частиц мультиграфена и температуры наножидкостей на их коэффициенты динамической вязкости:
● – φ_m = 0,75 %; ♦ — φ_m = 0,6 %; ■ — φ_m = 0,4 %; ▲— φ_m = 0,2 %; × — ВЭГ

Если принять за основу известную и часто используемую модель Дж. Батчелора (3), то значения экспериментальных данных, согласно рис. 3, по коэффициенту динамической вязкости исследованных образцов наножидкостей при их разных температурах в зависимости от массовой концентрации наночастиц мультиграфена описываются уравнением (4):

$$\eta_{nf} = \eta_f (3{,}32 + 0{,}25\varphi_m + 1{,}25\varphi_m^2 - 0{,}0072T), \quad (4)$$

которое основано на аппроксимации экспериментальных данных (см. рис. 2 и 3) по методу наименьших квадратов с величиной коэффициента достоверности аппроксимации не ниже $R^2 = 0{,}992$, а именно справедливо в диапазоне φ_m = 0,2 – 0,75 % и T = 293 – 363 K. Максимальное значение отклонения от экспериментальных данных составляет 5 %.

Известно, что модифицированная твердыми наночастицами базовая ньютоновская жидкость может обладать неньютоновским поведением, т. е. вязкость такой жидкости будет проявлять зависимость от режима деформаций, а касательное напряжение сдвига может нелинейно зависеть от градиента скорости сдвига [18], [20]. Учитывая ранее изложенное, необходимо провести реологические исследования модифицированных мультиграфеном суспензий. На вышеуказанном приборе были получены реологические кривые, выражающие зависимость от скорости сдвига напряжения сдвига (рис. 4) и коэффициента динамической вязкости (рис. 5).

а) б)

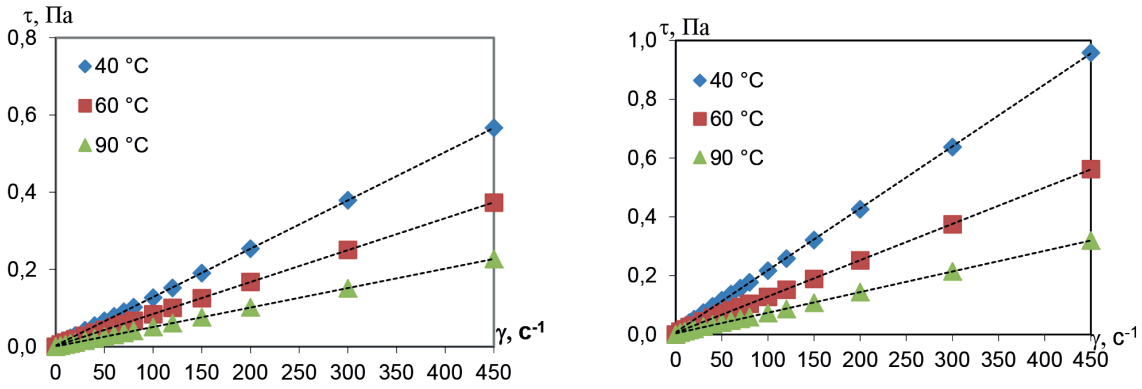


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига слоев наножидкостей при различных массовых концентрациях частиц мультиграфена и температурах:
а — φ_m = 0,2 %; *б* — φ_m = 0,75 %

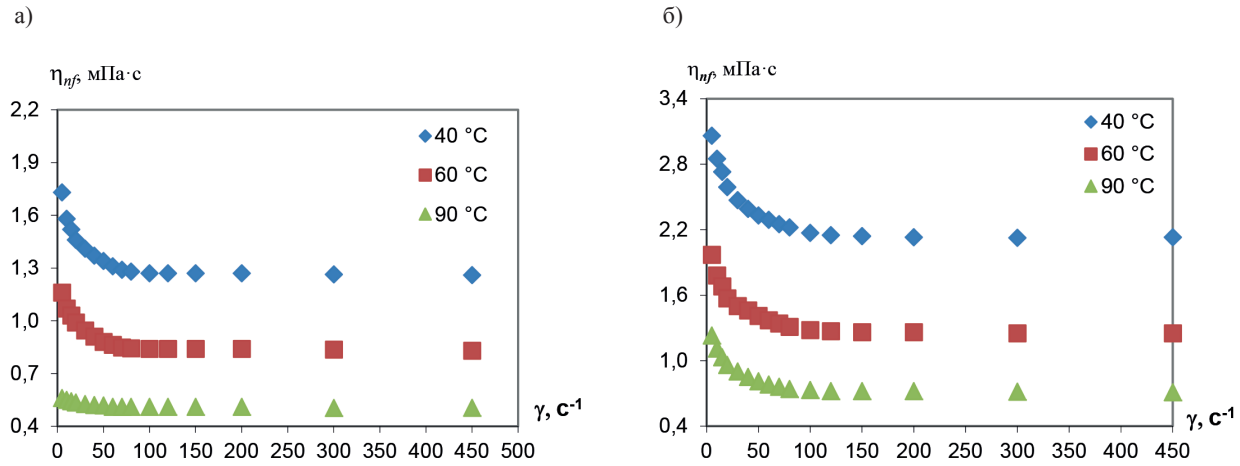


Рис. 5. Зависимость коэффициента динамической вязкости от скорости сдвига слоев наножидкостей при различных массовых концентрация частиц мультиграфена и температурах:
а — φ_m = 0,2 %; *б* — φ_m = 0,75 %

Для всех исследованных образцов наножидкостей наблюдается линейная зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига, причем все линии выходят из начала системы координат, как показано на рис. 4, откуда сделать вывод о том, что представленные образцы суспензий являются ньютоновскими жидкостями. Поэтому для описания закономерностей процессов теплообмена с представленными жидкостями и особенностей движения таких наножидкостей в полостях системы охлаждения двигателя применимы соответствующие уравнения гидродинамики и уравнения, характеризующие теплообмен на границе «стенка – охлаждающая жидкость».

Вязкость наножидкостей уменьшается с увеличением скорости сдвига до значений 60 и 80 с$^{-1}$, соответственно для образцов с массовой концентрацией частиц МГ 0,2 и 0,75 % (см. рис. 5). Дальнейшее увеличение скорости сдвига не приводит к изменению коэффициента динамической вязкости образцов. Такое поведение суспензий можно объяснить двумя причинами. Во-первых, в начальный момент вращения шпинделя реометра при низких скоростях сдвига происходит разрушение крупных агломератов, что приводит к повышенным значениям напряжений сдвига. Во-вторых, в начале вращения шпинделя реометра при низких скоростях сдвига происходит реструктуризация плоских частиц мультиграфена и их ориентация в потоке жидкости [20].

Заключение (Conclusions)

Таким образом теплоноситель с концентрацией частиц мультиграфена в 0,75 % имеет, с одной стороны, увеличенный на 60 % коэффициент теплопроводности, а с другой — увеличенный на 49 % коэффициент динамической вязкости по сравнению с водным раствором этиленгликоля при температуре теплоносителя 90 °С. Это приводит к уменьшению эффекта интенсификации теплоотдачи в системе охлаждения тепловых двигателей за счет повышенного коэффициента теплопроводности теплоносителя. Следовательно, необходимо выявить возможность снижения вязкости таких теплоносителей с сохранением эффекта увеличенного коэффициента теплопроводности.

Для практического использования жидкостей, содержащих наночастицы, в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания следует оценить устойчивость таких теплоносителей при контактах с применяемыми в двигателях конструкционными материалами.

Более широкое применение графеновых наночастиц с высоким коэффициентом теплопроводности в других эксплуатационных жидкостях силовых установок (например, в качестве присадок в моторные масла) позволит снизить температуры охлаждаемого им поршня с сохранением или даже уменьшением коэффициента трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безюков О. К.* Охлаждающие жидкости транспортных ДВС / О. К. Безюков, В. А. Жуков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2009. — 263 с.

2. *Безюков О. К.* Охлаждение транспортных двигателей внутреннего сгорания: монография / О. К. Безюков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2015. — 272 с.

3. *Жаров А. В.* Теплоноситель с наночастицами мультиграфена для интенсификации процессов теплообмена в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания / А. В. Жаров, Р. В. Горшков, Н. Г. Савинский // Труды НАМИ. — 2018. — № 4 (275). — С. 48–56.

4. *Einstein A.* A new determination of molecular dimensions / A. Einstein // Annals of Physics. — 1906. — Vol. 9. — Pp. 289–306.

5. *Brinkman H. C.* The Viscosity of concentrated suspensions and solution / H. C. Brinkman // Journal of Chemical Physics. — 1952. — Vol. 20. — Is. 4. — Pp. 571. DOI: 10.1063/1.1700493.

6. *Batchelor G.K.* The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles / G.K. Batchelor // Journal of Fluid Mechanics. — 1977. — Vol. 83. — Is. 1. — Pp. 97–117. DOI: 10.1017/S0022112077001062.

7. *Shahil K. M. F.* Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials / K. M. F. Shahil, A. A. Balandin // Solid State Communications. — 2012. — Vol. 152. — Is. 15. — Pp. 1331–1340. DOI: 10.1016/j.ssc.2012.04.034.

8. *Graham A. L.* On the viscosity of suspensions of solid spheres / A. L. Graham // Applied Scientific Research. — 1981. — Vol. 37. — Is. 3–4. — Pp. 275–286. DOI: 10.1007/BF00951252.

9. *Chen H.* Rheological behavior of ethylene glycol based titania nanofluids / H. Chen, Y. Ding, Y. He, C. Tan // Chemical Physics Letters. — 2007. — Vol. 444. — Is. 4–6. — Pp. 333–337. DOI: 10.1016/j.cplett.2007.07.046.

10. *Masoumi N.* A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids / N. Masoumi, N. Sohrabi, A. Behzadmehr // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2009. — Vol. 42. — Num. 5. — Pp. 055501. DOI: 10.1088/0022-3727/42/5/055501.

11. *Yang L.* Viscosity prediction models of ammonia water nanofluids based on various dispersion types / L. Yang, K. Du, Y. H. Ding, B. Cheng, Y. J. Li // Powder Technology. — 2012. — Vol. 215. — Pp. 210–218. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.09.050.

12. *Рудяк В. Я.* Об эффективной вязкости наносуспензий / В. Я. Рудяк, А. А. Белкин, В. В. Егоров // Журнал технической физики. — 2009. — Т. 79. — № 8. — С. 18–25.

13. *Wang X.* Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture / X. Wang, X. Xu, S.U.S. Choi // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. — 1999. — Vol. 13. — No. 4. — Pp. 474–480. DOI: 10.2514/2.6486.

14. *Дымент О. Н.* Гликоли и другие производные окисей этилена и пропилена / О. Н. Дымент, К. С. Казанский, А. М. Мирошников. — М.: Химия, 1976. — 373 с.

15. *Sundar L. S.* Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: A review / L. S. Sundar, K.V. Sharma, M. T. Naik, M. K. Singh // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2013. — Vol. 25. — Pp. 670–686. DOI: 10.1016/j.rser.2013.04.003.

16. *Kole M.* Investigation of thermal conductivity, viscosity, and electrical conductivity of graphene based nanofluids / M. Kole, T. K. Dey // Journal of Applied Physics. — 2013. — Vol. 113. — Is. 8. — Pp. 084307. DOI: 10.1063/1.4793581.

17. *Ijam A.* Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide-deionized water/ethylene glycol based nanofluid / A. Ijam, R. Saidur, P. Ganesan, A. M. Golsheikh // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2015. — Vol. 87. — Pp. 92–103. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.060.

18. *Hadadian M.* Electrical conductivity, thermal conductivity, and rheological properties of graphene oxide-based nanofluids / M. Hadadian, E. K. Goharshadi, A. Youssefi // Journal of nanoparticle Research. — 2014. — Vol. 16. — №. 12. — Pp. 2788. DOI: 10.1007/s11051-014-2788-1.

19. *Amiri A.* Backward-facing step heat transfer of the turbulent regime for functionalized graphene nanoplatelets based water–ethylene glycol nanofluids / A. Amiri, H. K. Arzani, S.N. Kazi, B.T. Chew, A. Badarudin // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2016. — Vol. 97. — Pp. 538–546. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.042.

20. *Mehrali M.* Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets / M. Mehrali, E. Sadeghinezhad, S. T. Latibari, S. N. Kazi, M. Mehrali, M. N. B. M. Zubir, H. S. C. Metselaar // Nanoscale Research Letters. — 2014. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 15. DOI: 10.1186/1556-276X-9-15.

REFERENCES

1. Bezyukov, O. K., and V. A. Zhukov. *Okhlazhdayushchie zhidkosti transportnykh DVS*. SPb.: SPGUVK, 2009.

2. Bezyukov, O. K. *Okhlazhdenie transportnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya: monografiya*. SPb.: GUMRF im. admirala S. O. Makarova, 2015.

3. Zharov, A. V., R. V. Gorshkov, and N. G. Savinskiy. "Heat carrier with multigrafen nanoparticles to process heat exchange intensification in internal combustion engines cooling systems." *Trudy NAMI* 4(275) (2018): 48–56.

4. Einstein, A. "A new determination of molecular dimensions." *Annals of Physics* 9 (1906): 289–306.

5. Brinkman, H. C. "The viscosity of concentrated suspensions and solutions." *The Journal of Chemical Physics* 20.4 (1952): 571. DOI: 10.1063/1.1700493.

6. Batchelor, G. K. "The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles." *Journal of fluid mechanics* 83.1 (1977): 97–117. DOI: 10.1017/S0022112077001062.

7. Shahil, Khan MF, and Alexander A. Balandin. "Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials." *Solid State Communications* 152.15 (2012): 1331–1340. DOI: 10.1016/j.ssc.2012.04.034.

8. Graham, Alan L. "On the viscosity of suspensions of solid spheres." *Applied Scientific Research* 37.3–4 (1981): 275–286. DOI: 10.1007/BF00951252.

9. Chen, Haisheng, Yulong Ding, Yurong He, and ChunqingTan. "Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids." *Chemical physics letters* 444.4–6 (2007): 333–337. DOI: 10.1016/j.cplett.2007.07.046.

10. Masoumi, N., N. Sohrabi, and A. Behzadmehr. "A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids." *Journal of Physics D: Applied Physics* 42.5 (2009): 055501. DOI: 10.1088/0022-3727/42/5/055501.

11. Yang, Liu, Kai Du, Yue Hong Ding, Bo Cheng, and Yan Jun Li. "Viscosity-prediction models of ammonia water nanofluids based on various dispersion types." *Powder technology* 215–216 (2012): 210–218. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.09.050.

12. Rudyak, V. Y., A. A. Belkin, and V. V. Egorov. "On the effective viscosity of nanosuspensions." *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* 54.8 (2009): 1102–1109. DOI: 10.1134/S1063784209080039.

13. Wang, Xinwei, Xianfan Xu, and Stephen U. S. Choi. "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture." *Journal of thermophysics and heat transfer* 13.4 (1999): 474–480. DOI: 10.2514/2.6486.

14. Dyment, O. N., K. S. Kazanskii, and A.M. Miroshnikov. *Glikoli i drugie proizvodnye okisei etilena i propilena*. M: Khimiya, 1976.

15. Sundar, L. Syam, K. V. Sharma, M. T. Naik, and Manoj K. Singh. "Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review." *Renewable and sustainable energy reviews* 25 (2013): 670–686. DOI: 10.1016/j.rser.2013.04.003.

16. Kole, Madhusree, and T. K. Dey. "Investigation of thermal conductivity, viscosity, and electrical conductivity of graphene based nanofluids." *Journal of Applied Physics* 113.8 (2013): 084307. DOI: 10.1063/1.4793581.

17. Ijam, Ali, R. Saidur, P. Ganesan, and A. Moradi Golsheikh. "Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide-deionized water/ethylene glycol based nanofluid." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 87 (2015): 92–103. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.060.

18. Hadadian, Mahboobeh, Elaheh K. Goharshadi, and Abbas Youssefi. "Electrical conductivity, thermal conductivity, and rheological properties of graphene oxide-based nanofluids." *Journal of nanoparticle Research* 16.12 (2014): 2788. DOI: 10.1007/s11051-014-2788-1.

19. Amiri, Ahmad, Hamed Khajeh Arzani, S.N. Kazi, B.T. Chew, and A. Badarudin. "Backward-facing step heat transfer of the turbulent regime for functionalized graphene nanoplatelets based water–ethylene glycol nanofluids." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 97 (2016): 538–546. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.042.

20. Mehrali, Mohammad, Emad Sadeghinezhad, Sara Tahan Latibari, Salim Newaz Kazi, Mehdi Mehrali, Mohd Nashrul Bin Mohd Zubir, and Hendrik Simon Cornelis Metselaar. "Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets." *Nanoscale research letters* 9.1 (2014): 15.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горшков Роман Владимирович — аспирант
Научный руководитель:
Жаров Александр Викторович
Ярославский государственный технический университет
150023, Российская Федерация, г. Ярославль, Московский проспект, 88
e-mail: *RZiori@yandex.ru*

Жаров Александр Викторович —
кандидат технических наук, профессор
Ярославский государственный технический университет
150023, Российская Федерация, г. Ярославль, Московский проспект, 88
e-mail: *zharov3@yandex.ru*

Скосарь Владимир Васильевич — аспирант
Научный руководитель:
Кошурников Андрей Викторович —
кандидат геолого-минералогических наук,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
119992, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, 1
e-mail: *skosar@msu-geophysics.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorshkov, Roman V. — Postgraduate
Supervisor:
Zharov, Aleksandr V.
Yaroslavl State Technical University
88, Moscow Av., Yaroslavl, 150023,
Russian Federation
e-mail: *RZiori@yandex.ru*

Zharov, Aleksandr V. —
PhD, professor
Yaroslavl State Technical University
88, Moscow Av., Yaroslavl, 150023,
Russian Federation
e-mail: *zharov3@yandex.ru*

Skosar, Vladimir V. — Postgraduate
Supervisor:
Koshurnikov Andrej Viktorovich —
PhD,
Leading Researcher MSU
Lomonosov Moscow State University
1, Lenin's mountains, Moscow, 119992,
Russian Federation
e-mail: *skosar@msu-geophysics.ru*

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2018 г.
Received: December 27, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145

ENVIRONMENTAL SAFETY. LIMITATION OF SULFUR EMISSIONS BY THE SHIP POWER PLANTS

A. P. Petrov, G. E. Zhivljuk

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

It is noted that more than 70 thousand vessels will be affected by the regulation due to the International Maritime Organization restrictions - the content of sulfur in the fuel is not more than 0.5% that will come into force in 2020. In this regard, ship owners assess their capabilities to ensure compliance with the new requirements. The materials of the international organizations and classification societies Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd, which reflect the latest regulatory changes and measures to comply with the requirements for emissions of sulfur compounds, as well as technological and market developments on the problem of such emissions reducing, are used in the paper. The current and perspective restrictions on sulfur emissions are considered. It is noted, that the stronger restrictions are already exist in emission control zones in Europe, North and South America, in ports and coastal areas of China, and new control zones are being created. The transition from the local observance of new restrictions to the global is awaited in the time remaining until 2020. The norm change of sulfur content in fuels affects all types of fuel oil and distillates. It is emphasized that the achievement of regulatory indicators for sulfur emissions can be obtained using the appropriate fuel: the special types of low-sulfur fuel, the transition from high-sulfur fuel oil to marine gas oil or distillates. The other way is to apply the engines exhaust gas cleaning methods in special peripheral devices (scrubbers) running on the traditional high-sulfur fuels, which allows working with conventional fuels. The real possibility of pre-equipping ships with engine power supply systems with alternative fuels, such as LNG or others sulfur-free is considered. The features of proposed innovations are analyzed in the paper.

Keywords: ship power plants, internal combustion engine, environmental safety, standards, fuel, exhaust gases, exhaust emissions, sulfur, sulfur oxide, scrubber, wash water.

For citation:
Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. "Environmental safety. Limitation of sulfur emissions by the ship power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.

УДК 621.436

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ОГРАНИЧЕНИЕ ВЫБРОСОВ СЕРЫ СУДОВЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

А. П. Петров, Г. Е. Живлюк

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

Отмечается, что в результате ограничений Международной морской организации по содержанию серы в топливе не более 0,50 %, которые вступят в силу в 2020 г., регулированием будет затронуто более 70 тыс. судов. В связи с этим владельцы судов оценивают свои возможности для обеспечения соответствия новым требованиям. В предлагаемой статье использованы материалы международных организаций и классификационных обществ Det Norske Veritas и Germanischer Lloyd, в которых отражены последние нормативные изменения и меры по соблюдению требований, предъявляемых к выбросам соединений серы, а также технологические и рыночные разработки по проблеме сокращения таких выбросов. Рассмотрены действующие и перспективные ограничения по выбросам серы. Обращается внимание на то, что более строгие ограничения уже существуют в зонах контроля выбросов в Европе, Северной и Южной Америке, в портах и прибрежных районах Китая, создаются новые зоны контроля. В оставшееся до 2020 г. время предстоит перейти от локального соблюдения новых ограничений к глобальному. Изменение нормы по содержанию серы в топливах затрагивают все виды мазутов и дистиллятов. Подчеркивается, что достижение нормативных показателей по выбросу серы может быть получено в результате использова-

ния надлежащего топлива: специальных видов низкосернистого топлива, перехода с высокосернистого мазута на морской газойль или дистилляты. Отмечается, что другой путь состоит в применении методов очистки отработавших газов двигателей в специальных периферийных устройствах (скрубберах), работающих на традиционных высокосернистых сортах топлива, что позволяет использовать обычное топливо. Рассматривается реальная возможность дооборудования судов системами питания двигателей альтернативными видами топлива, такими как СПГ или другими, не содержащими серы. В статье проанализированы особенности предлагаемых инноваций.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, двигатель внутреннего сгорания, экологическая безопасность, нормы, топливо, отработавшие газы, выбросы в отработавших газах, сера, оксид серы, скруббер, вода промывочная.

Для цитирования:
Петров А. П. Экологическая безопасность. Ограничение выбросов серы судовыми энергетическими установками / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.

Введение (Introduction)

Вопросам экологической безопасности мореплавания в комплексе проблем современного морского транспорта уделяется повышенное внимание. Наибольший ущерб окружающей среде наносится судовой энергетической установкой, в результате работы которой образуются такие вредные компоненты, как несгоревшие углеводороды, твердые частицы, оксиды азота, парниковые газы и, в отдельных случаях, соединения серы. В то время как на образование ряда опасных компонентов, содержащихся в отработавших газах, можно влиять за счет специальной организации процессов в цилиндре двигателя, эмиссия серосодержащих компонентов целиком и полностью определяется содержанием серы в используемом топливе. Как следствие, решение проблем сокращения выбросов SO_x требует специфических решений. Ожидается, что с 2020 г. вступят в силу новые правила по ограничению до 0,5 % содержания серы в используемом на судах топливе. Новые требования будут действовать во всех международных водах и затронут интересы судовладельцев более 70 тыс. судов.

Принципиальным вопросом является то, что достижение нормативных показателей по выбросам SO_x может быть получено в результате использования специальных видов низкосернистого топлива либо путем очистки в специальных периферийных устройствах отработавших газов двигателей на традиционных высокосернистых сортах топлива. Данной проблеме посвящены материалы международных организаций: IMO (International Maritime Organization — Международная морская организация) [1], ICS (Международная палата судоходства — International Chamber of Shipping) [2], ISO (Международная организация по стандартизации — International Standard Organization) [3], классификационного общества *Det Norske Veritas* и *Germanischer Lloyd* (далее — DNV GL) [4], [5], в которых отражены последние нормативные изменения и меры по обеспечению соблюдения требований к выбросам соединений серы, а также технологические и рыночные разработки для альтернативных решений по проблеме сокращения выбросов SO_x. Указанные материалы являются актуализацией более ранней публикации DNV GL «Global Sulfur Cap», изданной в октябре 2016 г., и включают расширенный раздел по скрубберам.

Проведен анализ действующих в настоящее время региональных ограничений выбросов серы в североамериканских районах, прибрежных к США районах Карибского бассейна, морях, омывающих берега стран Европейского Союза и Китая. Рассмотрены варианты применения альтернативных видов топлива, технического и экологического оборудования, обеспечивающих реализацию современных требований экологической безопасности и защиты окружающей среды.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Действующие и перспективные ограничения по выбросам SO_x. Защита окружающей среды от выбросов вредных веществ в результате промышленной деятельности подробно исследова-

на в работе И. В. Семеновой [6], где кроме вопросов защиты окружающей среды и анализа природных систем рассмотрены природа техногенных газовых выбросов и методы очистки газовых выбросов от соединений серы, а также дана оценка процессов переработки нефти нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслями. В работах [7]–[9] авторами выполнено исследование проблем экологической безопасности судоходства.

С учетом того, что судовые энергетические установки являются основными потребителями высокосернистых тяжелых топлив — High-Sulphur Fuel Oil (HSFO), для регулирования выбросов SO_x IMO в 2015 г. были введены зоны контроля — Sulpfur Emission Control Areas (SECA). Расположение SECA показано на рис. 1 [4], [10].

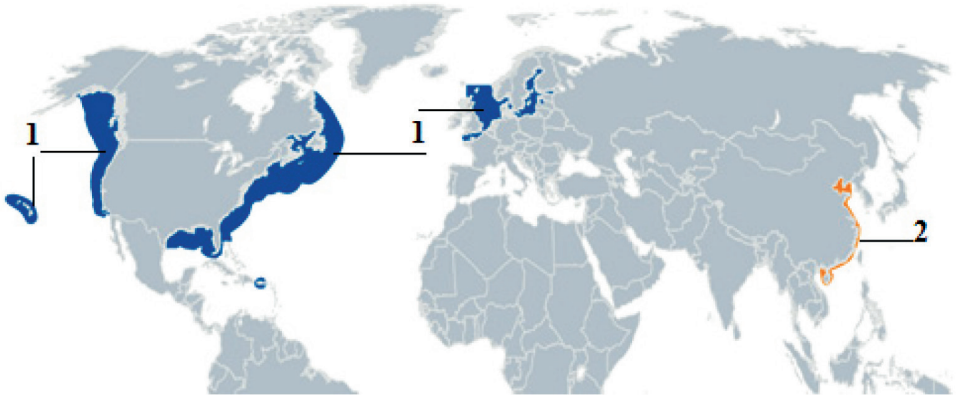


Рис. 1. Расположение SECA и их нормирование:
1 — 0,1 %; *2* — 0,5 %

После обзора допустимости применения совместимого малосернистого мазута, IMO было принято решение о том, что глобальное ограничение содержания серы в топливе 0,5 % для всех районов плавания вступит в силу в 2020 г. Это требование вводится в дополнение к ограничениям в 0,1 % серы в североамериканских и американских районах Карибского бассейна, Северного и Балтийского морей. При этом судам, на энергетических установках которых установлены системы очистки отработавших газов от соединений серы, будет разрешено не прекращать использование HSFO (табл. 1) [4].

Таблица 1

Региональные и глобальные регуляторы серы

Регион	Предел по содержанию серы в топливе	Возможность использования скрубберов
Все районы плавания в международных водах	0,5 % (2020 г.)	Да
Зоны контроля (SECA)	0,1 %	Да
Евросоюз	0,1 % во всех портовых акваториях	В некоторых странах ограничено использование открытого цикла
Китай	0,5 % в национальных водах в 12-мильной зоне	Да
Калифорния	0,1 %, в 24-мильной зоне побережья	Нет, только как исключение в случае отдельной заявки и дополнительных исследований

Существенной поправкой к регулированию является «Соглашение о запрете перевозки HSFO в топливной системе», за исключением судов, оборудованных скрубберами. По-прежнему разрешено перевозить HSFO в качестве груза, однако запрещается иметь HSFO в резервуарах топливных систем в случае, если не используются скрубберы. Эта поправка позволяет задерживать

суда, использующие несоответствующее топливо, при проведении государственного контроля порта — Port State Control (PSC), без необходимости проверки независимо от того, было ли оно использовано или нет. Ожидается, что такие поправки позволят значительно снизить вероятность нарушения требований экологического законодательства в международных водах.

Как видно из табл. 1, директива Европейского Союза (ЕС) предусматривает содержание серы в топливе не более 0,10 % для судов в портах ЕС. В некоторых странах ЕС в рамках директивы ограничивается сброс скрубберной воды. Так, страны Бельгия и Германия запретили сброс воды из скрубберов во многих районах, что послужило ограничением для работы скрубберов с открытым циклом. Невзирая на то, что до настоящего времени в ЕС не существует общепринятой концепции, другие страны ЕС могут последовать этому примеру.

В настоящее время в Гонконге действует ограничение на содержание серы в 0,5 % для судов у причала. В конце 2015 г. Китай опубликовал правила для внутренних требований SECA в морских районах за пределами Гонконга, Гуанчжоу, Шанхая и в Бохайском море. Китай предпринял поэтапный подход, изначально ограничивая максимальное содержание серы в 0,5 % в топливе, сжигаемом в основных портах в этих районах. Недавно власти объявили, что с 1 января 2019 г. планируется расширить географический охват зоной контроля территории в 12 морских миль вдоль всей береговой линии (см. рис. 1, поз. *2*). Существует также вероятность того, что после 2019 г. требование по содержанию серы будет ужесточено с 0,50 до 0,10 %, о чем может быть подана официальная заявка в ИМО.

Наиболее строгие требования были выдвинуты Калифорнийским советом по воздушным ресурсам (Air Resources Board — ARB) и введено ограничение на использование топлива с содержанием серы в 0,1 % в пределах 24 морских миль от побережья Калифорнии. Регулирование не допускает каких-либо других вариантов соответствия, кроме использования малосернистых топлив (DMA или DMB). Использование скрубберов допускается в качестве временного исключения, при этом заявка на движение должна быть отправлена до входа в воды Калифорнии. После официального пересмотра постановления законодатели Калифорнии решили сохранить его в качестве дополнения к общим требованиям SECA.

В целом существует общая глобальная тенденция к ужесточению местных правил по предотвращению загрязнения воздуха. В дополнение к рассмотренным зонам контроля, ужесточение норм выбросов SO_x происходит в таких зонах, как Панамский канал, Тайбэй (Тайвань) и иных местных муниципалитетах по всему миру.

Правоприменение технических регламентов. Источником загрязнения окружающей среды соединениями серы являются судовые энергетические установки. Причина выбросов серы состоит в присутствии серы в используемых механическими установками топливах [7]–[9], [11]. IMO работает над руководствами и циркулярами, направленными на облегчение перехода к новым требованиям для судовладельцев и для поощрения единообразной практики PSC во всем мире. Ожидается, что они будут опубликованы в течение 2019 г.

Одним из разрабатываемых руководящих принципов является «Руководство IMO по плану внедрения судна с пределом содержания серы 0,5 %», согласно прил. IV к МАРПОЛ [12] (Ship Implementation Plan, далее — План), предназначенное для более легкой адаптации управляющих компаний к новым требованиям по соблюдению предельного уровня серы в 0,5 % в 2020 г. Документ не является обязательным и не подлежит одобрению государством флага или признанной организацией — Recognized Organization (классификационное общество). Тем не менее PSC может принимать во внимание предписанные подготовительные действия при проверке соответствия. В План включены прилагаемые рекомендации по воздействию на механические установки и процедуры очистки резервуаров, а также рассмотрены вопросы использования совместимого мазута и выявления любых рисков безопасности, связанных с использованием таких видов топлива. В случае отсутствия возможности использования судном топлива, соответствующего требованиям, IMO предлагает отчет о недоступности использования мазута — Fuel Oil Non-Availability Report (FONAR), в котором должны быть указаны запланированные посещения портов

и другая необходимая информация. При этом суда не обязаны отклоняться от запланированного маршрута, и имеющееся на борту топливо может быть использовано до следующего порта, где должно быть приобретено топливо соответствующего качества.

Несмотря на то, что государства флага несут ответственность за соблюдение требований по предотвращению загрязнений серой международных вод, ожидается, что правоприменение исполнения останется, в первую очередь, вопросом PSC. Для того чтобы препятствовать нарушениям правил в международных водах, IMO поддерживает общий запрет на перевозку HSFO в топливных системах, за исключением судов, оборудованных скрубберами. Это позволит PSC задерживать суда, перевозящие несоответствующее топливо, без необходимости доказательства того, что оно фактически использовалось во внутренних или международных водах.

В качестве предварительной проверки соответствия судов регламенту предполагается мониторинг выбросов SO_x посредством дистанционных датчиков [4], [13]–[16]. Такие датчики, или так называемые *снифферы*, установленные на самолетах или закрепленные на мостах или входах в гавань, могут указывать, на основании анализа выхлопного шлейфа при прохождении судна, на использование соответствующего топлива. Эти действия направлены на то, чтобы идентифицировать суда, которые должны быть подвергнуты дальнейшей инспекции PSC. Необходимо отметить, что такой мониторинг не способен заменить бортовой отбор проб топлива, так как службы PSC юридически обязаны полагаться только на анализ физических образцов топлива[1]. Во время бортовой инспекции PSC должен заниматься поиском доказательств соответствия мазута, доставленного или используемого на борту судна, в бункерной накладной и в книге, фиксирующей запас нефтепродуктов, а также доказательства письменного порядка и записей о любом изменении вида топлива.

Одновременно IMO разрабатывает требование по назначению точки отбора проб используемого топлива — a Requirement for a Designated Sampling Point for in-use Fuel. Цель разработки документа состоит в том, чтобы дать возможность компетентным органам (например, PSC) принимать репрезентативные образцы используемого топлива. Вероятно, с 2021 г. на этапах первичного контроля при возобновления сертификации к существующим судам будут применяться требования IAPP (International Air Pollution Prevention — Международное обследование по предотвращению загрязнения воздуха). При этом суда, оборудованные топливными системами с низкой температурой вспышки, будут освобождены от этой процедуры.

В настоящее время не сформированы общие требования к единым штрафным санкциям за несоблюдение норм по выбросам SO_x, поэтому санкции определяются индивидуально каждым PSC. Несмотря на то, что штрафы за нарушения требований будут существенно различаться между государствами порта, можно ожидать, что указанный запрет на перевозку HSFO станет весомым фактором для соблюдения новых экологических требований. Возможно также, что, кроме штрафных санкций, суда будут обязаны выгружать несоответствующее требованиям топливо. Таким образом, правоприменение пока будет оставаться неравномерным во всем мире, поскольку ресурсы служб PSC, их возможности и исторический опыт правоприменения значительно различаются.

Выбор стратегии соответствия техническим регламентам. Учитывая, что время на подготовку и реализацию мероприятий, обеспечивающих переход к новым экологическим требованиям, ограничено, судовладельцы должны выбрать свою стратегию соответствия, проанализировать и выбрать возможные варианты. Универсальных решений проблемы не существует, и наилучший вариант, в значительной степени, зависит от типа судна, его размера, эксплуатационных характеристик и того, какие виды топлива [17] доступны в короткие и длительные сроки. Для вариантов, требующих модификации, важно учитывать сложность установки, интенсивность и эффективность эксплуатации, а также оставшийся срок эксплуатации судна. Усложняющим фактором при рассмотрении вариантов соответствия являются региональные и местные правила, которые

[1] ГОСТ Р ИСО 7935–2007. Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации диоксида серы. Характеристики автоматических методов измерений в условиях применения. М.: Стандартинформ, 2007. 12 с.

в некоторых случаях предусматривают более строгие требования, а в других — запрет некоторых вариантов соответствия [18]. Далее рассмотрены доступные варианты достижения соответствия новым требованиям по контролю и ограничению выбросов серосодержащих продуктов.

Использование морского газойля или дистиллятов. Переход на дистиллятное или MGO (Marine Gas Oil) топливо будет означать значительное увеличение затрат по статье горюче-смазочных материалов, а также может потребовать модернизацию энергетической установки в части топливоподготовки из-за значительно более низкой вязкости топлива. Топливные танки, ранее используемые для HSFO, должны быть тщательно очищены до бункеровки MGO во избежание проблем загрязнения и, как следствие, нарушения требований.

Основная проблема использования MGO или дистиллятов связана с их доступностью и стоимостью на рынке топлива. Многие аналитики считают [4], [9], что в первые несколько месяцев после внедрения новых требований разница цен между HSFO и дистиллятами будет очень высокой, что значительно увеличит стоимость топлива и сделает альтернативные варианты финансово привлекательными. Недостатки и преимущества использования дистиллятов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ожидаемые результаты использования морского газойля или дистиллятов

Дистиллятные топлива	
Преимущества	Недостатки
Используется для большинства конфигураций двигателей	Более высокая стоимость топлива. Может создать рабочие проблемы из-за низкой вязкости топлива

Новые совместимые низкосернистые топлива. Ожидается, что топливные смеси с низким содержанием серы будут доступны на рынке в виде различных продуктов. Однако установки для десульфурации являются очень дорогостоящими, а их монтаж, внедрение и наладка могут занять несколько лет до того, как они начнут функционировать с полной производительностью [19]. Таким образом, большинство нефтеперерабатывающих заводов предпочитают перерабатывать более высокосортные виды топлива, а не инвестировать в системы десульфурации. Можно полагать, что для удовлетворения спроса произведут новые топливные смеси, которые будут соответствовать требуемому пределу содержания серы менее 0,5 %, при снижении стоимости на 10–15 % по сравнению с прямыми дистиллятными видами топлива. Первые образцы топлива были представлены в конце 2018 г. Весьма вероятно, что при использовании новых топливных смесей возникнут проблемы совместимости и это сделает технологическую подготовку топлива очень важным процессом для безопасной эксплуатации агрегатов энергетической установки. Другие проблемы, связанные с рассматриваемым видом топлива, включают долговременную стабильность, воздействие на катализаторы и относительно низкую температуру вспышки.

Большое значение приобретает контроль качества при бункеровке, необходимый для того, чтобы обеспечить получение топлива в соответствии со спецификацией. Однако действующий стандарт топлива ISO 8217[1] [3], не охватывает все аспекты безопасности, связанные с новыми топливными смесями. Шестое издание этого стандарта, опубликованное в марте 2017 г., не предназначено и не может решить все вопросы, возникающие в связи с внедрением на рынок менее традиционных видов судового топлива с максимальной 0,1 % серой для эксплуатации в районах ECA. Технический комитет, занимающийся рассмотрением и обновлением стандарта ISO 8217 на морское топливо, а также ISO 8216 («Классификация морского топлива»), приступил к рассмотрению вопроса о следующем пересмотре в расчете на ограничение предельного содержания серы 0,5 % в 2020 г. Процесс пересмотра занимает не менее трех лет, поэтому он будет готов не ранее, чем в конце 2020 г.

[1] ГОСТ Р 54299-2010 (ИСО 8217:2010). Топлива судовые. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2012. 31 с.

В ответ на запрос IMO об обеспечении согласованности между действующими стандартами ISO по морским топливам [3] и внедрением предела содержания серы в топливе до 0,5 % Технический комитет ISO 8217 (ISO TC28/SC4/WG6) в 2019 г. планирует опубликовать общедоступную спецификацию PAS (Publicly Available Specification), озаглавленную как «Соображения относительно поставщиков топлива и пользователей в отношении качества морского топлива с учетом максимального содержания серы до 0,5 % в 2020 г.» [4]. PAS содержит инструкции (как для поставщиков топлива, так и для судовладельцев) обеспечения плавного перехода к требованиям 2020 г. Она будет промежуточной спецификацией, опубликованной до утверждения полного международного стандарта. Первоначальный срок действия PAS до трех лет, после чего она может быть продлена еще на три года или отозвана. PAS или ее элементы могут быть приняты в рамках следующего полного пересмотра ИСО 8217.

В настоящее время ISO 8217 разделен на сорта MD (Distillate Marine Fuel — судовое дистиллятное топливо), DF (Distillate FAME — Fatty Acid Methyl Esters — дистиллятное топливо на основе метиловых эфиров жирных кислот) и RM (Residual Marine — топливо для судовых установок). Имеются некоторые виды топлива, удовлетворяющие предельному уровню содержания серы 0,1 %, которые не входят в категорию дистиллятов и, следовательно, обычно продаются по остаточным морским спецификациям ISO 8217 (марки RM).

Наиболее насущные проблемы, связанные с качеством смесей с предельным содержанием серы 0,5 %, в 2020 г. будут связаны со стабильностью и совместимостью различных продуктов, и это, вероятно, будет в центре внимания. Следует разработать новые методы испытаний для получения более точной оценки стабильности и совместимости топлива. Особенности и результаты использования совместимых низкосернистых топлив приведены в табл. 3 [4].

Таблица 3

Преимущества и недостатки новых низкосернистых топлив

Новые совместимые низкосернистые топлива	
Преимущества	Недостатки
Используется для большинства конфигураций двигателей	Неизвестная стоимость топлива. Неопределенная доступность. Может создавать операционные проблемы из-за различия физико-химических характеристик или несовместимости

HSFO со скруббером SO_x. Применение HSFO по-прежнему будет возможным и после 2020 г. Однако для соответствия нормам потребуется внедрение в конструкцию газовыпускных трактов энергетической установки устройств с технологией очистки отработавших газов, широко известных как скрубберы SO_x (см., например [7]). Установка скрубберов не требует никаких изменений в конструкции двигателей энергетической установки или систем топливоподготовки и топливоподачи. Однако в целом такая модернизация силовой энергетической установки может оказаться достаточно сложной и дорогостоящей, поскольку существует значительная инвестиционная стоимость установки оборудования, которая будет суммироваться с эксплуатационными расходами, связанными с увеличением потребления энергии, возможной потребностью в химических расходных материалах, а также с затратами на обработку осадка.

Один из ключевых вопросов заключается в том, смогут ли производители скрубберов и другие поставщики связанного с этими системами оборудования обеспечить возможность производства и монтажа достаточного количества таких систем на судах до 2020 г. В долгосрочной перспективе, если разница в цене между высоко- и низкосернистым топливом окажется достаточно высокой, а опыт эксплуатации и технического обслуживания докажет целесообразность использования этих систем, то скрубберы могут стать широко распространенной технологией.

Основные преимущества и недостатки технологии представлены в табл. 4, более подробная информация о технологиях скрубберов SO_x приведена далее.

Таблица 4

Технология скрубберов SO_X

HSFO со скруббером	
Преимущества	Недостатки
Может использовать обычный HSFO. Возможно переоснащение. Уменьшает содержание твердых частиц, а также SO_x. Привлекательный бизнес-проект для определенных типов судов.	Значительные первоначальные инвестиции (2–10 млн долл.). 3–5 % штрафа за топливо. Требуется место для установки скрубберной башни и опорных систем. Возможны дополнительные затраты на химикаты. Необходима интеграция в систему управления. Требуется мониторинг.

Сжиженный природный газ (*Liquified Natural Gas — LNG*) *в качестве топлива.* Совершенно очевидным является тот факт, что использование LNG в качестве основного топлива получит новые преимущества в свете новых ограничений IMO по выбросам серы. LNG в качестве судового топлива является технически обоснованным решением, а бункеровочная инфраструктура быстро развивается по всему миру. Традиционные нефтяные топлива будут оставаться основным видом топлива для большинства существующих судов в ближайшем будущем, однако коммерческие возможности LNG перспективны главным образом для новых проектов судов, но в некоторых случаях также интересны и для проектов конверсии и модернизации. При этом перевод энергетической установки на LNG следует производить только на основе тщательного анализа разносторонней информации. И хотя подробный анализ достоинств использования газообразного топлива не является предметом рассмотрения настоящей публикации, необходимо акцентировать внимание на отдельных аспектах данной проблемы. Помимо коммерческих аспектов, основным аргументом в пользу выбора LNG в качестве замены обычных нефтяных топлив является существенное сокращение общего загрязнения воздуха от выбросов не только SO_x, но и NO_x, а также выбросов твердых частиц (Particulate Matter — PM). Полное устранение выбросов SO_x и PM — потенциальная возможность сокращения выбросов NO_x до 85 % — способствует использованию LNG особенно в зонах контроля. Кроме того, LNG может снизить выбросы парниковых газов на 10–20 % в зависимости от технологии двигателя. Таким образом, использование LNG выявляет множество преимуществ как для здоровья человека, так и для сохранения окружающей среды. Кроме того, оно также оказывает положительное влияние на коэффициент энергоэффективности судна (Energy Efficiency Design Index — EEDI) [20].

Сегодня двигатели, способные использовать газообразное топливо, охватывают широкий диапазон мощности. Таким образом, газовые двигатели, а также двухтопливные четырехтактные и двухтактные двигатели (газодизели) подходят практически для всех типов судов. Преимущества и недостатки использования LNG приведены в табл. 5.

Таблица 5

Преимущества и недостатки использования LNG

LNG в качестве топлива	
Преимущества	Недостатки
Имеет хорошие экологические показатели. Может достигать требований уровня NO_x Tier III. Положительное влияние на EEDI.	Высокие инвестиционные затраты (3–30 млн долл. Дорогостоящее дооснащение / модернизация. Большие региональные различия по ценам LNG. Возможность появление в отработавших газах метана. Требуется место и условия для хранения. Некоторым типам двигателей необходимы дополнительные средства для достижения уровня NO_x Tier III. Взрывоопасен.

Другие альтернативные виды топлива. Существует множество новых видов топлива, которые также могут рассматриваться в качестве вариантов соответствия требованиям по глобальному ограничению выбросов серы. Наиболее распространенными являются метанол, различные виды биотоплива и сжиженный газ — пропан-бутановые смеси — Liquified Petroleum Gas (LPG)). Считается, что указанные виды топлив очень мало влияют на мировой рынок, но они могут рассматриваться как альтернативные варианты в случаях, когда их поставки легко осуществимы. В настоящее время существует несколько судов, работающих на метаноле в качестве основного топлива, и, как минимум, два газовоза сжиженного газа, которые используют LPG в качестве топлива. И тем не менее для перехода на эти виды топлива (помимо некоторых видов биотоплива) потребуется адаптация двигателей, а также создание специфичных топливных систем и систем управления.

Для небольших судов с малой дальностью плавания технически осуществимым решением являются двигатели или топливные элементы, работающие на водороде, а также можно рассматривать электроаккумуляторные системы. Такие энергетические установки уже находятся в эксплуатации и обеспечивают преимущества операций с нулевым уровнем выбросов. К примеру, в эксплуатации уже находятся паромы с батарейным питанием, а паровые паромы с водородным двигателем планируется построить в ближайшие два-три года в Норвегии, Шотландии и Калифорнии.

Различные варианты конструктивного исполнения систем очистки отработавших газов. Использование технологии скрубберов в составе судовых энергетических установок получило распространение с момента внедрения зон SECA в Европе и в Северной Америке в 2015 г. [4]. Удаление выбросов SO_x из отработавших газов до или ниже предельных значений выбросов, предусмотренных в MEPC.259 (68), считается полным эквивалентом требований, указанных в регламенте 4 прил. VI к MARPOL [12]. Применение скрубберов приводит к существенному увеличению рабочей нагрузки экипажа, требуя усилий по эксплуатации и техническому обслуживанию и являясь в то же время весомой альтернативой для использования малосернистых топлив. При этом следует отметить, что решения по установке скруббера в основном обусловлены привлекательными сроками окупаемости.

Скрубберы нейтрализуют серу в отработавших газах абсорбентом, в качестве которого могут использоваться различные поглотители [7]. Исходя из этого технологии нейтрализации обычно классифицируются как «мокрые» или «сухие» системы. «Мокрые» системы, использующие морскую воду в качестве поглотителя, известные как скрубберы с открытым циклом (Open-Loop), на сегодняшний день являются наиболее используемой и востребованной конструкцией. Большинство поставщиков также предлагают замкнутые и гибридные системы с использованием каустической соды или гидроксида магния в качестве абсорбента (табл. 6). «Сухие» системы используют реагенты в сухой форме, например, известь. «Сухие» системы могут состоять из неподвижного или псевдоожиженного слоя, способствующего установлению более полного контакта между газообразной и твердой фазами. В такой конструкции, возможно, потребуется дополнительная установка фильтров для удаления твердых частиц из обработанных в скруббере газов.

Таблица 6

Реагенты скрубберов с замкнутым циклом

Мокрый / влажный адсорбер	Сухой адсорбер
Морская вода	Известь
Каустическая сода	–
Гидроксид магния	–

Скрубберы должны соответствовать требованиям ограничения выбросов вредных веществ как в атмосферу, так и со скрубберной водой, участвующей в очистке отработавших газов. Руководства IMO для систем очистки выхлопных газов MEPC.259 (68) [12] предлагают две возможности для сертификации систем:

– схема *A* предлагает возможность одобрить отдельные системы, серии аналогичных систем или ассортимент продукции (аналогичные конструкции с различной емкостью) и продемонстрировать соответствие посредством непрерывного мониторинга эксплуатационных параметров и выборочных проверок выбросов;

– для схемы B соответствие соблюдается с помощью непрерывных измерений выбросы и проверки параметров.

Способы сертификации по схеме *A* требуют обширных полномасштабных испытаний выбросов в условиях длительной эксплуатации. Большинство систем, установленных до сих пор, следуют схеме *B*, требуя непрерывных измерений выбросов SO_2, CO_2 и качества воды для очистки (рис. 2). Мониторинг качества воды для очистки включает непрерывные измерения pH, полициклических ароматических углеводородов (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)) и мутности (единицы измерения мутности 1FNU — Formazine Nephelometric Unit или 1NTU — Nephelometric Turbidity Unit).

Качество используемого топлива при контроле выбросов SO_2 в атмосферу оценивается значениями отношения SO_2 в отработавших газах, выраженного в ppm (Parts Per Million), к выбросу CO_2 в объемных процентах, как это показано на рис. 2. Контрольные значения указанного соотношения могут служить критериями качества очистки отработавших газов в скруббере при использовании HSFO. Анализ и требования к выбросам в забортную воду обеспечиваются на основе разницы измерений показателей pH забортной воды и воды на выходе из скруббера в четырехметровой зоне вокруг сливной трубы. Аналогичным образом выполняется контроль мутности воды и содержания полициклических ароматических углеводородов, при этом изменение PAH не должно превышать 50 мг/л, а мутность воды не должна увеличиваться более чем на 25 FNU или NTU (1 FNU = 1 NTU). Кроме того, промывочная вода скруббера должна быть проанализирована на содержание нитратов при вводе в эксплуатацию и каждом повторном обследовании.

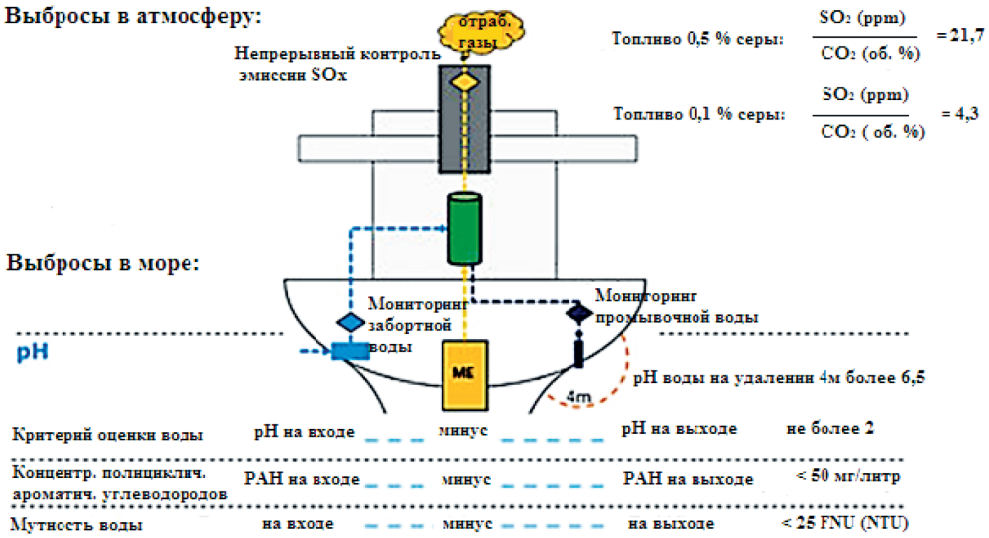


Рис. 2. Общая структура мониторинга

В целях формирования более полного представления о технических возможностях концепции технологии очистки отработавших газов от соединений серы рассмотрим возможные варианты конструкций таких систем и устройств.

Системы с открытым контуром (*циклом*). Данные системы являются наиболее простыми по конструкции и дешевыми в части монтажа и эксплуатации. Для нейтрализации серы в отработавших газах системы используют естественную щелочность морской воды. Эти системы могут удовлетворять требованиям потребления топлива с содержанием серы от 0,5 до 0,1 % и использоваться во всех областях с достаточной щелочностью морской воды, за исключением

случаев, когда существуют ограничения на сброс скрубберной воды [7]. Концепция скруббера с открытым контуром показана на рис. 3. В открытой системе большие объемы морской воды закачиваются в скрубберную башню, которая предназначена для обеспечения достаточного времени удержания отработавших газов. Распылительные сопла распыляют забортную морскую воду для максимальной нейтрализации кислых газов в объеме скруббера. Вода после очистки отработавших газов сливается со дна скрубберной башни и выводится за пределы корпуса судна через сливные трубы.

Некоторые системы с открытым контуром могут включать в конструкцию оборудование для очистки воды, прошедшей через скруббер. Достоинства и недостатки конструкции скруббера с открытым циклом представлены в табл. 7.

Таблица 7

Преимущества и недостатки скруббера с открытым циклом

Скруббер с открытым контуром	
Преимущества	Недостатки
Простота конструкции (более низкая стоимость). Использует морскую воду непосредственно из моря, не требуется никаких опасных химикатов.	Не допускается в некоторых портах и зонах. Не подходит для солоноватой и пресной воды. Для соответствия требованиям воды по pH в США требуется «разбавляющий» насос.

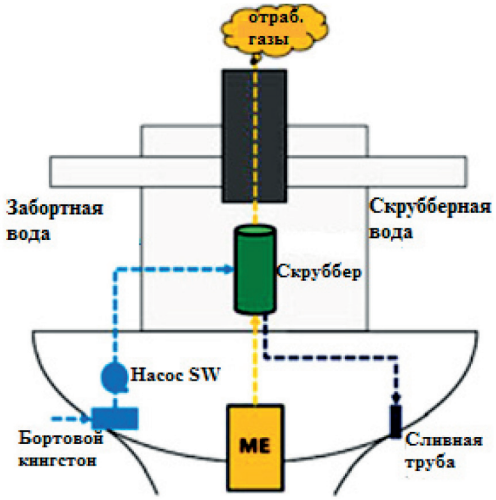


Рис. 3. Скруббер с открытым контуром

Замкнутые / гибридные системы. Система с замкнутым контуром, схема которой показана на рис. 4, обеспечивает возможность работы скруббера в зонах с ограничениями на выпуск промывочной воды или с низкой щелочностью морской водой. В замкнутой системе технологическая вода циркулирует из бака технологической воды через башню и обратно в резервуар. Технологическую воду охлаждают в теплообменнике для уменьшения испарения. Техническая вода судна добавляется в технологическую воду для компенсации испарения промывочной воды, в то время как щелочь добавляется для поддержания щелочности. Некоторая часть технологической воды сливается и обрабатывается с помощью центрифуг или химикатов. Обработанная технологическая вода переносится в накопительный резервуар и выгружается, когда это разрешено, а осадок переносится в резервуар для осадка.

Некоторые системы могут работать как по открытому, так и по замкнутому циклу и называются *гибридными скрубберами*, что обеспечивает повышенную гибкость при работе во всех областях независимо от щелочности морской воды или правил, ограничивающих использование скрубберов с открытым циклом.

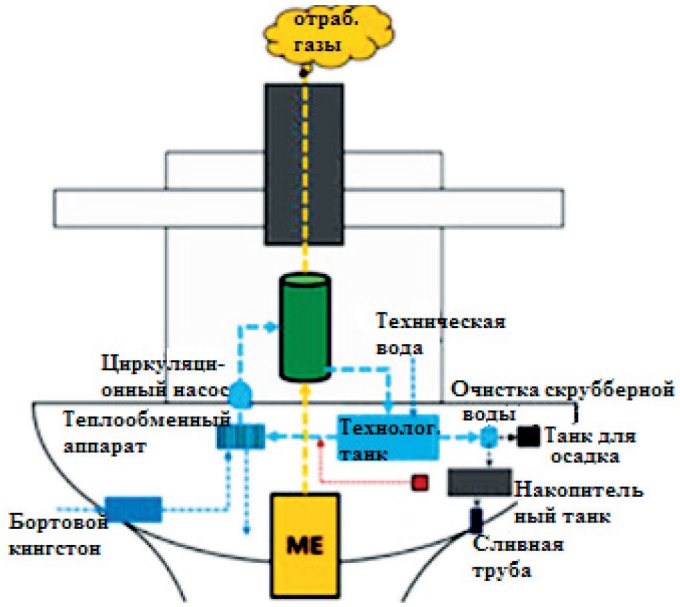


Рис. 4. Скруббер с замкнутым контуром

Описание преимуществ и недостатков гибридных и скрубберов с замкнутым циклом приведено в табл. 8.

Таблица 8

Недостатки и преимущества гибридных и скрубберов с замкнутым циклом

Скруббер с замкнутым контуром	
Преимущества	Недостатки
Повышенная гибкость в эксплуатации. Может работать во всех областях, независимо от щелочности или температуры морской воды.	Повышенная сложность конструкции (более высокие затраты). Требуется постоянная подача щелочной среды (NaOH является опасным и требует специальной обработки).

Типы одноканальных и многоканальных скрубберов. Помимо рассмотренных конструктивных особенностей систем очистки отработавших газов от оксидов серы, можно выделить еще одну компоновочную особенность, которая разделяет скрубберы на одно- и многоканальные. В том случае, если скруббер производит очистку отработавших газов от одного двигателя и имеет только один вход, он является одноканальным (рис. 5).

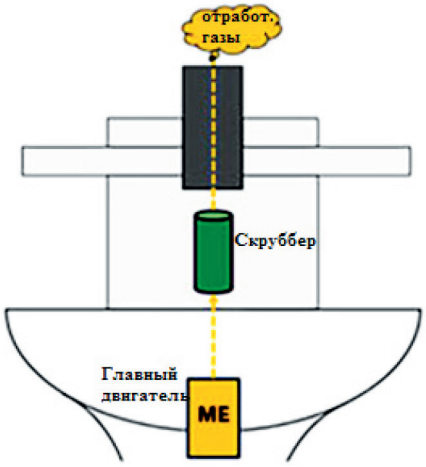


Рис. 5. Одноканальная система скруббера

В тех случаях, когда одним скруббером производится обработка газов от нескольких двигателей, включенных в состав судовой энергетической установки, скруббер должен иметь несколько входов и он считается многоканальным (рис. 6).

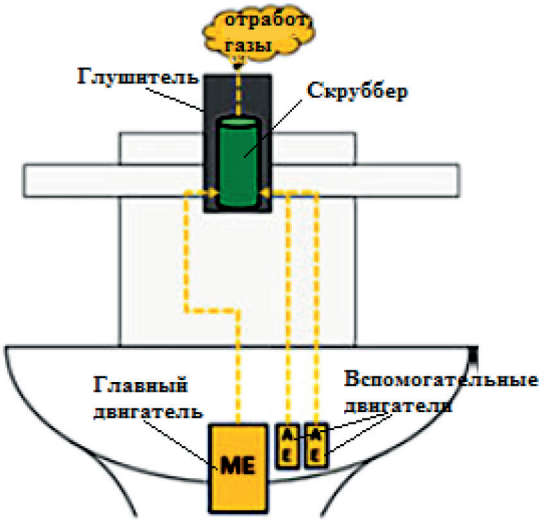


Рис. 6. Система скруббера с несколькими входами

В табл. 9 показаны преимущества и недостатки такой схемы компоновки.

Таблица 9

Одноканальный скруббер

Одноканальная система скруббера	
Преимущества	Недостатки
Малая занимаемая площадь, если башня может заменить глушитель. Низкий центр тяжести, уменьшающий воздействие на устойчивость. Более низкое потребление энергии. Предназначен для поддержания сухого хода (не допускается в некоторых портах и зонах).	Возможна более сложная установка башни. Требует дополнительных башен для покрытия большего количества двигателей.

Вне зависимости от количества входов, конструктивно скруббер может быть совмещен с глушителем, как это показано на рис. 6. Преимущества и недостатки многоканальных скрубберов сведены в табл. 10.

Таблица 10

Многоканальные скрубберы

Скрубберы с несколькими входами	
Преимущества	Недостатки
Может обрабатывать несколько потоков отработавших газов в одной скрубберной башне. Возможна более простая установка. Обычно более экономичное решение для всех двигателей, объединенных в энергетическую установку.	Возможно, более сложная маршрутизация трубопроводов. Требует обходных решений.

Необходимо отметить, что в настоящее время существует достаточно большое количество способов и мер по решению проблемы выбросы оксидов серы. Это обстоятельство ставит судов-

ладельцев перед непростым выбором средств по достижению соответствия с 2020 г. новым требованием IMO по ограничению содержания серы в используемом топливе. Выбор способа соответствия новым требованиям IMO представляется сложной организационно-технической проблемой, требующей всестороннего анализа достаточно большого числа факторов влияния.

Выводы (Conclusions)

1. Новые требования IMO вступают в силу с 2020 г. и будут действовать во всех международных водах, затрагивая интересы судовладельцев более 70 тыс. судов.

2. Требование по ограничению содержания серы в используемом топливе до 0,5 % в международных водах вводится в дополнение к действующим ограничениям в 0,1 % в североамериканских и американских районах Карибского бассейна, Северного и Балтийского морей и других районах SEKA.

3. Сокращение выбросов SO_x требует специфических решений, главными из которых являются:

– переход с высокосернистого мазута (HSFO) на морской газойль (MGO) или дистилляты;

– использование топлива с очень низким содержанием серы или совместимых топливных смесей (0,5 % серы);

– дооборудование судов для использования альтернативных видов топлива, таких как СПГ или другие виды, не содержащие серы;

– установка систем очистки отработавших газов (скрубберов), что позволяет работать с обычным HSFO.

4. Выбор технологии сокращения выбросов серосодержащих продуктов на основе имеющихся альтернативных вариантов должен производиться на основе всестороннего анализа следующих факторов влияния:

– тип и размер судна, его эксплуатационные характеристики;

– доступные виды топлива в разные сроки, а также сложность энергетической установки;

– интенсивность и эффективность эксплуатации и оставшийся срок службы судна и др.

Подробное рассмотрение этих вопросов выходит за рамки данной публикации, но представляет известный интерес и может являться предметом отдельного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sulphur 2020 — cutting sulphur oxide emissions [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx (дата обращения: 15.09.2018).

2. Guidance to Shipping Companies and Crews on Preparing for Compliance with the 2020 ‘Global Sulphur Cap’ for Ships’ Fuel Oil in Accordance with MARPOL Annex VI. — London: Marisec Publications, 2019. — 36 p.

3. ISO statement on ISO 8217 and IMO 2020 0,50 % Sulphur fuels [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://shipandbunker.com/news/world/482202-iso-statement-on-iso-8217-and-imo-2020-0,50-sulphur-fuels (дата обращения: 01.12.2018).

4. Global Sulphur Cap 2020 — extended and updated [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https: // www.dnvgl.com/maritime/publications/global-sulphur-cap-2020.html (дата обращения: 22.10.2018).

5. What you need to know: The 2020 IMO fuel sulphur regulation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.seatrade-maritime.com/images/PDFs/SOMWME-whitepaper_Sulphur-p2.pdf (дата обращения: 16.09.2018).

6. *Семенова И. В.* Промышленная экология: учеб. пособие для студ. вузов / И. В. Семенова. — М.: Академия, 2009. — 528 с.

7. *Латухов С. В.* Проблемы экологической безопасности судоходства: монография / С. В. Латухов [и др.]. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 160 с.

8. *Семанов Г. Н.* Вредные выбросы в атмосферу от судов: на пути к стандартам ИМО / Г. Н. Семанов // Наука и транспорт. Морской и речной транспорт. — 2013. — № 1 (5). — С. 45–47.

9. *Тимофеев О. Я.* Особенности внедрения новых требований к экологической безопасности судов и морских установок в северных морях и на арктическом шельфе / О. Я. Тимофеев, Н. А. Вальдман, М. И. Крыжевич // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 3 (15). — С. 79–85.

10. SECA Assessment: Impacts of 2015 SECA marine fuel sulphur limits. First drawings from European experiences. — Delft: CE Delft, 2016. — 45 p.

11. *Живлюк Г. Е.* Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

12. Resolution MEPC.259(68) (adopted on 15 May 2015) 2015 Guide-lines for exhaust gas cleaning systems. — 23 p.

13. *Новиков Е. А.* Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов / Е. А. Новиков // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. — 2008. — № 1. — С. 28–33.

14. *Новиков Е. А.* Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов (Методы, основанные на окислении серы и последующем определении оксидов) / Е. А. Новиков // Там же. — 2008. — № 3. — С. 27–32.

15. *Новиков Е. А.* Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов (Методы по определению серы в нефтепродуктах при помощи рентгеновского излучения) / Е. А. Новиков // Там же. — 2008. — № 4. — С. 20–29.

16. *Новиков Е. А.* Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов (Методы атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) / Е. А. Новиков // Там же. — 2008. — № 5. — С. 26–33.

17. Энергоресурсы, топливо // Сорта нефти. Маркерный стандарт, бенчмарк. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://neftegaz.ru/tech_library/view/4758-Sorta-nefti.-Markernyj-standart-benchmark (дата обращения: 15.03.2016).

18. *Орлов Е. И.* Стандартизация в отрасли судового, тепловозного и промышленного двигателестроения / Е. И. Орлов, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 138–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-138-156.

19. *Леонтьева А. И.* Очистка дизельного топлива. Десульфуризация адсорбционным методом / А. И. Леонтьева [и др.] // Деловой журнал Neftegaz.RU. — 2018. — № 8. — С. 62–70.

20. *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.

REFERENCES

1. Sulphur 2020 — cutting sulphur oxide emissions. Web. 15 Sept. 2018 <http://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx>.

2. *Guidance to Shipping Companies and Crews on Preparing for Compliance with the 2020 'Global Sulphur Cap' for Ships' Fuel Oil in Accordance with MARPOL Annex VI.* London: Marisec Publications, 2019.

3. ISO statement on ISO 8217 and IMO 2020 0,50 % Sulphur fuels. Web. <https://shipandbunker.com/news/world/482202-iso-statement-on-iso-8217-and-imo-2020-0,50-sulphur-fuels>.

4. Global Sulphur Cap 2020 — extended and updated. Web. 22 Oct. 2018 <https://www.dnvgl.com/maritime/publications/global-sulphur-cap-2020.html>.

5. What you need to know: The 2020 IMO fuel sulphur regulation. Web. 16 Sept. 2018 <http://www.seatrade-maritime.com/images/PDFs/SOMWME-whitepaper_Sulphur-p2.pdf>.

6. Semenova, I. V. *Promyshlennaya ekologiya: ucheb, posobie dlya stud. vyssh. ucheb, zavedenii*. M.: Akademiya, 2009.

7. Latukhov, S. V., V. A. Nikitin, V.N. Okunev, et al. *Problemy ekologicheskoi bezopasnosti sudokhodstva: monografiya*. SPb: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2015.

8. Semanov, G. N. "Vrednye vybrosy v atmosferu ot sudov: na puti k standartam IMO." *Nauka i transport. Morskoi i rechnoi transport* 1(5) (2013): 45–47.

9. Timofeev, O. Ya., N. A. Valdman, and M. I. Kryzhevich. "Specifics of Implementation of New Environmental Safety Requirements for Ships and Offshore Installations in Northern Seas and on the Arctic Shelf." *Arctic: Ecology and Economy* 3(15) (2014): 79–85.

10. *SECA Assessment: Impacts of 2015 SECA marine fuel sulphur limits. First drawings from European experiences*. Delft: CE Delft, 2016.

11. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

12. *Resolution MEPC. 259(68) (adopted on 15 May 2015) 2015 Guide-lines for exhaust gas cleaning systems*.

13. Novikov, E. A. "Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov." *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 1 (2008): 28–33.

14. Novikov, E. A. "Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov (Metody, osnovannye na okislenii sery i posleduyushchem opredelenii oksidov) (Prodolzhenie. Nachalo stat'i v №1, 2008)." *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 3 (2008): 27–32.

15. Novikov, E. A. "Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov (Metody po opredeleniyu sery v nefteproduktakh pri pomoshchi rentgenovskogo izlucheniya) (Prodolzhenie. Nachalo v №1, 2008g.)." *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 4 (2008): 20–29.

16. Novikov, E. A. "Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov (Metody atomno-emissionnoi spektrometrii s induktivno svyazannoi plazmoi (AES-ISP)." *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 5 (2008): 26–33.

17. Energoresursy, toplivo // Sorta nefti. Markernyi standart, benchmark. Web. 15 March 2016 <https://neft-egaz.ru/tech_library/view/4758-Sorta-nefti.-Markernyj-standart-benchmark>.

18. Orlov, Evgenij Ivanovich, Aleksandr Pavlovich Petrov, and Gregory Evgenyevich Zhivlyuk. "Standardization in the industry of ship, locomotive and industrial engine." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 138–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-138-156.

19. Leont'eva, A. I., A. V. Vyzhanov, N. N. Balobaeva, K. Kh. K. Al'-Fadkhli, and A. Ch. A. Al'mansuri. "Ochistka dizel'nogo topliva. Desul'furizatsiya adsorbtsionnym metodom." *Delovoi zhurnal Neftegaz.RU* 8 (2018): 62–70.

20. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivljuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudar-stvennogo 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/.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Петров Александр Павлович — кандидат технических наук, доцент 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*	**Petrov, Aleksandr P.** — PhD, associate 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*
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*	**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*

Статья поступила в редакцию 29 января 2019 г.
Received: January 29, 2019.

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

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-146-155

COMPUTER SIMULATION OF A HIGH-FREQUENCY SIGNAL PROPAGATION IN THE SHIP'S HIGH-VOLTAGE ELECTRO-ENERGY SYSTEM

S. Y. Kuznetsov, D. M. Makarov

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

The computer modeling of changes in the shape and amplitude of a high-frequency signal at its propagation in the ship high-voltage cables is considered in the paper. The computer simulation was carried out on the basis of the real parameters of the ship high-voltage electric power system of gas carrier vessel Corcovado LNG. On the basis of the ship's technical documentation, it was concluded that the overwhelming number of the electricity receivers are connected to high-voltage switchboards using cables of 60 meters long. Only cargo pumps for liquid natural gas have a cable length of 200 meters. Thus, the computer simulation of a high-frequency signal propagation is performed in the ship high-voltage cables of 60 and 200 meters long. A theoretical description of change in the shape and the amplitude of a high-frequency signal at its propagation is presented using mathematical equations. The simulation is produced in Matlab/Simulink program. The cables of 60 and 200 meters long are described by means of a quadripole (RLCG section). The cable parameters and other simulation parameters are set in the program dialog window. Based on the obtained simulation results, the additional mathematical calculations were performed to obtain the attenuation coefficient and the propagation constantan. The graphs show the dependence of the change in the shape and the amplitude of the high-frequency signal on its frequency, taking into account the influence of the cable length. As a result, on the basis of the computer simulation, it was concluded that a partial discharge with a frequency of 30 MHz can be successfully measured in the high-voltage cable of 60 m long and a partial discharge with the frequency of 10 MHz can be measured in the high-voltage cable of 200 m long.

Keywords: partial discharge, cable, computer simulation, RLCG section, gas carrier, attenuation coefficient, distribution coefficient, high voltage, Matlab.

For citation:
Kuznetsov, Sergey Ye., and Daniil M. Makarov. "Computer simulation of a high-frequency signal propagation in the ship's high-voltage electro-energy system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 146–155. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-146-155.

УДК 621.3.048.004.58

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА В СУДОВОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

С. Е. Кузнецов, Д. М. Макаров

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

В статье рассмотрено компьютерное моделирование изменения формы и амплитуды высокочастотного сигнала при его распространении в судовых высоковольтных кабелях. Компьютерное моделирование произведено на основании реальных параметров судовой высоковольтной электроэнергетической системы судна танкера-газовоза Corcovado LNG. На основании судовой технической документации сделан вывод о том, что подавляющее количество приемников электроэнергии соединяются с распределительны-

ми высоковольтными щитами с помощью кабелей длиной 60 м. Только грузовые насосы для перекачки природного газа имеют длину кабеля 200 м. Таким образом, компьютерное моделирование распространения высокочастотного сигнала произведено в судовых высоковольтных кабелях длиной 60 и 200 м. С помощью математической и компьютерной модели представлено теоретическое описание изменения формы и амплитуды высокочастотного сигнала при его распространении в кабельных линиях. Моделирование произведено в программе Matlab / Simulink. Кабели длиной 60 и 200 м описываются посредством четырехполюсника (RLCG секция). В диалоговом окне программы задаются параметры кабеля и другие параметры моделирования. На основании полученных результатов моделирования произведены дополнительные математические расчеты для получения коэффициента затухания и константы распространения. Отображены графически зависимости и формы и амплитуды высокочастотного сигнала от его частоты с учетом влияния длины кабеля. В результате на основании проведенного компьютерного моделирования сделан вывод о том, что частичный разряд частотой 30 МГц может быть измерен в кабеле длиной 60 м и частотой 10 МГц — в кабеле длиной 200 м.

Ключевые слова: частичный разряд, кабель, компьютерное моделирование, RLCG секция, танкер-газовоз, коэффициент затухания, коэффициент распространения, высокое напряжение, Matlab.

Для цитирования:
Кузнецов С. Е. Компьютерное моделирование распространения высокочастотного сигнала в судовой высоковольтной электроэнергетической системе / С. Е. Кузнецов, Д. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 146–155. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-146-155.

Введение (Introduction)

Международный стандарт IEC 60270[1] и ГОСТ 20074–83[2] называют *частичный разряд* (ч. р.) локальным электрическим разрядом, который шунтирует часть изоляции в электроизоляционной системе. На возникновение ч. р. оказывает влияние множество факторов, таких, например, как структура изоляции, наличие неоднородностей электрического поля, температура, увлажнение электрической изоляции, вибрация и др. Частичные разряды имеют локальный характер возникновения и являются следствием концентрации электрической напряженности поля в изоляции или на ее поверхности, превышающей электрическую прочность изоляции в месте возникновения и происходят мгновенно. Как правило, время ч. р. нарастания измеряется от 1 до 10 нс, а частота составляет от кГц до десятков МГц [1]. Таким образом, они относятся к высокочастотным сигналам.

Известно, что высокочастотный сигнал, распространяясь в проводнике, изменяет свою форму и амплитуду в зависимости от пройденного расстояния и влияния частотной составляющей [2]. Для определения изменения формы сигнала в реальных объектах и кабелях используется *принцип отражения сигнала* (Time Domain Reflectometry). Основная суть данного принципа заключается в искусственном введении импульса напряжения заведомо известного значения в кабель длиной L и снятии значения отраженного сигнала от противоположного конца с помощью датчика (катушки индуктивности). Так, в работе [3] приведены результаты изменения формы сигнала в зависимости от расстояния до места частичного разряда, что позволяет определить расстояние до места возникновения ч. р. в электрической изоляции.

В данной статье для того чтобы определить изменение формы частичного разряда при его распространении с учетом судовых условий вместо реального диагностического оборудования, используется компьютерное моделирование в программе Matlab / Simulink на основании разработанной модели с учетом параметров, характеризующих высоковольтные судовые кабели [4].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Передающие линии с распределенными и сосредоточенными параметрами. При рассмотрении электромагнитных колебаний особенно важным является соотношение между геометрическими размерами, характеризующими передающую линию (кабель), и длиной волны λ передаваемого

[1] IEC 60270. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. IEC, 2000. 96 с.

[2] ГОСТ 20074–83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. М.: Изд-во стандартов, 1983. 24 с.

сигнала. Данное соотношение учитывается при анализе распространения сигналов в линиях. Так, линия длиной l = 500 м, по которой передается напряжение с частотой 50 Г, будет относиться к линии с сосредоточенными параметрами, при анализе которой не учитывается изменение формы и амплитуды сигналов по мере их распространения, ввиду того что $\lambda >> l$. Если по линии длиной l = 500 м передается напряжение частотой от нескольких мегагерц и выше, то линия уже будет считаться с распределенными параметрами $\lambda << l$, в которой необходимо учитывать изменения формы и амплитуды сигнала по мере его распространения. Таким образом, одна и та же передающая линия может рассматриваться как линия с сосредоточенными параметрами, так и с распределенными в зависимости от частоты сигнала.

Как отмечалось ранее, ч. р. имеют широкий частотный спектр с преобладанием высоких частот, что экспериментально доказано при измерении ч. р. на реальном высоковольтном электрооборудовании и в кабелях [5], [6]. Соответственно при рассмотрении изменения формы и амплитуды ч. р., по мере распространения сигнала, необходимо воспользоваться схемой замещения проводника с распределенными параметрами. Такая передающая линия длинной l может быть представлена в виде четырехполюсника, схема замещения которого представлена на рис. 1.

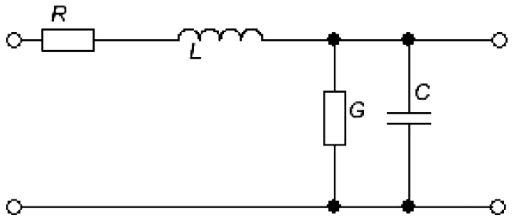


Рис. 1. Схема замещения четырехполюсника

Четырехполюсник описываются при помощи параметров ABCD, которые, в свою очередь, зависят от длины линии (l), константы распространения (γ), волнового сопротивления линии (Z_0), сопротивления (R), индуктивности (L), емкости (C) и проводимости (G) [7]. Параметры $ABCD$ и волновое сопротивление линии (Z_0) определяются по формулам:

$$A = \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2};$$

$$B = \frac{Z_0(e^{\gamma l} - e^{-\gamma l})}{2};$$

$$C = \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2Z_0};$$

$$D = \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2};$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}.$$

Уравнение однородной линии. Предположим, что секция однородного проводника (рис. 1) имеет длину Δx и представляет собой одну секцию линии. Тогда параметры проводящей линии будут: $R(\Delta x)$, $L(\Delta x)$, $G(\Delta x)$, $C(\Delta x)$. Распространение волн напряжения и тока в проводнике с распределенными параметрами описывается «телеграфными уравнениями» [7]. Основные уравнения такого проводнике представлены ниже.

Уменьшение значения напряжения в конце проводника по сравнению с значением в начале вызвано падением напряжения на индуктивности L и сопротивлении R:

$$\Delta u = -L(\Delta x)\frac{\partial i}{\partial t} - R(\Delta x)i.$$

Уменьшение значения тока в конце проводника происходит за счет разделения тока и прохождения его через емкость C и проводимость G:

$$\Delta i = -C(\Delta x)\frac{\partial u}{\partial t} - G(\Delta x)u.$$

Если разделить обе части на Δx при $\Delta x \to 0$, получим «телеграфные уравнения»:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L\frac{\partial i}{\partial t} - Ri;$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C\frac{\partial u}{\partial t} - Gu.$$

При режиме установившихся синусоидальных колебаний уравнения примут вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -(R + j\omega L)i;$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -(G + j\omega C)u.$$

Таким образом, из уравнений видно, что на значение тока и напряжения в проводнике оказывает влияние угловая частота ω, которая, в свою очередь, зависит от частоты f анализируемого сигнала.

Уменьшение амплитуды сигнала и изменение его формы описываются вещественной и мнимой частями частотно-зависимой константы распространения γ (ω) [8]:

$$\overline{\gamma}(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta,$$

где R — сопротивление проводника;

L — индуктивность проводника;

G — проводимость проводника;

C — емкость проводника;

ω — угловая частота;

α — коэффициент затухания амплитуды импульса (1 Нп = 8,086 дБ);

β — коэффициент фазового угла.

Коэффициент затухания α, дБ, в конце проводящей линии определяется по формуле [9]:

$$\alpha = 20\lg\frac{U_x}{U_l},$$

где U_l — напряжение на расстоянии ;

U_x — напряжение в начале линии;

l — длина линии.

При моделировании распространения сигнала в судовом высоковольтном проводнике (кабеле), параметры R, L, C были взяты из судовой технической документации [4]. Значение проводимости кабеля рассчитывается по формуле

$$G = 2\pi f C \operatorname{tg}\delta,$$

где tg δ = 0,007 — угол диэлектрических потерь;

f — частота питающего напряжения;

C — емкость проводника:

Угловая частота ω определяется по формуле

$$\omega = 2\pi f,$$

Моделирование в Matlab / Simulink. Matlab и его главное расширение Simulink поставляются в едином программном комплексе, представляя в совокупности мощный вычислительный инструмент с широкими возможностями моделирования и анализа полученных результатов. Matlab поддерживает множество других пакетов, например, пакеты для моделирования линейных и не-

линейных динамических систем [10]–[12], что, в свою очередь, еще больше увеличивает возможности программы.

Для того чтобы моделировать и исследовать изменение формы и амплитуды сигнала по мере его распространения, необходимо с учетом схемы замещения (см. рис. 1) собрать моделирующую схему. Участок проводящей линии (кабель) представляет собой четырехполюсник (*RLCG* секцию). Моделирующая схема в Matlab представлена на рис. 2.

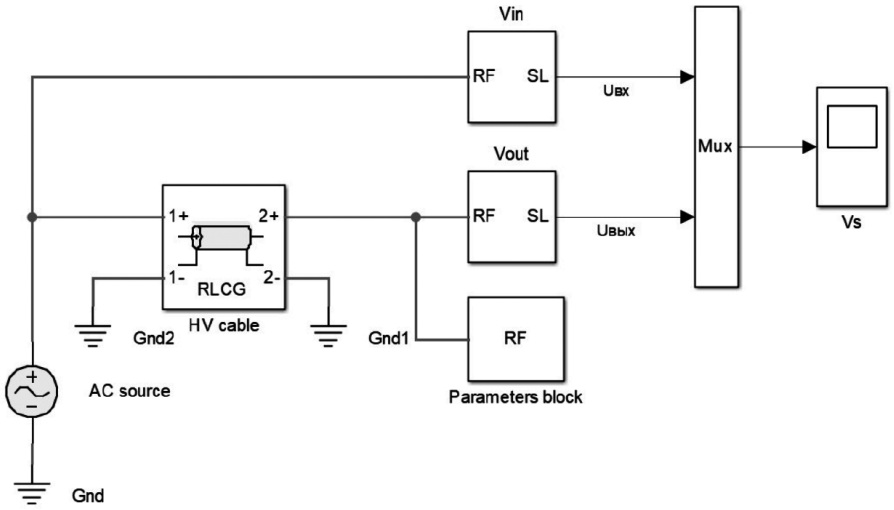
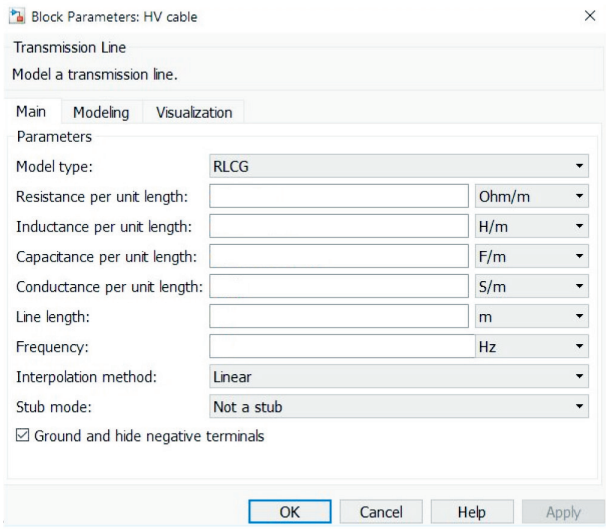


Рис. 2. Моделирующая схема

Моделирующая схема состоит из следующих элементов:

– *RLCG* секция (*HV cable*) — служит для описания исследуемого проводника (высоковольтного кабеля). В данной секции задаются следующие параметры: частота, при которой взяты (рассчитаны) параметры *RLCG* (60 Гц), сопротивление (*R*), индуктивность (*L*), емкость (*C*), проводимость (*G*), длина проводника, режимы секции. На рис. 3, *а* приведено диалоговое окно, в котором задаются параметры.

а)



б)

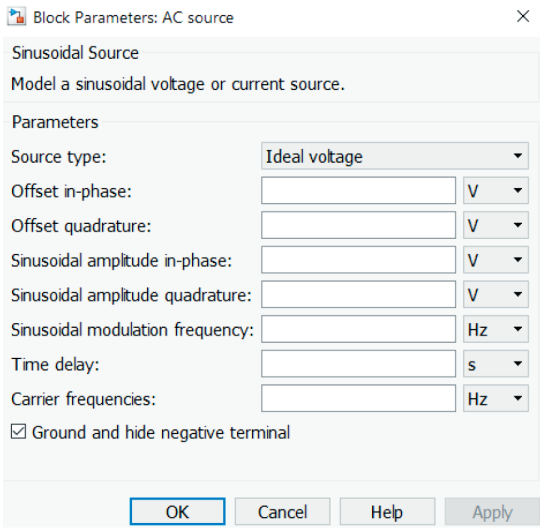


Рис. 3. Диалоговое окно задания параметров:
а — в *RLCG* секции; *б* — в источнике напряжения

AC source — источник для задания напряжения, частоты и начального значения фазового угла, на рис. 3, *б* приведено диалоговое окно, в котором задаются параметры.

Блоки *Vin* и *Vout* — служат для снятия значений напряжения на входе секции и на выходе соответственно.

Vs (осциллограф) — служит для графического отображения результатов моделирования.

Parameters block — служит для задания дополнительных параметров моделирования.

Gnd — предназначен для заземления выводов.

На основе анализа судовой документации [13] можно сделать вывод о том, что подавляющее количество приемников и источников электроэнергии судовой высоковольтной электроэнергетической системы (СВЭЭС) соединяются с распределительными щитами высоковольтными кабелями длиной 60 м и только некоторые приемники, питающиеся от грузового распределительного щита, имеют длину кабельных трасс 200 м. Таким образом, для исследования изменения формы и амплитуды сигнала по мере его распространения могут быть рассмотрены мощные кабели [14] длиной 60 м и 200 м с диаметром 95 мм^2 в обоих случаях. При этом, так как коэффициент затухания зависит только от параметров линии и частоты сигнала, при моделировании с целью сравнительного анализа для всего диапазона рассматриваемых частот принято одинаковое напряжение 3300 В. Параметры, характеризующие эти кабели:

Питающее напряжение, В.....3300
Частота введенного импульса напряжения, МГц.....от 0 до 100
Сопротивление линии, Ом/м 0,000284
Индуктивность линии, мГн/м.....0,000000355
Емкость линии, мкФ/м.....0,000000000411
Проводимость линии, См/м 0,000000001084
Длина линии, м.....60 и 200
Площадь поперечного сечения
высоковольтного кабеля, мм^2.....95

Результаты (Result)

Полученные результаты расчета константы распространения γ и коэффициента затухания при частоте напряжения *f* для кабелей длиной 200 м и 60 м сведены в табл. 1.

Таблица 1

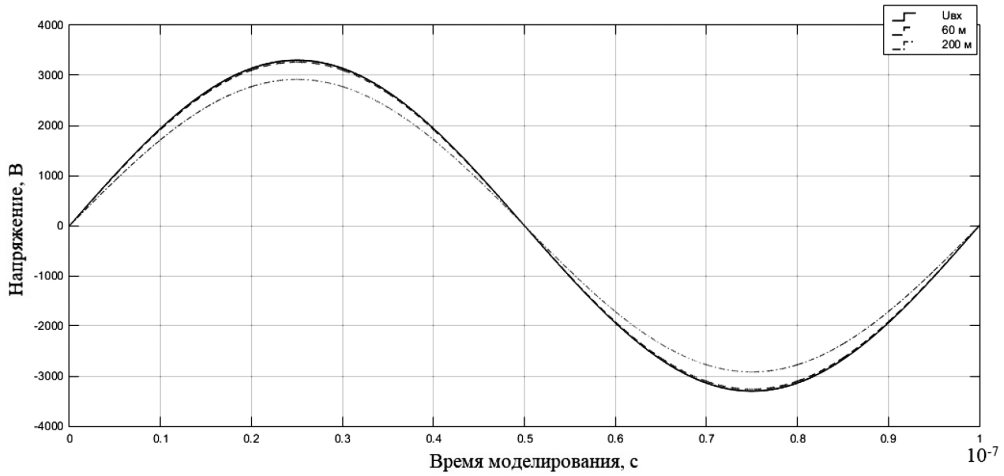
Рассчитанные параметры распространения для кабелей длиной 200 м и 60 м

Частота напряжения *f*, МГц	Константа распространения γ	Коэффициент затухания , дБ	
		Кабель 200 м	Кабель 60 м
0	0	0	0
0,001	0,000005 + 0,00007*j*	0	0
0,005	0,000006 + 0,0003*j*	0	0
0,009	0,000007 + 0,0006*j*	0	0
0,03	0,000012 + 0,002*j*	0	0
0,09	0,000028 + 0,007*j*	0	0
0,27	0,000076 + 0,02*j*	0	0
0,8	0,00021 + 0,061*j*	0,008	0
1,5	0,0004 + 0,114*j*	0,021	0,003
2	0,00053 + 0,152*j*	0,037	0,004
3	0,0008 + 0,228*j*	0,082	0,008
10	0,003 + 0,759*j*	1,069	0,101
15	0,004 + 1,138*j*	2,17	0,21
30	0,008 + 2,276*j*	7,2	0,82
50	0,013 + 3,79*j*	15,45	2,1
75	0,02 + 5,68*j*	26,2	4,53
100	0,027 + 7,58*j*	37,1	7,3

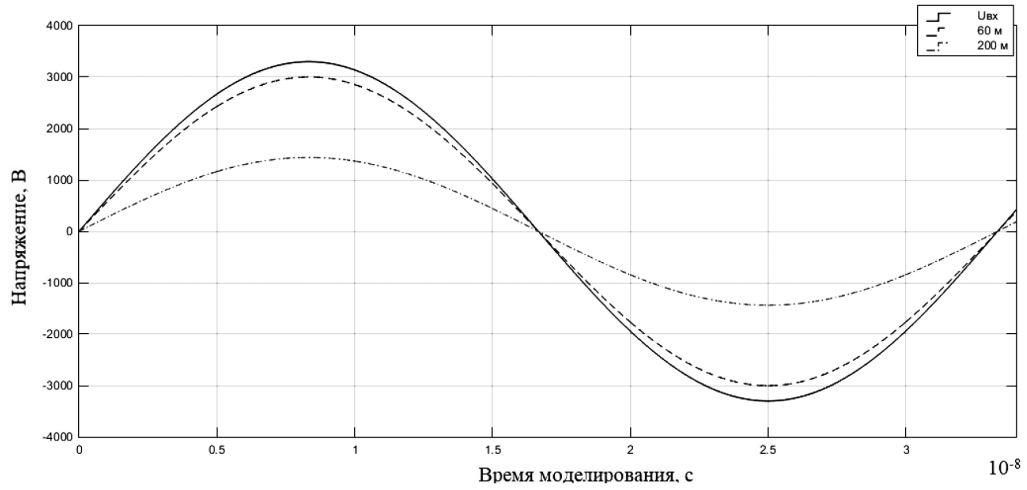
По данным табл. 2 можно сделать вывод о том, что с увеличением частоты питающего напряжения от значения 0,8 МГц происходит постепенное увеличение коэффициента затухания сигнала, и, следовательно, уменьшение амплитуды анализируемого сигнала.

Полученные результаты моделирования представлены на рис. 4 в виде зависимостей напряжения, измеренного на конце проводящей линии при разных частотах приложенного в начале линии напряжения 3300 В.

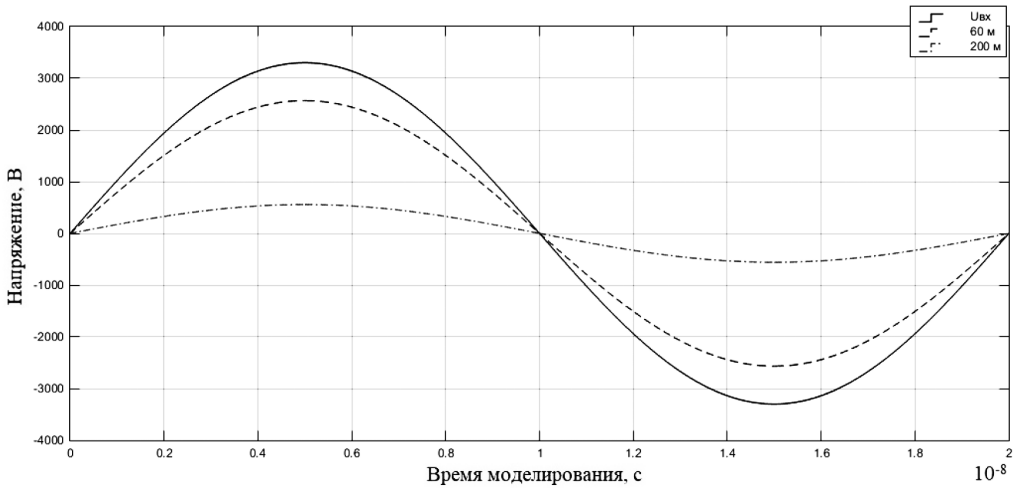
а)



б)



в)



г)

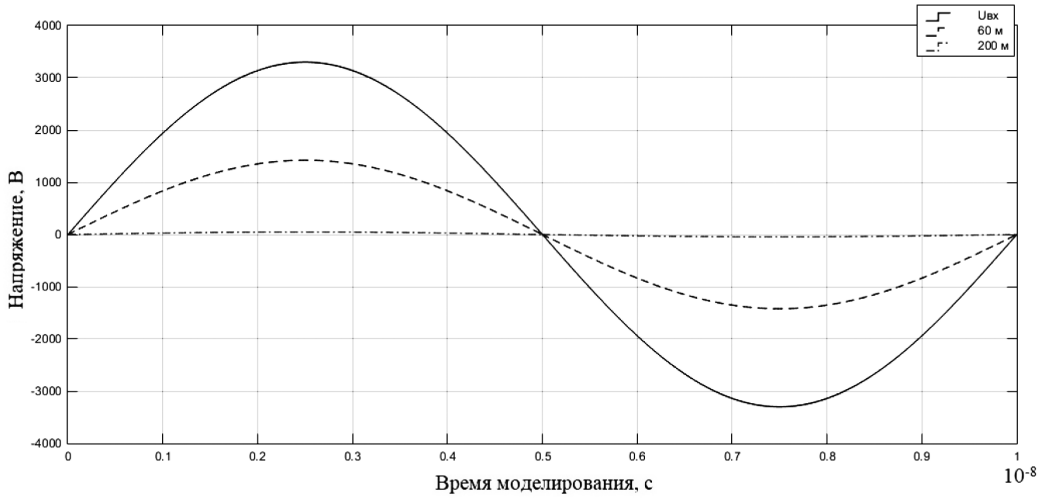


Рис. 4. Сигналы напряжения, измеренные на конце проводящей линии длиной 200 м и 60 м: *а* — частотой 10 МГц; *б* — частотой 30 МГц; *в* — частотой 50 МГц; *г* — частотой 100 МГц

При анализе графиков (см. рис. 4) видно, что максимальное значение амплитуды сигнала напряжения уменьшается с увеличением частоты, но при этом форма сигнала на конце кабеля остается подобной первоначальной. Только на высоких частотах (100 МГц) в проводящей линии длиной 200 м происходит значительное уменьшение амплитуды напряжения.

В табл. 2 сведены максимальные и минимальные значения амплитуды напряжения смоделированных сигналов, показанных на рис. 4.

Таблица 2

Максимальные и минимальные значения амплитуды напряжений

Частота напряжения, МГц	Максимальное значение напряжения, В		Минимальное значение напряжения, В	
	60 м	200 м	60 м	200 м
10	3262	2918	–3262	–2918
30	3002	1437	–3002	–1437
50	2566	557,7	–2566	–557,7
100	1422	46,72	–1422	–46,72

По данным табл. 2 можно сделать вывод о том, что максимальная частота для кабеля длиной 60 м, при которой амплитуда напряжения уменьшится относительно незначительно, является 30 МГц. На такой частоте изменение напряжения во время моделирования составляет 298 В, т. е. 9 %, и соответствует 0,82 дБ. При этом для кабеля длиной 200 м соизмеримое значение коэффициента затухания в конце линии будет на частоте примерно равной 10 МГц.

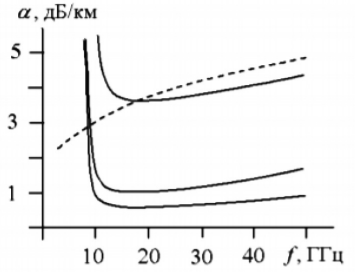


Рис. 5. Затухание волн в коаксиальном кабеле (пунктирная линия) и различных волн (электрических и магнитных) в круглом полом волноводе

На рис. 5 приведены кривые коэффициента затухания для коаксиального кабеля и круглого полого волновода, в которых могут возникать различные типы волн. Из рисунка видно, что коэффициент затухания в коаксиальном кабеле имеет практически линейную зависимость, схожую по форме с зависимостью для высоковольтного кабеля XLPE, рассматриваемого в статье. Линейное возрастание коэффициента затухания в кабеле XLPE и коаксиальном кабеле по сравнению с круглым

полым волноводом в целом можно объяснить меньшей плотностью поверхностных токов, сопровождающих движение электромагнитной волны по линии.

Заключение (Conclusion)

На основе математической и компьютерной модели проведены исследования распространения импульсов напряжения при разной частоте напряжения и длине кабелей применительно к танкеру-газовозу с главной дизель-электрической установкой мощностью 32000 кВт, напряжением 3300 В, частотой 60 Гц и длиной судовых высоковольтных кабелей 60 м и 200 м. При этом для сравнительного анализа для всех частот принято напряжение 3300 В. Целью исследований являлось определить, на каких частотах следует определять сигналы от импульсов частичных разрядов, возникающих в судовой высоковольтной изоляции.

Выполненные исследования показали, что при распространении высокочастотного сигнала напряжения, например, от частичных разрядов в судовых высоковольтных кабелях, сигнал незначительно меняет форму и может быть измерен при длине кабеля ~ 60 м на частотах не более ~ 30 МГц, а при длине кабеля от источника частичного разряда до приемника сигнала ~ 200 м — на частотах не более ~ 10 МГц. При этом следует также учитывать величину сигнала напряжения от частичного разряда на этих частотах и возможности соответствующих измерительных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соловьянова И. П.* Теория волновых процессов. Электромагнитные волны / И. П. Соловьянова, М. П. Наймушин. — Екатеринбург: УПИ, 2005. — 131 с.

2. *Dipashree D.* Signal attenuation in powerline communication channel / D. Dipashree, G. Vidya // International journal of emerging trends & technology in computer science. — 2014. — Vol 3. — Is. 2. — Pp. 123–130.

3. *Chae-Kyun J.* Partial discharge simulation and analysis based on experiment in underground distribution power cables / J. Chae-Kyun, K. Jeong-Tae, L. Jong-Beom // Journal of electrical engineering and technology. — 2013. — Vol. 8. — Is. 4. — Pp. 832–839. DOI: 10.5370/JEET.2013.8.4.832.

4. High voltage power cable technical data for LNG. — "GE Energy", 2014. — 7 p.

5. *Alvarez F.* Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment / F. Alvarez, F. Garnacho, J. Ortego, M. Á. Sánchez-Urán // Sensors. — 2015. — Vol. 15. — Is. 4. —Pp. 7360–7387. DOI: 10.3390/s150407360.

6. *Renforth L.* Deployment of distributed on-line partial discharge monitoring devices on medium-voltage electricity networks / L. Renforth, R. Mackinlay, M. Seltzer-Grant // 20th International conference on electricity distribution (CIRED 2009). — 2011. DOI: 10.1049/cp.2009.1010.

7. *Brookes M.* Analysis of circuits / M. Brookes. — 2017. — 72 p.

8. *Rakhesh S. K.* Transmission line analysis / S. K. Rakhesh. — 2013. — 100 p.

9. *Clark R.* On-line partial discharge testing of some of the worst performing circuits on a utility distribution system / R. Clark, M. Mackinlay, S. Seltzer-Grant, L. R. Goodfellow, M. Jamie, S Roger. — University of Manchester, HVPD Ltd, Scottish Power. — 6 p.

10. *Дьяконов В. П.* MATLAB 5 с пакетами расширений / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова, В. В. Круглов. — М.: Нолидж, 2001. — 878 с.

11. *Дьяконов В. П.* MATLAB 6: учебный курс / В. П. Дьяконов. — СПб.: Питер, 2001. — 592 с.

12. *Потемкин В. Г.* Введение в Matlab / В. Г. Потемкин. — М.: Диалог-МИФИ, 2000. — 256 с.

13. Capacitive current calculation for Corcovado LNG. — "GE Energy", 2014. — 8 p.

14. Chen G. On-site portable partial discharge detection applied to power cables using HFCT and UHF methods / G. Chen, J. Tao, Y. Ma, H. Fu, Y. Liu, Z. Zhou, C. Huang, C. Guo // WSEAS transactions on circuits and systems. — 2016. — Vol. 15. — Pp. 83–90.

REFERENCES

1. Solov'yanova, I. P., and M. P. Naimushin. *Teoriya volnovih processov. Electromagnitnye volni*. Ekaterinburg: UPI, 2005.

2. Duche, Dipashree, and Vidya Gogate. "Signal attenuation in powerline communication channel." *International journal of emerging technologies & technology in computer science* 3.2 (2014): 123–130.

3. Jung, Chae-Kyun, Jeong-Tae Kim, and Jong-Beom Lee. "Partial discharge simulation and analysis based on experiment in underground distribution power cables." *Journal of electrical engineering and technology* 8.4 (2013): 832–839. DOI: 10.5370/JEET.2013.8.4.832.

4. *High voltage power cable technical data for LNG*. "GE Energy", 2014.

5. Álvarez, Fernando, Fernando Garnacho, Javier Ortego, and Miguel Ángel Sánchez-Urán. "Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment." *Sensors* 15.4 (2015): 7360–7387. DOI: 10.3390/s150407360.

6. Renforth, L., R. Mackinlay, and M. Seltzer-Grant. "Deployment of distributed on-line partial discharge monitoring devices for medium-voltage electricity networks." *20th International conference on electricity distribution*. 2011. DOI: 10.1049/cp.2009.1010.

7. Brookes, Mike. *Analysis of circuits.* 2017.

8. Rakhesh, Singh Kshetrimayum. *Transmission line analysis*. 2013.

9. Clark, R., M. Mackinlay, S. Seltzer-Grant, L. Goodfellow, M. Jamie, and S. Roger. *On-line partial discharge testing of some of the worst performing circuits on a utility distribution system.* University of Manchester, HVPD Ltd, Scottish Power.

10. Dyakonov, V. P., I. V. Abramenkova, and V. V. Kruglov. *MATLAB 5 c packetami rashireniy.* M.: Nolidzh, 2001.

11. Dyakonov, V. P. *MATLAB 6: Uchebniy kurs.* SPb.: Peter, 2001.

12. Potemkin, V. G. *Vvedenie v Matlab.* M.: Dialog-MIFI, 2000.

13. *Capacitive current calculation for Corcovado LNG*. "GE Energy", 2014.

14. Chen, Guang, Jiagui Tao, Yong Ma, Hui Fu, Yang Liu, Zhicheng Zhou, Chengjun Huang, Canxin Guo. "On-site portable partial discharge detection applied to power cables using HFCT and UHF methods." *WSEAS transactions on circuits and systems* 15 (2016): 83–90.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Сергей Емельянович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kuznecovse@gumrf.ru*

Макаров Даниил Михайлович — аспирант
Научный руководитель:
Кузнецов Сергей Емельянович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *daniil.makarov.think.tank@gmail.com*,
kaf_saees@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Sergey Ye. —
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: *kuznecovse@gumrf.ru*

Makarov, Daniil M. — Postgraduate
Supervisor:
Kuznetsov, Sergey Ye.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *daniil.makarov.think.tank@gmail.com*,
kaf_saees@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2018 г.
Received: December 27, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168

THE ADAPTIVE ALGORITHM OF THE VECTOR CONTROL OF ELECTRICAL DRIVES WITH THE INDUCTION MOTORS

V. F. Samosejko

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

The method of vector control of an electric drive with an asynchronous electric motor is proposed. The method allows us to improve the quality of dynamic processes by eliminating its dependence on a priori estimates of the rotor resistance and the main inductance. The voltages equations of the asynchronous motor, on which the synthesis of dynamic processes is carried out, as well as differential equations for error currents of vector control, are presented. It is described how to adjust the "technical optimum" of the circuits of magnetization currents and load current. To ensure the robustness of dynamic processes the internal circuits of virtual dissipation procuring the robustness of the control system are introduced in the currents control circuits. The adaptive identification of the rotor resistance and the main static inductance of the induction motor is carried out by observations of the stator currents and the rotor speed. The equations for error currents of vector control are used for the adaptive identification. The adaptive identification is based on the formation of control circuits with integral regulators, which provide the aspiration of a priori estimates of the rotor resistance and the main static inductance of the asynchronous motor to the true values. To construct the adaptive identification circuits, in addition to the information on the currents in the stator windings and the rotor speed, the information on the relative value of the short-circuit inductance is also required. The quality of the priori information on the relative value of the short-circuit inductance determines the accuracy of the adaptive identification of the rotor resistance and the main static inductance of the asynchronous motor.

Keywords: vector control, induction motor, adaptive identification, robustness, rotor resistance, basic inductance.

For citation:
Samosejko, Veniamin F. "The adaptive algorithm of the vector control of electrical drives with the induction motors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.

УДК621.3.072.6

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ С АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

В. Ф. Самосейко

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

Предложен метод векторного управления электроприводом с асинхронным электродвигателем, позволяющий повысить качество динамических процессов за счет устранения его недостатка — зависимости от априорных оценок сопротивлений ротора и основной индуктивности. Приведены уравнения напряжений асинхронного двигателя, по которым ведется синтез динамических процессов, а также дифференциальные уравнения ошибок векторного управления. По уравнениям напряжений описана процедура настройки на «технический оптимум» контуров токов намагничивания и тока нагрузки. Для обеспечения робастности динамических процессов в контуры управления токов введены внутренние контуры виртуальной диссипации, позволяющие обеспечить робастность системы управления. Адаптивная идентификация сопротивления ротора и основной статической индуктивности асинхронного электродвигателя осуществляется по наблюдениям токов статора и скорости вращения ротора. Для адаптивной идентификации используются функции от токов ошибок векторного управления. Адаптивная идентификация основана на образовании контуров управления с интегральными регуляторами, которые обеспечивают стремление априорных оценок сопротивления ротора и основной статической индуктивности асинхронного электродвигателя к истинным значениям. Для построения контуров адаптивной идентификации,

кроме информации о токах в обмотках статора и скорости вращения ротора, необходима также информация об относительном значении индуктивности короткого замыкания. Качество априорной информации об относительном значении индуктивности короткого замыкания определяет точность адаптивной идентификации сопротивления ротора и основной статической индуктивности асинхронного электродвигателя.

Ключевые слова: векторное управление, асинхронный электродвигатель, адаптивная идентификация, робастность, сопротивление ротора, основная индуктивность.

Для цитирования:
Самосейко В. Ф. Адаптивный алгоритм векторного управления электроприводами с асинхронными электродвигателями/ В. Ф. Самосейко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.

Введение (Introduction)

В настоящее время в системах электродвижения судов начали применяться гребные электропроводы с асинхронным электродвигателем, мощность которых достигает десятков мегаватт. К качеству управления такими электроприводами предъявляются повышенные требования. Наиболее распространенным способом управления асинхронным двигателем является *метод векторного управления*. Недостаток данного метода заключается в том, что для его реализации необходимо априорно знать сопротивление обмотки ротора и основную индуктивность двигателя, которые могут существенно изменяться в процессе эксплуатации. При этом значительно снижается качество управления. Снижение качества управления заключается в изменении электромагнитного момента, насыщении магнитопровода и снижении диапазона управления скоростью вращения. Эти трудности векторного управления преодолеваются путем применения адаптивных регуляторов. Так, в работе [1] предложен адаптивный регулятор определения сопротивления ротора. Однако его применению препятствует сложность практической реализации. Существуют подходы к решению задачи адаптивного управления, основанные на введении возмущающих сигналов по току [2], [3], однако такие методы на практике ведут к ухудшению качества управления и организации специальных режимов работы.

Большинство способов преодоления недостатков векторного управления основано на использовании идентификации ненаблюдаемых токов ротора асинхронного электродвигателя. В системах автоматического управления наиболее распространен наблюдатель, который называется *фильтром Калмана*. Одной из модификаций фильтра Калмана является наблюдатель пониженного порядка Люенбергера [4]. На использовании наблюдателей состояний для повышения качества векторного управления асинхронным электродвигателем основаны работы [5]–[7]. Известны также алгоритмы с использованием метода наименьших квадратов [8], [9]. Из последних публикаций следует отметить работы [10]–[12]. Обзор методов идентификации параметров асинхронного электродвигателя приведен в работе [13].

Однако все эти методы требуют больших вычислительных ресурсов. Этим объясняются затруднения их использования на практике. В данной работе предлагается метод идентификации параметров асинхронного электродвигателя, который не требует применения наблюдателей состояния и сложных вычислений. Он позволяет на базе доступной информации о токах статора и скорости вращения ротора достаточно просто оценивать сопротивление ротора и основную статическую индуктивность асинхронного электродвигателя.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Уравнения напряжений асинхронного электродвигателя. Будем полагать, что к обмоткам статора асинхронного электродвигателя прикладываются напряжения, которые могут быть представлены вектором $\mathbf{U}_S$. Под воздействием напряжений по обмоткам статора и ротора потекут токи $\mathbf{I}_S$ и $\mathbf{I}_R$. Векторы $\mathbf{U}_S$, $\mathbf{I}_S$ и $\mathbf{I}_R$ являются, соответственно, ω_1 и ω_2 периодическими функциями времени. Угловые частоты статора ω_1 и ротора ω_2 связаны соотношением $\omega_1 - \omega_2 = \omega$, где ω — угловая

электрическая скорость вращения ротора. Матричные уравнения напряжений в естественной системе координат, согласно второму закону Кирхгофа, имеют следующий вид [14]:

$$\mathbf{U}_S = R_1 \cdot \mathbf{I}_S + L_1 \cdot p\mathbf{I}_S + p\{\mathbf{L}_{SS} \cdot \mathbf{I}_S + \mathbf{L}_{SR} \cdot \mathbf{I}_R\};$$

$$0 = R_2 \cdot \mathbf{I}_R + L_2 \cdot p\mathbf{I}_R + p\{\mathbf{L}_{RR} \cdot \mathbf{I}_R + \mathbf{L}_{RS} \cdot \mathbf{I}_S\}, \quad (1)$$

где R_1 и R_2 — сопротивления фаз обмоток статора и ротора; $\mathbf{L}_{SS}$ и $\mathbf{L}_{RR}$ — матрицы индуктивностей обмотки статора и ротора; $\mathbf{L}_{SR} = \mathbf{L}_{RS}^{\mathrm{T}}$ — матрица взаимных индуктивностей обмоток статора и ротора; p — оператор дифференцирования по времени.

Данные уравнения связывают напряжения и токи обмоток асинхронной машины с короткозамкнутым ротором и являются дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами $\boldsymbol{L}_{SR} = \boldsymbol{L}_{RS}^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{L}_{SR}(\gamma)$, где γ — электрический угол поворота ротора. Обычно для дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами стремятся найти матрицу Ляпунова, которая преобразует их в уравнения с постоянными коэффициентами. Преобразования дифференциальных уравнений электрических машин также называют *преобразованиями Парка – Горева*.

Если в уравнениях (1) выполнить замену переменных, то получим матричные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами во вращающейся системе координат *d–q*с угловой скоростью ω_1, равной угловой частоте токов статора $\mathbf{I}_S$:

$$\mathbf{U}_1 = R_1 \cdot \mathbf{I}_1 + \omega_1 \cdot L_{01} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_1 + L_{01} \cdot p\mathbf{I}_1 + \omega_1 \cdot L_0 \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_2 + L_0 \cdot p\mathbf{I}_2;$$

$$0 = R_2 \cdot \mathbf{I}_2 + \omega_2 \cdot L_{02} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_2 + L_{02} \cdot p\mathbf{I}_2 + \omega_2 \cdot L_0 \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_1 + L_0 \cdot p\mathbf{I}_1, \quad (2)$$

где $L_{01} = L_0 + L_1$ и $L_{02} = L_0 + L_2$ — полные индуктивности обмоток статора и ротора; $R_1 = R_S$ — сопротивление обмотки статора; $R_2 = R_R$ — приведенное сопротивление обмотки ротора; L_0 — основная индуктивность; $L_1 = L_S$ — индуктивность рассеяния обмотки статора; $L_2 = L_R$ — приведенная индуктивность рассеяния обмотки ротора; L_0 — основная индуктивность; $\mathbf{E}$ — матрица поворота на π/2.

Напряжения $\mathbf{U}_1$ и токи $\mathbf{I}_1$, $\mathbf{I}_2$ в данной системе координат являются непериодическим величинами, а в стационарном режиме работы — постоянными величинами.

Развернутый вид уравнений напряжений (2), описывающих динамику электромагнитных процессов в осях координат *d–q* [14]:

$$u_d = R_1 \cdot i_d - \omega_1 \cdot L_{01} \cdot i_q + L_{01} \cdot pi_d - \omega_1 \cdot L_0 \cdot j_q + L_0 \cdot pj_d;$$

$$u_q = R_1 \cdot i_q + \omega_1 \cdot L_{01} \cdot i_d + L_{02} \cdot pi_q + \omega_1 \cdot L_0 \cdot j_d + L_0 \cdot pj_q; \quad (3)$$

$$0 = R_2 \cdot j_d - \omega_2 \cdot L_{02} \cdot j_q + L_{02} \cdot pj_d - \omega_2 \cdot L_0 \cdot i_q + L_0 \cdot pi_d;$$

$$0 = R_2 \cdot j_q + \omega_2 \cdot L_{02} \cdot j_d + L_{02} \cdot pj_q + \omega_2 \cdot L_0 \cdot i_d + L_0 \cdot pi_q, \quad (4)$$

где i_d и i_q — элементы вектора $\mathbf{I}_1$ токов статора; j_d и j_q — элементы вектора $\mathbf{I}_2$ токов ротора.

Соотношения (3) являются уравнениями напряжений на обмотке статора по оси координат *d* и *q,* соответственно, соотношения (4) — уравнениями напряжений на обмотке ротора по оси координат *d* и *q*соответственно.

Для синтеза системы управления используются относительные единицы, для определения которых введены основные базовые величины: $U_б = U_н \cdot \sqrt{2}$ — амплитуда номинального напряжения обмотки статора; $I_б = I_н \cdot \sqrt{2}$ — амплитуда номинального тока статора; $\omega_б$ — номинальная угловая частота напряжения статора.

Производные базовые величины: $R_б = U_б/I_б$ — сопротивление; $L_б = R_б/\omega_б$ — индуктивность; $P_б = m \cdot U_б \cdot I_б/2$ — мощность; $M_б = P_б/\omega_б/p_п$ — мощность; $\Omega_б = \omega_б/p_п$ — базовая угловая скорость вращения ротора, где $p_п$ — число пар полюсов; m — число фаз обмотки статора. (Относительная величина равна отношению именованной величины к базовой).

Уравнения напряжений в относительных единицах будут идентичны уравнениям (3) и (4), в которых все переменные будут помечены верхним символом *.

Электромагнитный момент и уравнение движения ротора. Электромагнитный момент асинхронной машины находится через выражение электромагнитной энергии, запасенной обмотками:

$$W(\gamma)=\frac{1}{2}\cdot\mathbf{I}_S^{\mathrm{T}}\cdot\mathbf{L}_{SS}\cdot\mathbf{I}_S+\mathbf{I}_S^{\mathrm{T}}\cdot\mathbf{L}_{SR}(\gamma)\cdot\mathbf{I}_R+\frac{1}{2}\cdot\mathbf{I}_R^{\mathrm{T}}\cdot\mathbf{L}_{RR}\cdot\mathbf{I}_R,$$

где $\mathbf{I}_S$ и $\mathbf{I}_R$ — векторы токов статора и ротора в естественной системе координат; γ — электрический угол поворота ротора.

Заметим, что в данном выражении взаимная индуктивность обмоток статора и ротора $\boldsymbol{L}_{SR}=\boldsymbol{L}_{RS}^{T}=\boldsymbol{L}_{SR}(\gamma)$ является функцией механической координаты γ. Следовательно, энергия, запасенная обмотками ротора, является потенциальной.

Электромагнитный момента синхронной машины в естественной системе определяется выражением [14]:

$$M=p_{\text{п}}\cdot\frac{\partial W(\gamma)}{\partial\gamma}=p_{\text{п}}\cdot\mathbf{I}_S^{T}\cdot\frac{\partial\mathbf{L}_{SR}(\gamma)}{\partial\gamma}\cdot\mathbf{I}_R=p_{\text{п}}\cdot\mathbf{I}_R^{T}\cdot\frac{\partial\mathbf{L}_{RS}(\gamma)}{\partial\gamma}\cdot\mathbf{I}_S.$$

Электромагнитный момент может быть записан через вектора токов статора $\mathbf{I}_1$ и ротора $\mathbf{I}_2$, определенные в системе координат *d–q*:

$$M=p_{\text{п}}\cdot\frac{m}{2}\cdot\mathbf{I}_1^{T}\cdot\mathbf{E}\cdot\mathbf{I}_2. \tag{5}$$

В развернутой форме записи через элементы вектора токов статора $\mathbf{I}_1$ и ротора $\mathbf{I}_2$ выражение электромагнитного момента в относительных единицах примет следующий вид:

$$M^*=L_0^*\cdot(i_d^*\cdot j_q^*-i_q^*\cdot j_d^*), \tag{6}$$

где L_0 — основная индуктивность; k_0 — коэффициент, определенный выражениями); i_d, i_q, j_d, j_q — элементы векторов токов статора и ротора в осях координат *d–q*.

Уравнение движения асинхронной машины в относительных единицах:

$$T_{\text{мех}}\cdot p\omega^*=M^*-M_{\text{с}}^*, \tag{7}$$

где $T_{\text{мех}}$ — механическая постоянная времени; $\omega^*=\Omega/\Omega_{\text{б}}$ — относительная угловая скорость вращения ротора; M^* — относительный электромагнитный момент; $M_{\text{с}}^*$ — относительный момент сопротивления движению; Ω — угловая скорость вращения ротора; $\Omega_{\text{б}}$ — базовая угловая скорость вращения ротора.

Ввиду того, что токи статора доступны для наблюдения, а токи ротора недоступны, для синтеза системы управления выполним еще одну замену переменных для токов ротора:

$$j_d^*=-\frac{L_0^*}{L_{02}^*}\cdot(i_d^*-a_d-x_d^*);\quad j_q^*=-\frac{L_0^*}{L_{02}^*}\cdot(i_q^*-a_q-x_q^*). \tag{8}$$

где L_0^* — основная относительная индуктивность; L_{02}^* — полная относительная индуктивность обмотки ротора; a_d и a_q — константы, характеризующие намагничивание статора; x_d и x_q — достаточно малые токи, называемые далее *токами ошибок векторного управления*.

Магнитная система асинхронного двигателя симметрична. Следовательно, положение осей координат *d–q* на плоскости поперечного сечения машины может быть выбрано произвольно. Ось *d* будем называть *продольной*, а составляющую тока статора i_d — током намагничивания. Ось *q* будем называть *поперечной*, а составляющую тока статора i_q — *током нагрузки*. Тогда константа a_q, характеризующая ток намагничивания по оси *q*, полагается равной нулю. Таким образом, можно принять:

$$a_d=i_d^*;\quad a_d=0. \tag{9}$$

Если в уравнениях напряжений (3) и (4) выполнить замену переменных (8), то получится новая система ***A*** дифференциальных уравнений, в которой переменными состояния являются токи статора i_d и i_q и токи ошибок векторного управления x_d и x_q.

Уравнения ошибок векторного управления. Уравнения напряжений системы ***A*** для относительных токов ошибок векторного управления примут следующий вид:

$$T_{02}^{*}\cdot px_d^{*} = i_d^{*} - a_d - x_d^{*} + \omega_2^{*}\cdot T_{02}^{*}\cdot x_q^{*};$$

$$T_{02}^{*}\cdot px_q^{*} = i_d^{*} - x_q^{*} - \omega_2^{*}\cdot T_{02}^{*}\cdot(a_d - x_d^{*}), \qquad (10)$$

где $T_{02}^{*} = L_{02}^{*}/R_2^{*}$ — относительная постоянная времени затухания токов ошибок; R_2^{*} — относительное сопротивление ротора; ω_2^{*} — относительная частота токов статора.

Если в уравнениях (10) положить, что $x_d^{*} = x_q^{*} = 0$, то получим два алгебраических уравнения:

$$i_d^{*} = a_d;\ \ \omega_2^{*} = \frac{R_2^{*}\cdot i_q^{*}}{L_{02}^{*}\cdot i_d^{*}} = \frac{i_q^{*}}{T_{02}^{*}\cdot i_d^{*}} = \frac{1}{T_{02}^{*}}\cdot\tan(\theta_I), \qquad (11)$$

где $\tan(\theta_I) = i_q^{*}/i_d^{*}$ — тангенс угла токовой нагрузки θ_I.

Выполнение равенств (9) и (11) обеспечивает выполнение в статическом режиме равенств $x_d = x_q = 0$. Из соотношений (8) следует, что токи ротора асинхронного электродвигателя при $x_d = x_q = 0$ примут следующие значения:

$$j_d^{*} = 0;\ \ j_q^{*} = -\frac{L_0^{*}}{L_{02}^{*}}\cdot i_q^{*}. \qquad (12)$$

С учетом равенств (11) уравнения ошибок векторного управления приобретут следующий вид:

$$T_{02}^{*}\cdot px_d^{*} + x_d^{*} - x_q^{*}\cdot\tan(\theta_I) = 0;$$

$$T_{02}^{*}\cdot px_q^{*} + x_q^{*} + x_d^{*}\cdot\tan(\theta_I) = 0. \qquad (13)$$

Корни характеристического уравнения системы дифференциальных уравнений (13) определяются выражением

$$p_{1,2} = \left(-1 \pm j\cdot\tan(\theta_I)\right)/T_{02}^{*},$$

где j — мнимая единица.

Поскольку действительная часть корней имеет отрицательное значение, решение уравнений (13) всегда устойчивое и порождает затухающий колебательный характер динамических процессов. Постоянная времени затухания токов ошибок управления $T_{02} = L_{02}/R_2$ достаточно велика и может быть соизмерима с механической постоянной времени.

Уравнения векторного управления. Уравнения напряжений системы ***A*** для токов статора при $x_d^{*} = x_q^{*} = 0$ примут следующий вид:

$$R_1^{*}\cdot i_d^{*} - \omega_1^{*}\cdot L_{:}^{*}\cdot i_q^{*} + L_{к}^{*}\cdot pi_d^{*} = u_d^{*};$$

$$R_1^{*}\cdot i_q^{*} + \omega_1^{*}\cdot L_{01}^{*}\cdot i_d^{*} + L_{:}^{*}\cdot pi_q^{*} = u_q^{*}, \qquad (14)$$

Выполнение соотношений (11) является основным условием, обеспечивающим асимптотическую устойчивость системы дифференциальных уравнений (14).

Если известна относительная угловая частота вращения ротора ω^{*} как результат наблюдений (с датчика скорости), то относительная угловая частота напряжения статора определяется выражением

$$\omega_1^{*} = \omega^{*} + \omega_2^{*}, \qquad (15)$$

где ω_2^{*} — относительная угловая частота токов ротора, определенная выражением (11).

Структурная схема асинхронного электродвигателя, соответствующая уравнениям (14), представлена на рис. 1. Данная структурная схема закладывается в основу синтеза контуров управления токами намагничивания i_d и нагрузки i_q.

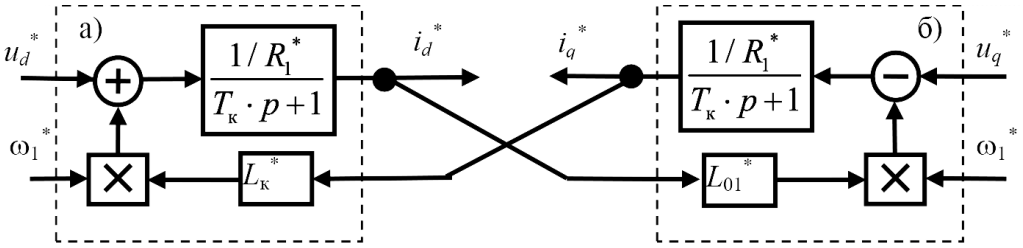


Рис. 1. Структурная схема, соответствующая уравнениям векторного управления:
а — объект управления контура тока намагничивания;
б — объект управления контура тока нагрузки

Результаты (Results)

Синтез контуров управления токами намагничивания и нагрузки. Динамические процессы, порождаемые дифференциальными уравнениями (3) и (4), а также (14), имеют комплексные корни характеристического уравнения. Их решения носят сильно выраженный колебательный характер. Для подавления колебаний токов намагничивания и нагрузки вводятся специальные контуры виртуальной диссипации. Введение диссипативных контуров по токам намагничивания и нагрузки также благоприятно сказывается на быстродействии управления, придавая ему свойство робастности. Метод введения контуров виртуальной диссипации впервые был предложен в работе [15]. При наличии контуров виртуальной диссипации введение компенсирующих обратных связей становится необязательным, однако их применение улучшает качество динамических процессов. Исходными уравнениями для синтеза регуляторов контуров управления токами намагничивания i_d и нагрузки i_q являются уравнения (14). Математическая модель объекта управления, по которой ведется синтез контуров управления токами, представлен структурной схемой, приведенной на рис. 1.

Регуляторы тока намагничивания. Для управления током намагничивания образован контур с пропорциональным параллельным регулятором, который далее называется *контуром виртуальной диссипации* (рис. 2). Коэффициент передачи пропорционального параллельного регулятора R^* называется *параметром виртуальной диссипации*. Несложно показать, что при значениях параметра виртуальной диссипации

$$R^* > 2 \cdot L_к^* \cdot \left|\omega_1^*\right| \tag{16}$$

динамические процессы становятся апериодическими. Если принять $\omega_1^* = 1$ и $L_к^* = 0{,}2$, то $R^* > 0{,}4$ и минимальное значение для параметра виртуальной диссипации может быть вычислено по формуле

$$R^* > \frac{4 \cdot L_к^{*2}}{\sqrt{1 - 4 \cdot L_к^{*2}}} \cdot \left|\omega_1^*\right|.$$

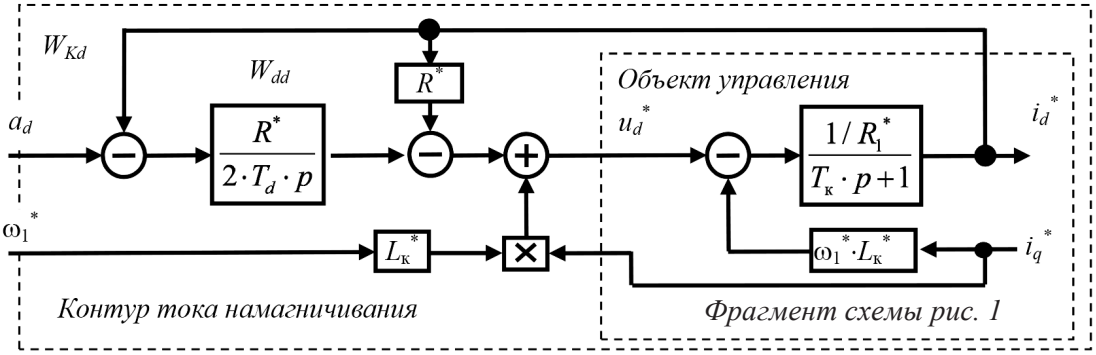


Рис. 2. Структурная схема контура управления током намагничивания
с компенсацией влияния на него тока нагрузки

Значение R^* существенно превышает относительное значение сопротивление обмотки статора R_1^*. В этом случае можно полагать, что объектом управления контура намагничивания является апериодическое звено с передаточной функцией

$$W_d = \frac{1/R^*}{T_d \cdot p + 1}, \tag{17}$$

где $T_d = \frac{L_к^*}{\omega_б \cdot R^*}$ — постоянная времени контура намагничивания с пропорциональным параллельным регулятором; $L_к^*$ — относительная индуктивность короткого замыкания; $\omega_б$ — базовая угловая частота; R^* — параметр виртуальной диссипации, удовлетворяющий соотношению (16).

Если принять $\omega_б^* = 2 \cdot \pi \cdot 50$; $L_к^* = 0{,}2$ и $R^* > 0{,}4$, то постоянная времени контура намагничивания $T_q < 1{,}6$ мкс.

Влияние тока нагрузки i_q на контур намагничивания рассматривается как возмущающее воздействие, которое приводит к возникновению ошибок управления. Для астатического управления током намагничивания целесообразно образовать второй контур (см. рис. 2) с интегральным регулятором

$$W_{dd} = \frac{R^*}{2 \cdot T_d \cdot p}.$$

Данный регулятор настроен на технический оптимум, обеспечивая желаемый характер динамических процессов. Передаточная функция контура тока намагничивания, настроенного на технический оптимум,

$$W_{Kd} = \frac{1}{2 \cdot T_d^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_d \cdot p + 1} \approx \frac{1}{2 \cdot T_d \cdot p + 1}. \tag{18}$$

Задание на контур тока намагничивания определяется выражением $a_d = 1/L_{01}^*$. Перед пуском асинхронного электродвигателя ($\omega = 0$) целесообразно предварительно намагнитить его магнитопровод. При пуске без предварительного намагничивания асинхронного двигателя соотношения $x_d = x_q = 0$ не выполняются. При этом угол токовой нагрузки θ_I достаточно велик. Соответственно токи ошибок управления будут иметь высокую колебательность. Длительность процесса предварительного намагничивания машины определяет постоянная времени затухания токов ошибок: $T_{02} = L_{02}/R_2$. В намагниченном состоянии магнитопровода постоянная времени контура намагничивания $T_q < 3{,}2$ мкс.

Влияние тока нагрузки i_q на контур намагничивания рассматривается как возмущающее воздействие. Для компенсации этого влияния целесообразно предусмотреть положительную обратную связь по току нагрузки i_q (см. рис. 2). Отсутствие этой связи не нарушает устойчивость процессов в контуре тока намагничивания, однако улучшает качество его стабилизации.

Регуляторы тока нагрузки. Управление током нагрузки осуществляется по аналогии с током намагничивания путем образования контура с пропорциональным параллельным регулятором, коэффициент передачи которого R^* (рис. 3), и второго контура с интегральным регулятором. Постоянная времени интегрального регулятора контура нагрузки определяется выражением

$$T_q = \frac{L_к^*}{\omega_б \cdot R^*}, \tag{19}$$

где $L_к^*$ — относительная индуктивность короткого замыкания; $\omega_б$ — базовая угловая частота; R^* — параметр виртуальной диссипации, удовлетворяющий соотношению (16).

Несложно показать, что при значении параметра виртуальной диссипации, удовлетворяющего неравенству (16), динамические процессы в контуре нагрузки становятся апериодическими. Передаточная функция контура тока нагрузки с интегральным регулятором, настроенным на технический оптимум:

$$W_{Kq} = \frac{1}{2 \cdot T_q^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_q \cdot p + 1} \approx \frac{1}{2 \cdot T_q \cdot p + 1}. \tag{20}$$

В намагниченном состоянии магнитопровода постоянная времени контура тока нагрузки $T_q < 3{,}2$ мкс.

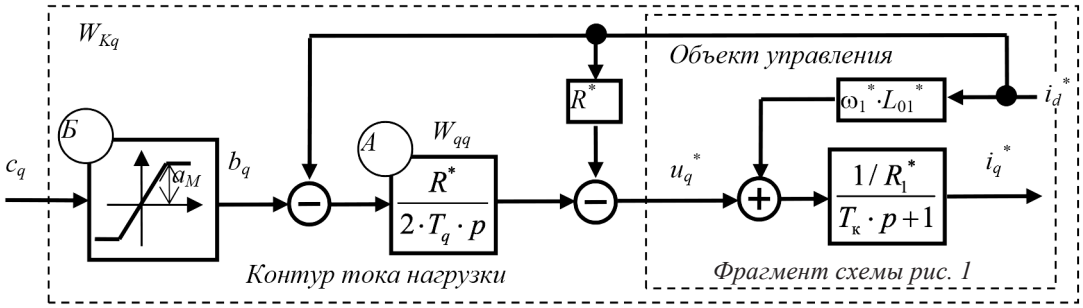


Рис. 3. Структурная схема контура управления током нагрузки:
А — интегральный регулятор тока нагрузки; *Б* — блок ограничения тока нагрузки;
c_q — задание тока нагрузки

Ограничение тока нагрузки может осуществляться, исходя из соображений ограничения величины электромагнитного момента или ограничения тока статора. Так как ток нагрузки при постоянном токе намагничивания пропорционален моменту, то для его ограничения достаточно ограничить сигнал задания на ток a_q в структурной схеме, приведенной на рис. 3. Обычно модуль сигнала a_q ограничивается значениями из интервала $a_M = 1$–2. Если по каким-то соображениям необходимо ограничивать относительный ток статора на уровне $a_I = 1$–2, то ограничение электромагнитного момента определится из выражения

$$a_M = \sqrt{a_I^2 - a_d^2}, \tag{21}$$

где a_d — сигнал задания на ток намагничивания.

Сигнал задания на ток нагрузки при наличии на него ограничений вычисляется по формуле

$$b_q = \max(-a_M, \min(a_M, c_q)), \tag{22}$$

где c_q — новый сигнал задания на ток нагрузки, на который не накладываются ограничения.

Ограничение тока нагрузки на структурной схеме (см. рис. 3) показано в виде блока *Б*.

Контур скорости вводится в систему управления для стабилизации скорости на заданном уровне. Объектом управления контура скорости является контур тока нагрузки и механическая часть электродвигателя. Передаточная функция контура тока нагрузки, настроенного на технический оптимум, определена выражением (20). Передаточная функция механической части электродвигателя:

$$W_{MЧ} = \frac{K_0}{T_{мех} \cdot p},$$

где $K_0 = L_0^{*2}/(L_{01}^* \cdot L_{02}^*)$; L_0^* — относительная основная индуктивность; L_{01}^* и L_{02}^* — полные относительные индуктивности обмоток статора и ротора; $T_{мех}$ — механическая постоянная времени.

Передаточная функция объекта управления контура скорости $W_{Kq} \cdot W_{MЧ}$ определяется выражением

$$W_{ОУКС} = W_{Kq} \cdot W_{MЧ},$$

где W_{Kq} — передаточная функция контура тока нагрузки, настроенного на технический оптимум (20).

Несложно показать, что регулятор контура скорости, настроенный на технический оптимум, является пропорциональным и имеет коэффициент усиления,

$$k_{рс} = \frac{L_{01}^* \cdot L_{02}^* \cdot T_{мех}}{L_0^{*2} \cdot 4 \cdot T_q} \approx \frac{T_{мех}}{4 \cdot T_q}. \tag{23}$$

Значение коэффициента усиления пропорционального регулятора $k_{рс}$ обычно превышает значение 25. Структурная схема, используемая для настройки регулятора контура скорости, приведена на рис. 4.

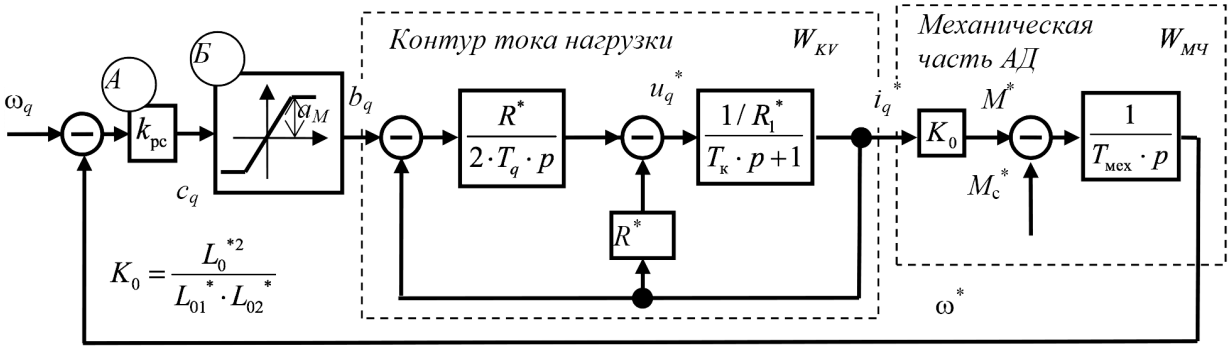


Рис. 4. Структурная схема, используемая для настройки регулятора контура скорости: *А* — пропорциональный регулятор скорости; *Б* — ограничитель тока нагрузки

Контур с пропорциональным регулятором скорости не обеспечивает астатическое управление скорости. Относительное значение ошибки управления скоростью определяется выражением

$$\Delta\omega^* = \frac{M_c^*}{K_0 \cdot k_{рс}} = M_c^* \cdot \frac{4 \cdot T_q}{T_{мех}}. \qquad (24)$$

При $M_c^* = 1$; $L_к^* = 0{,}2$; $R^* = 0{,}5$; $T_{мех} = 1$ с; $\omega_б = 314$ относительное значение ошибки составляет 0,5 %. Таким образом, ошибка по скорости достаточно мала.

Идентификация параметров обмоток асинхронного двигателя. Система дифференциальных уравнений (14) определяет динамику переменных состояний асинхронного электродвигателя. Выполнение соотношения (11) является основным условием, обеспечивающим асимптотическую устойчивость системы дифференциальных уравнений (14). Это связано с тем, что токи ротора недоступны для наблюдения и не используются при управлении. Поэтому существенное влияние на электромагнитные процессы оказывает погрешность оценки частоты токов ротора. Оценка частоты токов ротора зависит от качества априорной информации о полной относительной индуктивности обмотки ротора L_{02}^* и относительного сопротивления ротора R_2^* (14).

При идентификации параметров будем считать, что относительные индуктивности рассеяния $L_1^* \approx L_2^* \approx L_к^*/2$ не зависят от условий эксплуатации, их величина может принимать значения 0,07–0,01. Будем также полагать, что относительные сопротивления обмоток $R_1^* \approx R_2^*$, а основная относительная индуктивность машины L_0^*. Будем также полагать, что известны априорные оценки $\tilde{R}_1^*$ и $\tilde{L}_0^*$.

Выполнить коррекцию параметров асинхронного двигателя можно не прибегая к применению традиционных наблюдателей для оценки токов ошибок векторного управления. Несложно заметить, что производные токов статора, определенные дифференциальными уравнениями (14), будут равны нулю только при отсутствии ошибок в оценке параметров электродвигателя. Следовательно, переменные

$$y_d = u_d^* - R_2^* \cdot i_d^* + \omega_1^* \cdot L_к^* \cdot i_q^*; \quad y_q = u_q^* - R_2^* \cdot i_q^* - \omega_1^* \cdot L_{01}^* \cdot i_d^* \qquad (25)$$

зависят от токов ошибок векторного управления асинхронным двигателем (10). При $\tilde{R}_2^* = R_2^*$ и $\tilde{L}_0^* = L_0^*$ должны выполняться равенства $y_d = y_q = 0$. Меняя переменные y_d и y_q, можно корректировать оценки параметров асинхронного двигателя $\tilde{R}_1^*$ и $\tilde{L}_0^*$.

Обозначим $k_R = R_1^* / \tilde{R}_1^*$ и $k_L = L_0^* / \tilde{L}_0^*$, полагая при этом, что R_1^* и L_0^* являются такими переменными функции времени, что $k_R(0) = 1$ и $k_L(0) = 1$. Значения $k_R(t)$ и $k_L(t)$ будем находить как решения дифференциальных уравнений:

$$\text{sign}(\omega_1^* \cdot i_q^*) \cdot y_d = -2 \cdot \tilde{T}_{02} \cdot pk_R;\ \text{sign}(\omega_1^*) \cdot y_q = 4 \cdot \tilde{T}_{02} \cdot pk_L, \quad (26)$$

где $\tilde{T}_{02}$ — априорная оценка постоянной времени T_{02}.

Структурная схема адаптивного алгоритма управления скоростью вращения ротора асинхронного электродвигателя с идентификацией параметров приведена на рис. 5.

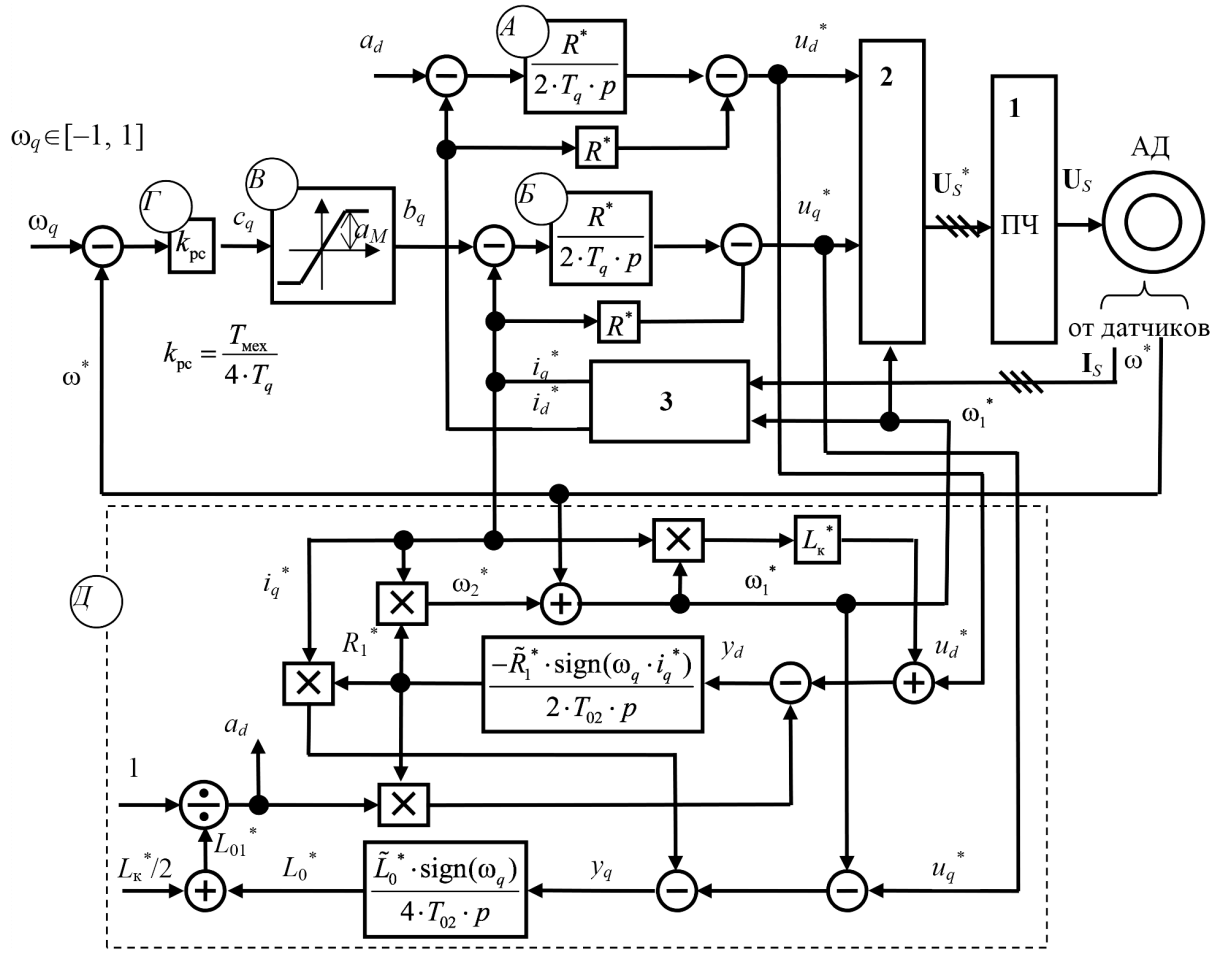


Рис. 5. Структурная схема адаптивного алгоритма управления скоростью вращения ротора асинхронного электродвигателя с идентификацией параметров:
1 — преобразователь частоты; *2* — блок преобразования координат напряжения;
3 — блок преобразования координат тока;
А — регулятор тока намагничивания; *Б* — регулятор тока нагрузки;
В — блок ограничения тока нагрузки; *Г* — регулятор скорости; *Д* — идентификатор параметров

Обсуждение (Discussion)

Основная индуктивность асинхронного электродвигателя L_0^* зависит от величины тока намагничивания. Поэтому при постоянном токе намагничивания основная индуктивность не изменяется. Применение двухзонного управления, а также алгоритмов оптимального управления по критерию минимума потерь энергии требуют изменения тока намагничивания, что ведет к изменению величины основной индуктивности.

Значение сопротивления ротора R_2 у асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором зависит от частоты токов ротора и от температуры нагрева обмотки. При векторном управлении асинхронным двигателем частота токов ротора мала и несущественно влияет на сопротивления ротора R_2. Обычно обмотка ротора изготавливается из алюминия, температурный коэффициент сопротивления которого равен $4{,}2 \cdot 10^{-3}$ 1/град. Если положить, что перегрев обмотки ротора может достигать более 120 °С, то сопротивление ротора в процессе работы может изменяться на 50 %.

Влияние ошибки относительного сопротивления обмотки ротора R_2^* при оценке частоты токов ротора (11) приводит к изменению динамики и установившихся процессов (рис. 6). Однако даже при двукратной ошибке в оценке параметра R_2^* устойчивость процессов не нарушается.

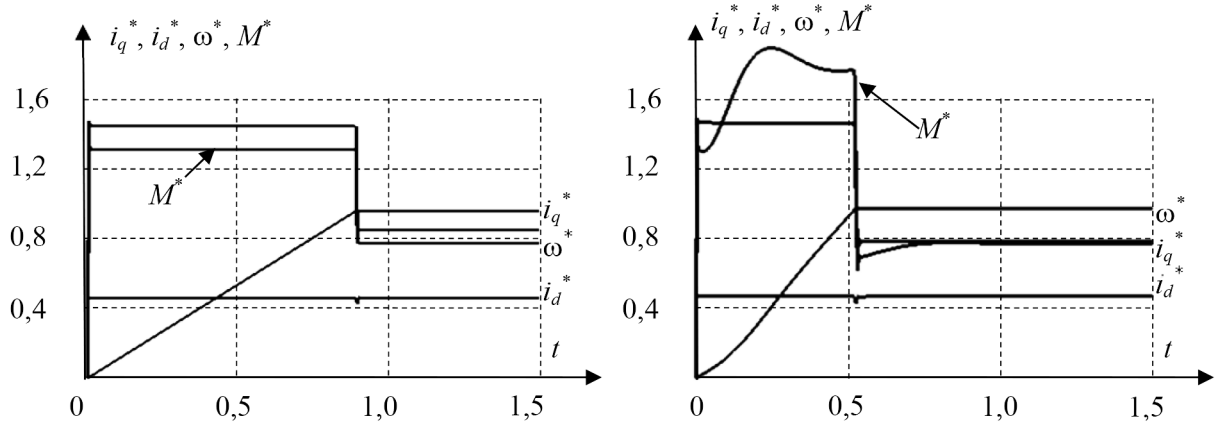


Рис. 6. Графики токов статора i_q^*, i_d^* и скорости вращения ротора ω^* при пуске в относительных единицах при оценках $\tilde{R}_{02}^*$: *а* — $\tilde{R}_2^* = R_2^*$; *б* — $\tilde{R}_2^* = 1{,}5 \cdot R_2^*$

Применение адаптивного алгоритма управления скоростью вращения ротора асинхронного электродвигателя с идентификацией параметров (см. рис. 5) устраняет проблему влияния параметров на качество управления. Будем считать, что априорные оценки параметров $\tilde{R}_1^*(0)$ и $\tilde{L}_0^*(0)$ связаны с фактическими значениями R_1^* и $\tilde{L}_0^*$ отношениями $R_1^* / \tilde{R}_1^* = 1{,}6$ и $L_0^* / \tilde{L}_0^*$. Графики переходного процесса коэффициентов $k_R(t) = \tilde{R}_1^*(t) / \tilde{R}_1^*(0)$ при пуске электродвигателя приведены на рис. 7.

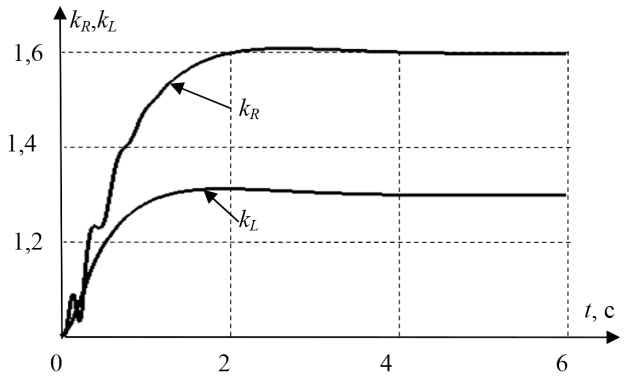


Рис. 7. Графики переходного процесса коэффициентов при пуске электродвигателя

Из приведенных графиков видно, что оценки сопротивления ротора и основной статической индуктивности стремятся к истинным значениям и примерно за 2 с достигают их даже при существенном начальном расхождении. Погрешность стационарных значений ротора и основной статической индуктивности: $\tilde{R}_1^*(\infty)$ и $\tilde{L}_0^*(\infty)$, может быть обусловлена недостоверностью информации об относительной величине индуктивности короткого замыкания асинхронного электродвигателя: $L_к^* \approx 0{,}14$–$0{,}2$. Однако следует заметить, что этот параметр асинхронного электродвигателя наиболее стабилен и имеет наименьший разброс. Кроме того, значение индуктивности короткого замыкания $L_к^*$ много меньше оцениваемой основной индуктивности L_0^*.

Заключение (Conclusion)

Все известные методы идентификации параметров асинхронного электродвигателя требуют больших вычислительных ресурсов. Этим объясняются затруднения их использования на практи-

ке. Предложенный метод идентификации достаточно прост, он позволяет по наблюдениям токов статора и скорости вращения ротора оценивать сопротивление ротора и основную статическую индуктивность асинхронного электродвигателя. Интегральные регуляторы параметров электродвигателя обеспечивают устойчивость динамических процессов в широком диапазоне априорных оценок сопротивления ротора и основной статической индуктивности. Применение данного метода устраняет недостатки векторного управления асинхронным электродвигателем, обеспечивая высокое качество динамических процессов.

СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marino R.* On-line stator and rotor resistance estimation for induction motors / R. Marino, S. Peresada, P. Tomei // IEEE Transactions on Control Systems Technology. — 2000. — Vol. 8. — Is. 3. — Pp. 570–579. DOI: 10.1109/87.845888.

2. *Matsuo T.* A rotor parameter identification scheme for vector-controlled induction motor drives / T. Matsuo, T. A. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications. — 1985. — Vol. IA-21. — Is. 3. — Pp. 624–632. DOI: 10.1109/TIA.1985.349719.

3. *Wade S.* A new method of rotor resistance estimation for vector-controlled induction machines / S. Wade, W. Dunnigan, B. W. Williams // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 1997. — Vol. 44. — Is. 2. — Pp. 247–257. DOI: 10.1109/41.564164.

4. *Luenberger D. G.* Introduction to dynamic systems/ D. G. Luenberger. — N.Y.: Wiley,1979.— 446 p.

5. *Laroche E.* Methodological insights for online estimation of induction motor parameters / E. Laroche, E. Sedda, C. Durieu // IEEE transactions on control systems technology. — 2008. — Vol. 16. — Is. 5. — Pp. 1021–1028. DOI: 10.1109/TCST.2007.916317.

6. *Vinogradov A. B.* Adapted vector control system of asynchronous electric drive / A. B. Vinogradov, V. L. Chistoserdov, A. N. Sibirtsev // Электротехника. — 2003. — №7. —С. 7–17.

7. *Архангельский Н. Л.* Системавекторного управления асинхронным электроприводом с идентификатором состояния / Н. Л. Архангельский, Б. С. Курнышев, А. Б. Виноградов, С. К. Лебедев // Электричество. — 1991. — №11. — С. 47–51.

8. *Campbell M. L.* Speed sensorless identification of the rotor time constant in induction machines / M. L. Campbell, J. Chiasson, M. Bodson, L. M. Tolbert // IEEE Transact on Automatic Control. — 2007. — Vol. 52. — No. 4. — Pp. 758–763.

9. *Однолько Д. С.* Алгоритм идентификации электромагнитных параметров асинхронной машины при работе от трехфазной электрической сети/ Д. С. Однолько // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2013. — № 1. — С. 47–55.

10. *Базылев Д. Н.* Метод идентификации сопротивлений статора и ротора асинхронного двигателя// Д. Н. Базылев, А. А. Бобцов, А. А. Пыркин, Р. Ортега // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2017. — Т. 60.— № 9. — С. 807–811.DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-9-807-811.

11. *Хлопенко Н. Я.* Структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора потокосцепления ротора / Н.Я. Хлопенко И.Н. Хлопенко // Електротехніка і електромеханіка. — 2017. — № 1. — С. 21–25. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.

12. *Saushev A. V.* System Approach to Ensure Performance of Marine and Coastal Electrical Systems during Operation / A. V. Saushev, S. E. Kuznetsov, A. B. Karakayev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 194. — № 8. — Pp. 082037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/8/082037.

13. *Терехин А. А.* Обзор способов идентификации параметров асинхронного электропривода / А. А. Терехин, Д. А. Даденков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2017. — № 22. — С. 55–65.

14. *Самосейко В. Ф.* Теоретические основы управления электроприводом/ В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.

15. *Мееров М. В.* Синтез структур систем автоматического управления высокой точности / М. В. Мееров. — М.: Наука, 1967. — 423 с.

REFERENCES

1. Marino, Riccardo, Sergei Peresada, and Patrizio Tomei. "On-line stator and rotor resistance estimation for induction motors." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 8.3 (2000): 570–579. DOI: 10.1109/87.845888.

2. Matsuo, Takayoshi, and Thomas A. Lipo. "A rotor parameter identification scheme for vector-controlled induction motor drives." *IEEE Transactions on Industry Applications* 3 (1985): 624–632. DOI: 10.1109/TIA.1985.349719.

3. Wade, Scott, W. Dunnigan, and Barry W. Williams. "A new method of rotor resistance estimation for vector-controlled induction machines." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 44.2 (1997): 247–257. DOI: 10.1109/41.564164.

4. Luenberger, D. G. *Introduction to dynamic systems*. N.Y.: Wiley, 1979.

5. Laroche, Edouard, Emmanuel Sedda, and Cécile Durieu. "Methodological insights for online estimation of induction motor parameters." *IEEE transactions on control systems technology*16.5 (2008): 1021–1028. DOI: 10.1109/TCST.2007.916317.

6. Vinogradov, A. B., V. L. Chistoserdov, and A.N. Sibirtsev. "Adaptive vector control system for an asynchronous electric drive." *Russian Electrical Engineering* 74.7 (2003): 8–20.

7. Arkhangel'skii, N. L., B. S. Kurnyshev, A. B. Vinogradov, and S. K. Lebedev. "Sistema vektornogo upravleniya asinkhronnym elektroprivodom s identifikatorom sostoyaniya." *Elektrichestvo* 1 (1991): 47–51.

8. Campbell, Mengwei Li, John Chiasson, Marc Bodson, and Leon M. Tolbert. "Speed sensorless identification of the rotor time constant in induction machines." *IEEE transactions on automatic control* 52.4 (2007): 758–763.

9. Odnolko, D. "Algorithm for Identification Electromagnetic Parameters of an Induction Motor When Running on a Three-Phase Power Plant." *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* 1 (2013): 47–55.

10. Bazylev, D. N., A. A. Bobtsov, A. A. Pyrkin, and R. Ortega. "Method for identification of asynchronous motor stator and rotor resistance." *Journal of Instrument Engineering* 60.9 (2017): 807–811. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-9-807-811

11. Khlopenko, N. J., and I. N. Khlopenko. "Structural synthesis of a stabilizing robust controller of the rotor flux linkage." *Electrical Engineering & Electromechanics* 1 (2017): 21–25. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.

12. Saushev, Aleksandr V., Sergey E. Kuznetsov, and Aleksandr B. Karakayev. "System Approach to Ensure Performance of Marine and Coastal Electrical Systems during Operation." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 194. No. 8. IOP Publishing, 2018. 082037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/8/082037.

13. Terekhin, A. A., and D. A. Dadenkov. "Review of identification methods of induction motor parameters." *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems* 22(2017): 55–65.

14. Samoseiko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravleniya elektroprivodom*. SPb.: Elmor, 2007.

15. Meerov, M. V. *Sintez struktur sistem avtomaticheskogo upravleniya vysokoi tochnosti*. M.: Nauka, 1967.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Самосейко Вениамин Францевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *samoseyko@mail.ru*, *kaf _electroprivod@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Samosejko, Veniamin F. —
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 _electroprivod@gumrf.ru, samoseyko@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 29 января 2019 г.
Received: January29, 2019.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181

SPECIAL STRUCTURE OF THE ELECTRICAL PROPULSION PLANT WITH DC-GRID SYSTEM

V. V. Romanovskiy, V. A. Malishev, A. S. Bezhik

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

Recently there has been a persistent trend in increasing the volume of electrical equipment used in ship needs. Thus, the most efficient and environmentally friendly ship power distribution system is the direct current (DC) system, which was adopted for the uniform electric power plant of the vessel in conjunction with an AC network. The ship power supply system using DC provides simple, flexible and functional integration of energy sources such as variable-speed generators and shaft generators, batteries and fuel cells. During the system creation, much attention was paid to the variable-speed generators, where the power transmission, as well as drive and traction propulsive devices are electric drives with variable speed, which can reduce fuel consumption on some types of vessels. The schematic solutions of electrical propulsion plants with a distributed DC bus for auxiliary fleet vessels on the example of the projects of the supply vessel Dina Star and the port icebreaker Aker ARC 124 are discussed in the paper. The possibilities are determined and the structure of the prospective system is analyzed. The issues of the electric energy accumulation in the dynamic modes of the plant operation are considered. The analysis of the electrical energy storage, as well as connection diagrams is performed. The efficiency of using the electrical propulsion plants in the dynamic modes characteristic of the selected types of vessels is shown. The use of diesel engines of variable speed on the vessels is considered.

Keywords: electrical propulsion plant, system with a distributed DC bus, DC systems, auxiliary fleet vessels.

For citation:
Romanovskiy, Victor V., Vladimir A. Malishev, and Artem S. Bezhik. "Special structure of the electrical propulsion plant with DC-grid system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.

УДК 621.315: 621. 3. 025

АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ШИНОЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик

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

Рассмотрена наиболее эффективная и экологически чистая судовая система распределения электроэнергии — система постоянного тока. Наиболее эффективной и экологически чистой судовой системой распределения электроэнергии является система постоянного тока, которая была принята для единой электроэнергетической установки судна в сочетании с сетью переменного тока. Судовая установка электроснабжения с использованием постоянного тока обеспечивает простую, гибкую и функциональную интеграцию источников энергии, таких как генераторы с переменной частотой вращения и валогенераторы, батареи и топливные элементы. Электроэнергетическую систему с распределенной шиной постоянного тока применяют, главным образом, для повышения отказоустойчивости генераторов переменой частоты вращения и энергосбережения. При создании данной системы большое внимание было уделено генераторам с переменной частотой вращения, где энергетическая передача, а также приводной и тяговый движители представляют собой электрические приводы с переменной частотой вращения, что может уменьшить расход топлива на некоторых типах судов. Применение быстродействующих систем накопления электроэнергии совместно с распределенной шиной постоянного тока позволяет эффективно снизить колебания мощности нагрузки в энергосистеме, сглаживая внезапные изменения в потреблении энергии. В статье рассмотрены схемные решения гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока для судов вспомогательного флота

на примере проектов судна-снабженца Dina Star и портового ледокола Aker ARC 124. Определены возможности и выполнен анализ структуры перспективной системы. Рассмотрены вопросы накопления электроэнергии в динамических режимах работы установки. Выполнен анализ хранилищ электрической энергии, а также схем подключения. Показана эффективность использования гребных электрических установок в динамических режимах, свойственных выбранным типам судов. Рассмотрено применение на судах дизелей переменной частоты вращения.

Ключевые слова: гребная электрическая установка, система с распределенной шиной постоянного тока, суда вспомогательного флота.

Для цитирования:
Романовский В. В. Анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока / В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.

Введение (Introduction)

В последнее время наблюдается стойкая тенденция наращивания объемов электрического оборудования, используемого для судовых нужд. Вследствие этого повышаются требования к качеству вырабатываемой электрической энергии, нормы которой определены в межгосударственном стандарте (ГОСТ 32144–2013). Перед судостроителями поставлены следующие задачи: электроэнергетические системы должны обеспечивать необходимое качество вырабатываемой электрической энергии, быть надежными, в том числе обладать приемлемым сочетанием стоимости установки и эксплуатации при допустимых массогабаритных показателях. При этом технико-экономические показатели определяются, главным образом, рациональным выбором величины напряжения и родом тока [1]. Так, наиболее эффективной и экологически чистой судовой системой распределения электроэнергии является система постоянного тока (DC), которая была принята для единой электроэнергетической установки судна в сочетании с сетью переменного тока. При ее создании большое внимание было уделено генераторам с переменной частотой вращения, экономии пространства и повышению производительности установки в динамических режимах [2].

Судовая установка электроснабжения с использованием постоянного тока (рис. 1) обеспечивает простую, гибкую и функциональную интеграцию источников энергии, таких как генераторы с переменной частотой вращения и валогенераторы, батареи и топливные элементы. Кроме того, силовая система с постоянным током и силовой электроникой обеспечивает перспективную основу для цифровых решений на борту судна [3], [4].

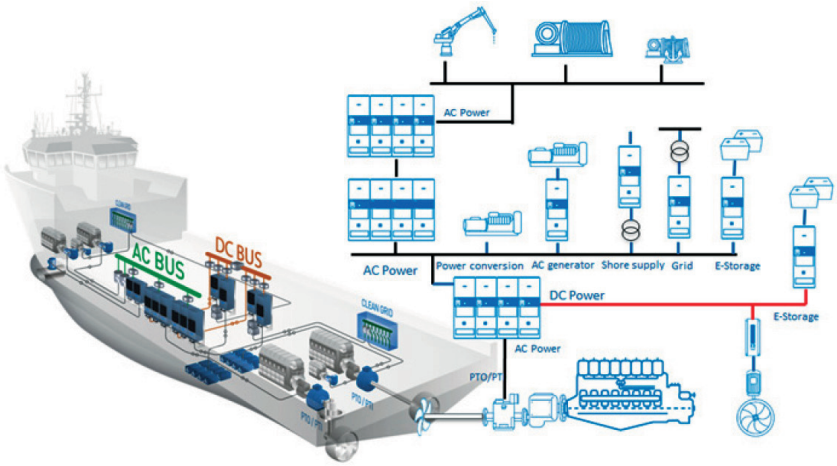


Рис. 1. Однолинейная схема ГЭУ с РШПТ

В статье рассмотрены следующие вопросы: определены возможности и выполнен анализ структуры перспективной системы, рассмотрены вопросы накопления электроэнергии в динами-

ческих режимах работы установки, выполнен анализ хранилищ электрической энергии, а также схем подключения, показана эффективность использования гребных электрических установок (ГЭУ) в динамических режимах, свойственных выбранным типам судов, рассмотрено применение на судах дизелей переменной частоты вращения, выполнен анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока для судов вспомогательного флота на примере проектов судна-снабженца Dina Star и портового ледокола Aker ARC 124.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Система DC-grid позволяет упростить использование валогенераторов с переменной частотой вращения, батарей и топливных элементов для расширенной работы с нулевым уровнем выбросов в чувствительных зонах. Эту систему применяют для повышения отказоустойчивости генераторов переменой частоты вращения и энергосбережения. Суда также получают возможность распределения основной мощности через напряжение в 1000 В постоянного тока вместо 690 В или 660 В переменного тока, что приводит к экономии до 40 % и более на кабелях.

В рассматриваемой системе (рис. 2) почти вся энергия вырабатывается генераторами с дизельными первичными двигателями. Использование электрической силовой установки, где энергетическая передача, а также приводной и тяговый движители представляют собой электрические приводы с переменной частотой вращения, может уменьшить расход топлива на некоторых типах судов. Однако в особых условиях работы, таких как динамическое позиционирование, нагрузка существенно меняется, например, под воздействием на корпус судна морских волн и при влиянии погоды [5], [6]. Внезапное изменение нагрузки представляет собой продолжительные искажения в электрической системе и в первичных двигателях. Кроме того, чтобы сохранить безопасные пределы работы энергетических установок, необходимо среднюю нагрузку рабочих приводов держать пониженной, что повышает расход топлива и выбросы вредных веществ в окружающую среду [7]. Быстродействующие системы накопления электроэнергии позволяют решить эти проблемы, эффективно снижая колебания мощности нагрузки в энергосистеме, сглаживая внезапные изменения в потреблении энергии, улучшая стабильность системы и увеличивая среднюю мощность производимой энергии с меньшим количеством работающих генераторов, и, следовательно, способствуют снижению расхода топлива [6].

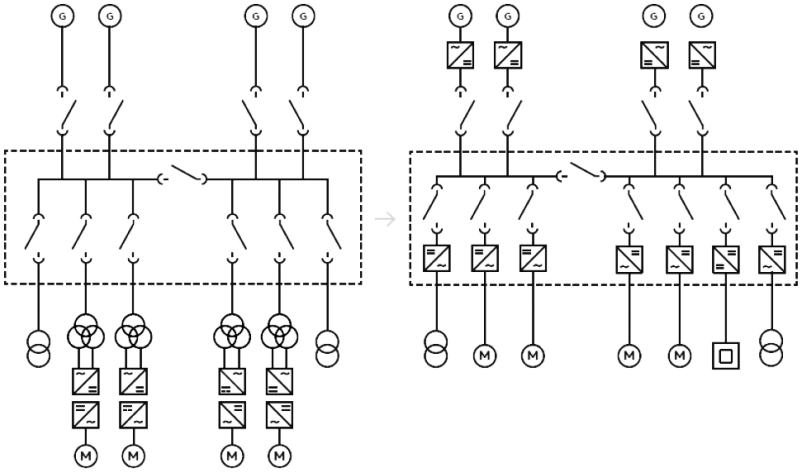


Рис. 2. Базовая трансформация АС электроэнергетической системы в DC электроэнергетическую систему

Технология специальных конденсаторов является одним из вариантов решения накопления электроэнергии. DC-DC преобразователь контролирует энергию, протекающую к специальному конденсатору, подключенному к шине постоянного тока преобразователя частоты [8], [9]. Эта конфигурация обеспечивает передачу электроэнергии в обоих направлениях. DC-DC

преобразователь представляет собой сочетание понижающего и усиливающего преобразователя. Данный конвертер испытывает повышение нагрузки, когда суперконденсатор заряжается, и разгружается в то время, как конденсатор разряжается. Направление и величина тока контролируются рабочим циклом D полупроводникового моста. В понижающем режиме, который показан на рис. 3 [10], электроэнергия протекает от сети к специальному конденсатору, который заряжается:

$$U_{sc} / U_{source} = D_1,$$

где D_1 — рабочий цикл в понижающем режиме.

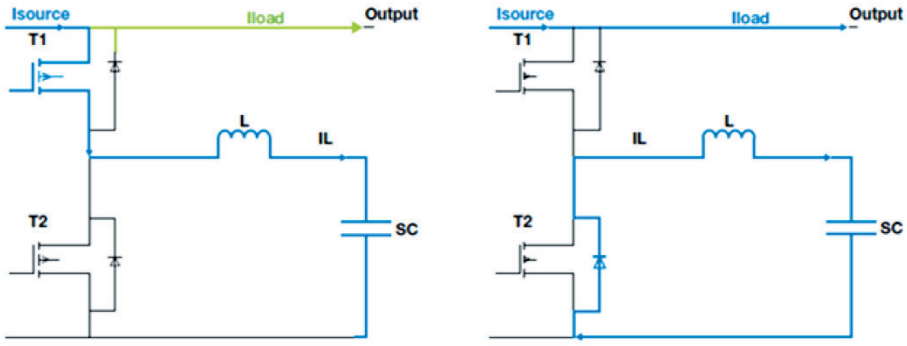


Рис. 3. Режим понижающего конвертера

В усиливающем режиме, как показано на рис. 4 [10], электроэнергия протекает от специального конденсатора в сеть, который, разряжаясь, выделяет электроэнергию:

$$U_{sc} / U_{source} = 1 / (1 - D_2),$$

где D_2 — рабочий цикл в усиливающем режиме.

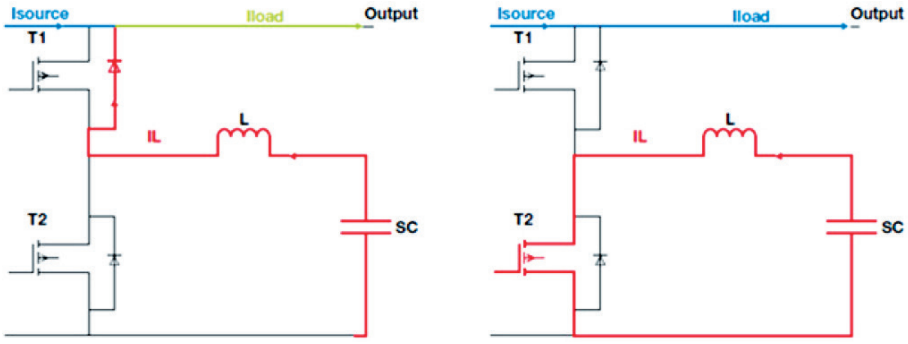


Рис. 4. Режим усиливающего конвертера

Существует несколько классических методов управления, таких как режим управления, тягой, током и мощностью [11]. В данном случае используется управление потоком мощности, поскольку более практичным является реализация данного метода как в системах управления, так и в симуляции по сравнению с контролем тяги и управлением нечетной логикой. Поток энергии системы соответствует закону сохранения энергии. Значения мощности источника, нагрузки и специального конденсатора можно представить в виде $P_{source} = P_{load} + P_{sc}$.

Чтобы регулировать рабочее напряжение, находящееся в диапазоне номинального значения, в качестве внешнего контура используется схема балансировки напряжения. Специальный конденсатор высвобождает 75 % своей энергии, когда напряжение уменьшается до 50 %. Сумма мощности суперконденсатора и мощности нагрузки должна быть равна мощности, потребляемой от источника — [12], [13]. Опорный ток суперконденсатора может быть рассчитан как его мощность, деленная на напряжение.

По сравнению с традиционным управлением потоком мощности улучшенный метод, имеющий усовершенствованную блок-схему управления, будет регулировать среднее напряжение суперконденсатора, который высвобождает 75 % своей энергии, в то время, когда напряжение уменьшается до 50 %. Энергия составляет около 25–100 %, как показано в уравнении

$$Q = 0{,}5C_{sc}U^2_{sc}.$$

Если предположить, что уровень 62,5 % считается нормальным значением хранения энергии, то среднее напряжение специального конденсатора должно поддерживаться около значения 79 %, как показано на рис. 5. Таким образом, 79 % выбрано в качестве значения заданного напряжения сверхконденсатора [14].

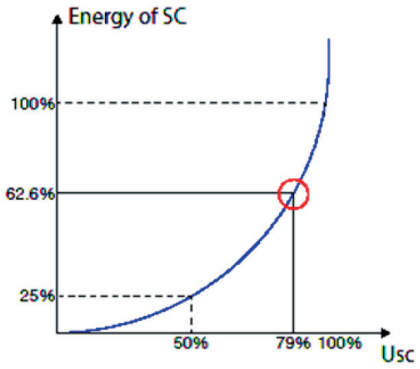


Рис. 5. График зависимости величин напряжения

Внешний контур управляет средним напряжением, тогда как внутренний является токовым контуром управления. При низком уровне энергии в конденсаторе он заряжается, напряжение повышается, и ток становится со знаком плюс. Когда нагрузка повышается, конденсатор впоследствии разряжается, ток становится со знаком минус и напряжение понижается. Этот режим управления также понижает нагрузку искажений электроэнергетической установки [15], [16]. Он позволяет более точно поддерживать нагрузку на приемлемом уровне, используя меньшее число работающих генераторов, тем самым понижая уровень потребления топлива и выброса в атмосферу вредных веществ. Два контроллера PI должны быть настроены таким образом, чтобы внутренний контур был способен выполнять мгновенные требования к управлению мощностью, в то время как внешний контур призван предотвращать дрейф напряжения [17], [18].

Оптимальная точка срабатывания дизельного двигателя будет составлять около 85 % от максимальной постоянной мощности. Кроме того, уровень эффективности быстро падает, так как нагрузка становится ниже 50 % от максимальной мощности, как показано на рис. 5. С помощью электрической системы механический движитель заменяется дизель-электрическими первичными двигателями, которые автоматически запускаются и останавливаются, поскольку спрос на нагрузку меняется [19], [20]. Это усиливает эффективность использования энергии и снижение расхода топлива за счет поддержания средней нагрузки каждого работающего дизельного двигателя вблизи его оптимальной точки нагрузки. Тем не менее на судах изменения нагрузки могут быть большими и быстрыми. Невозможно заставить генераторы включаться и выключаться каждые 5 с [21]. При использовании батареи или суперконденсатора для обеспечения вариаций нагрузки дизельные двигатели будут обеспечивать среднюю нагрузку, пиковая мощность электростанции будет уменьшена (рис. 6), что позволит увеличить среднюю загрузку двигателей до оптимальной точки с более низкой удельной мощностью расхода топлива [22].

а) б)

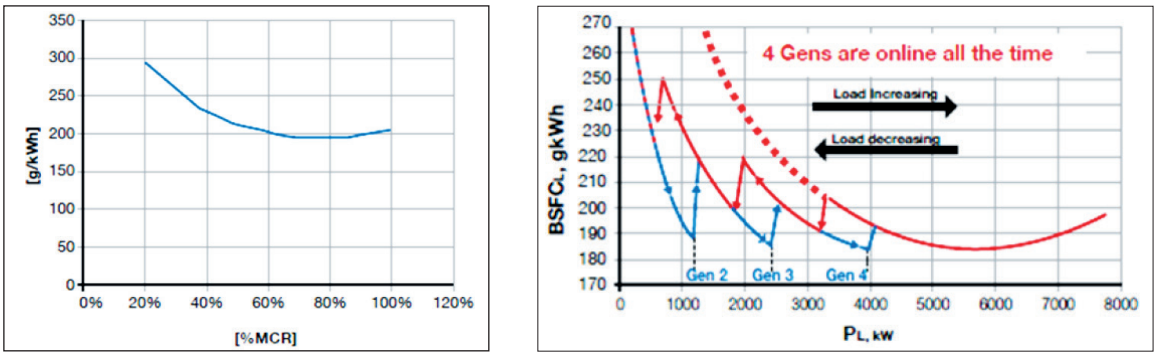


Рис. 6. Результаты испытаний, проведенные компанией *ABB*:
а — зависимость расхода топлива от номинальной нагрузки;
б — зависимость удельного расхода топлива от количества вырабатываемой электроэнергии

В дальнейшем предполагается переход к функционированию полностью электрических судов [23], [24]. Тем временем владельцы судов вкладывают все большие средства в морские гибридные системы для повышения гибкости проектирования установки, оптимизации эксплуатационных характеристик и минимизации воздействия на окружающую среду [25], [26].

Первая встроенная DC-grid система была установлена на судне-снабженце Dina Star. Компания *ABB* объявила о том, что данное судно было доставлено норвежскому владельцу *Myklebusthaug Offshore*, уточнив при этом, что система позволит судну работать на максимальном уровне энергоэффективности для минимизации выбросов. В данной схеме (рис. 7) модули преобразователей расположены в том же помещении машинного отделения, что и главный распределительный щит переменного тока.

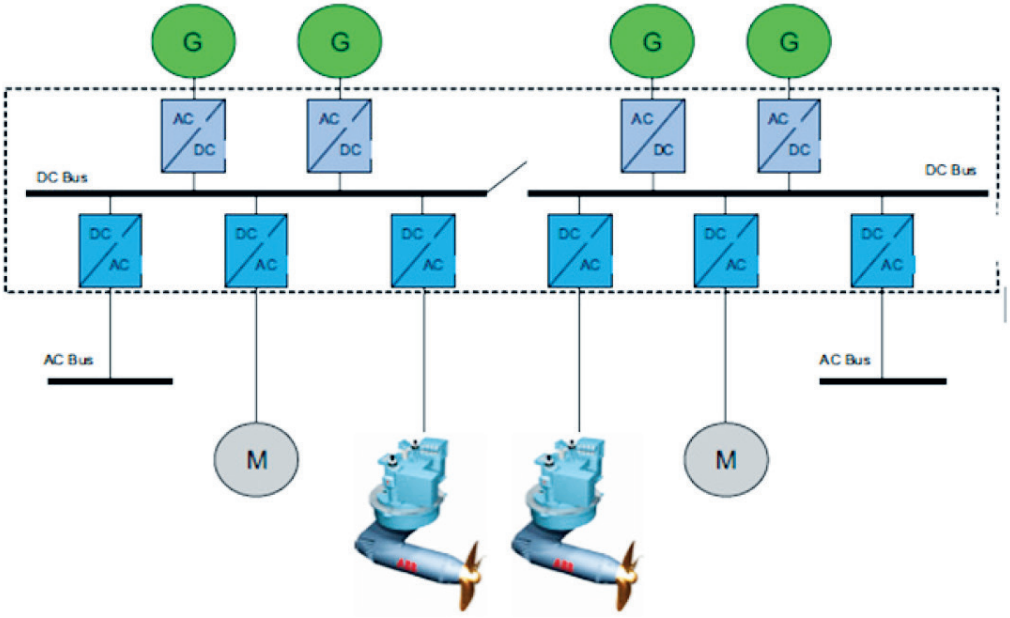


Рис. 7. Однолинейная схема ГЭУ проекта Dina Star

Для распределенной системы каждый компонент преобразователя расположен как можно ближе к соответствующему источнику питания или нагрузке. Вся генерируемая электроэнергия подается через выпрямитель в общую шину постоянного тока, которая распределяет электрическую энергию потребителям. Каждый основной потребитель затем питается отдельным инверторным блоком. ГЭУ оснащена двумя установками типа Azipod и двумя подруливающими установками. Дополнительные преобразователи для хранения энергии могут быть добавлены в сеть [27], [28]. Это хранилище энергии может быть, например, батареями или специальными конденсаторами для выравнивания изменений мощности. Кроме того, система позволяет значительно экономить вес и пространство, что приводит к увеличению грузоподъемности.

Данное судно оснащено системой управления электропотребления (рис. 8), разработанной для систем распределения энергии постоянного тока, которая имеет как обычные функции управления: резервный пуск / остановка генераторов, защита от полного отключения питания, ограничение, сброс нагрузки, так и специальные: оптимизация расхода топлива, управление альтернативными источниками электроэнергии, оптимизация электропотребления, что достигается за счет использования установленных энергоисточников в различных комбинациях на основании фактического потребления энергии и эксплуатационного профиля судна [29]. Также СУЭ использует принципы «распределенной системы управления» с одним устройством для каждого энергоисточника в электросети постоянного тока. За счет этого система PEMS становится более надежной по сравнению с обычными системами управления энергопотреблением.

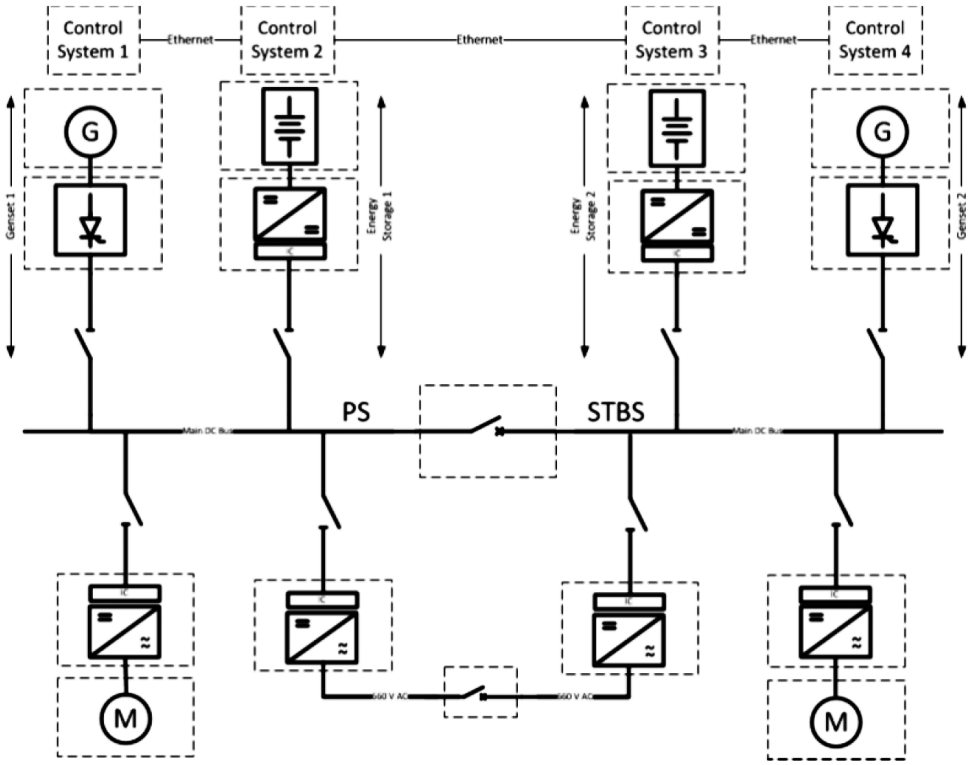


Рис. 8. Топология системы управления электроэнергией

На Выборгском судостроительном заводе осуществляется строительство портового ледокола Aker ARC 124, который предназначен для обеспечения навигации судов на подходных каналах и в акваториях портов с ледовым покровом до 1,5 м. Ледокол строится по заказу ФГУП «Атомфлот» и имеет параметры, приведенные в следующей таблице:

Наименование параметра	Значение
Длина наибольшая	89,2 м
Длина по КВЛ	77,6 м
Ширина по КВЛ	19,9 м
Осадка максимальная	7,5 м
ДВТ при максимальной осадке	2000 т
Главные ДГ	3 × 4880 кВт
Стояночный ДГ	800 кВт
ГЭУ	4 ГЭД по 3000 кВт
Ледопроходимость	2 уз в 1,5-метровом льду
Упор на швартовах	115 т
Скорость на чистой воде	15 уз
Ледовый класс	РМРС — Icebreaker 7, или МАКО — РС3

Отличительной чертой судна является движительный комплекс, состоящий из четырех независимых азимутальных пропульсивных установок с электрическим приводом Azipod ABB Ice-1400 тягового типа, мощностью около 3 МВт каждая. Винто-рулевые колонки расположены попарно в носу и корме судна, что дает возможность максимально эффективной работы во льду как кормой, так и носом (рис. 8).

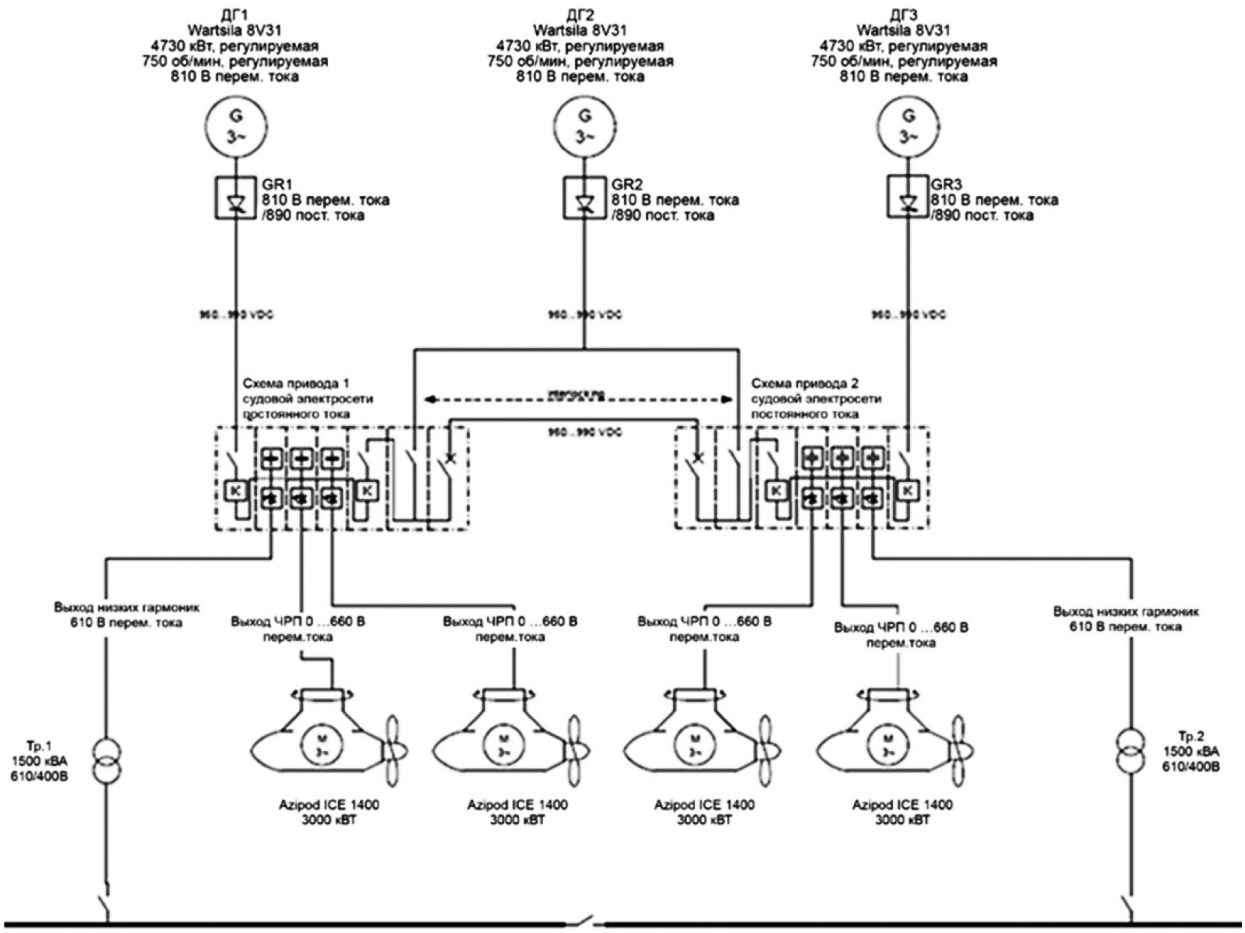


Рис. 8. Схема электроэнергетической системы ледокола

В состав схемы главного тока входят:

– три главных синхронных генератора мощностью 4730 кВт, регулируемые 750 об/мин, регулируемое выходное напряжение синхронных генераторов 810 В;

– три управляемых выпрямителя, преобразующих 810 В переменного тока в регулируемые 890 В постоянного тока;

– четыре инвертора частоты на базе ACS800 (компании ABB), преобразующих постоянное напряжение в регулируемое в пределах 0–660 В переменного напряжения для управления системами АЗИПОД;

– четыре винто-рулевые колонки типа АЗИПОД ICE 1400 3000 кВт, имеющие в своем составе двигатели с постоянными магнитами, которые существенно упрощают техническое обслуживание винто-рулевых колонок;

– для электроснабжения судовой электростанции используются два трансформатора мощностью 1500 кВ·А 610В / 400 В, на выходе которых после фильтрации от высших гармоник получают 400 В 50 Гц.

Основной задачей преобразователей частоты, работающих на электростанцию, является поддержание постоянства стандартных параметров напряжения и частоты. Качество электроэнергии должно обеспечиваться системой фильтров. Расчетные характеристики гребной электрической установки (рис. 9) показывают широкие возможности реализации необходимых для ледокола режимов работы ГЭУ, обеспечивая гиперболу постоянства мощности, ограничения момента стоянки ГЭД и требуемую частоту вращения гребного винта [30].

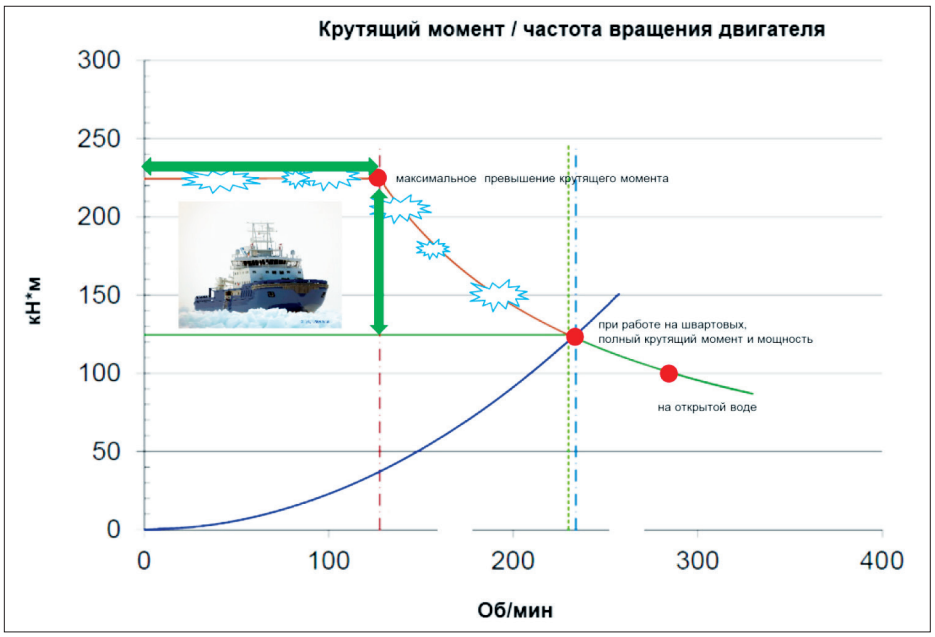


Рис. 9. Механическая и винтовая (швартовная) характеристики ГЭД

Выводы (Summary)

На основании анализа схемных решений для гребных электрических установок со встроенной распределенной шиной постоянного тока можно сделать вывод о том, что данный тип установки позволяет повысить эффективность использования единой электроэнергетической системы, сочетая в себе достоинства использования переменного и постоянного тока. Данная установка соответствует правилам и положениям селективности и защиты оборудования, она может быть использована для любого морского применения и работает при номинальном напряжении в пределах 1000 В постоянного тока и более. Применение накопителей энергии открывает новые возможности повышения эффективности системы, создания полностью электрифицированных судов.

Преимуществами данной системы управления являются:

– улучшение работы всего судового комплекса;

– снижение вредных выбросов в атмосферу и воду;

– снижение эксплуатационных расходов из-за снижения расхода топлива;

– низкие эксплуатационные расходы, связанные с дизельными двигателями;

– снижение уровня шума;

– улучшенная долгосрочная эффективность использования системы электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мясникова К. Д.* Современное состояние и развитие морского и речного флота России / К. Д. Мясникова // Молодой ученый. — 2016. — № 13–1 (117). — С. 66–69.

2. *Григорьев А. В.* Теоретические вопросы расчета токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, Ю. А. Кулагин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.

3. *Романовский В. В.* Использование постоянного тока в перспективных гребных электрических установках / В. В. Романовский, О. А. Зубин, А. Г. Гостев // Морское образование: традиции, реалии перспективы: материалы науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 211–215.

4. *Игнатьева Н. А.* Современное состояние и перспективы развития судостроения в российской федерации / Н. А. Игнатьева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2016. — № 4–6. — С. 1159–1162.

5. *Романовский В. В.* Гребные электрические установки для арктических ледоколов / В. В. Романовский // Морской вестник. — 2015. — № 4 (56). — С. 53–54.

6. *Гармаш Д.* Суда спасатели: новые подходы к концепции создания / Д. Гармаш, Т. Наумова, М. Темкин, П. Мартулев // Морской флот. — 2014. — № 5. — С. 36–46.

7. *Гилерович Ю. М.* Перспективы развития гребных электрических установок / Ю. М. Гилерович, В. С. Спешилов, В. А. Туманов // Судостроение. — 1997. — № 4. — С. 51–54.

8. *Романовский В. В.* Системы электродвижения для перспективных судов / В. В. Романовский, В. А. Касатов // Судостроение. — 1999. — № 4. — С. 35–37.

9. *Иванов А.* Состояние и перспективы развития судовых ГЭУ / А. Иванов, В. Самсыгин // Морской флот. — 1999. — № 2. — С. 23–24.

10. *Thounthong P.* Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications / P. Thounthong, S. Rael, B. Davat // Journal of Power Sources. — 2009. — Vol. 193. — Is. 1. — Pp. 376–385. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.120

11. *Григорьев А. В.* Экспериментальные исследования системы электро движения переменного тока с полупроводниковым преобразователем / А. В. Григорьев // Судостроение. — 2007. — № 3 (772). — С. 30–32.

12. *Chen H.* Progress in electrical energy storage system: A critical review / H. Chen, *T.* Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding // Progress in Natural Science. — 2009. — Vol. 19. — Is. 3. — Pp. 291–312. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.

13. *Han J.* An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat / J. Han, J.F. Charpentier, T. Tang // Energies. — 2014. — Vol. 7. — Is. 5. — Pp. 2799–2820. DOI: 10.3390/en7052799.

14. *Сакович И. А.* Качество выходного напряжения управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем / И. А. Сакович, А. И. Черевко, С. В. Платоненков // Электричество. — 2016. — № 1. — С. 43–49.

15. *Петухов В. А.* Анализ и оптимизация эксплуатационных режимов судовых дизель-генераторов / В. А. Петухов, А. П. Баранов, А. В. Григорьев // Эффективность работы энергетических установок и технических средств: междунар. сб. науч. тр. — Калининград: Изд-во КГТУ, 2003. — С. 98–105.

16. *Яцкевич Я.* Параметрическая модель среднего значения синхронных машинно-выпрямительных систем / Я. Яцкевич, С. Д. Пекарек, А. Давуди // Сделки по преобразованию энергии. — 2006. — № 21 (1). — С. 9–18.

17. *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.

18. *Григорьев А. В.* Исследование дизель-генератора, работающего с переменной частотой вращения, на компьютерной модели / А. В. Григорьев // Электросистемы. — 2006. — № 2 (14). — С. 17–19.

19. *Румянцев А. Ю.* Решение задачи оптимального управления динамической системой, обеспечивающее желаемые переходные процессы / А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2015. — Т. 2. — № 4. — С. 92–94.

20. *Яровенко В. А.* Системный подход к вопросам проектирования гребных энергетических установок / В. А. Яровенко // Проблеми техніки. — 2013. — № 2. — С. 82–94.

21. *Григорьев А. В.* Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций / А. В. Григорьев, В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 39–43.

22. *Черевко А. И.* Качество выходного напряжения выпрямителя, построенного на базе ТВМП, при четном и нечетном числе секций КО ТВМП / А. И. Черевко, М. М. Музыка, С. В. Платоненков [и др.] // Электротехника. — 2012. — № 4. — С. 41–45.

23. *Голубев К. Г.* Методология формирования схемно-технических и конструктивных решений разрабатываемой единой электроэнергетической системы для судов с электродвижением / К. Г. Голубев // Морской вестник. — 2014. — № 1. — С. 49–51.

24. *Губанов Ю. А.* Электроснабжение и электропитание корабельных потребителей: работа по исправлению нагрузки / Ю. А. Губанов, К. В. Жданов, А. Г. Сотников, Д. С. Муликов // Морской вестник. — 2014. — № 1 (49). — С. 43–48.

25. *Гольдштейн М. Е.* Функции передачи постоянного тока на базе преобразователей напряжения в режиме установившегося короткого замыкания в энергосистеме / М. Е. Гольдштейн, Н. В. Корбуков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2015. — Т. 15. — № 3. — С. 20–24. DOI: 10.14529/power150303.

26. *Коршунов В. Н.* Перспективы развития судовых электроэнергетических систем / В. Н. Коршунов, Т. Е. Кувшинов, А. Н. Шеин // Вологдинские чтения. — 2008. — № 69. — С. 139–145.

27. *Яровенко В. А.* Системный подход к вопросам проектирования гребных энергетических установок / В. А. Яровенко // Проблеми техніки. — 2013. — № 2. — С. 82–94.

28. *Романовский В. В.* Перспективы модернизации гребных электрических установок ледоколов / В. В. Романовский, В. С. Иванов, А. И. Лебедев // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 56–59.

29. *Китаева С. А.* Синтез оптимальной системы управления вентильной гребной электрической установкой в условиях действия случайного морского волнения / С. А. Китаева, К. В. Чупина // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. — 2007. — № 19. — С. 59–64.

30. *Лагода Ф. И.* Вентильные двигатели / Ф. И. Лагода // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. — С. 76–80.

REFERENCES

1. Myasnikova, K. D. “Sovremennoe sostoyanie i razvitie morskogo i rechnogo flota Rossii.” *Molodoi uchenyi* 13-1(117) (2016): 66–69.

2. Grigoryev, Andrey V., Aleksej Yu. Vasilyev, and Yurii A. Kulagin. “Theoretical issues of calculation of short-circuit currents in shipboard electric power systems with electric power distribution on a direct current.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.

3. Romanovskii, V. V., O. A. Zubin, and A.G. Gostev. “Ispol’zovanie postoyannogo toka v perspektivnykh grebnykh elektricheskikh ustanovkakh.” *Morskoe obrazovanie: traditsii, realii perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015. 211–215.

4. Ignatyeva, N. A. “Current status and prospects of shipbuilding development in the Russian federation.” *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental’nykh issledovanii* 4-6 (2016): 1159–1162.

5. Romanovskii, V.V. “Grebnye elektricheskie ustanovki dlya arkticheskikh ledokolov.” *Morskoi vestnik* 4(56) (2015): 53–54.

6. Garmash, D., T. Naumova, M. Temkin, and P. Martulev. “Suda spasateli: novye podkhody k kontseptsii sozdaniya.” *Morskoi flot* 5 (2014): 36–46.

7. Gilerovich, Yu. M., V.S. Speshilov, and V.A. Tumanov. “Perspektivy razvitiya grebnykh elektricheskikh ustanovok.” *Sudostroenie* 4 (1997): 51–54.

8. Romanovskii, V.V., and V. A. Kasatov. “Sistemy elektrodvizheniya dlya perspektivnykh sudov.” *Sudostroenie* 4 (1999): 35–37.

9. Ivanov, A., and V. Samsygin. “Sostoyanie i perspektivy razvitiya sudovykh GEU.” *Morskoi flot* 2 (1999): 23–24.

10. Thounthong, Phatiphat, Stephane Rael, and Bernard Davat. “Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications.” *Journal of Power Sources* 193.1 (2009): 376–385. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.120

11. Grygoriev, A.V. “Experimental investigations of electrical alternated current motion system provided with semiconductor converter.” *Shipbuilding* 3(772) (2007): 30–32.

12. Chen, Haisheng, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, and Yulong Ding. “Progress in electrical energy storage system: A critical review.” *Progress in natural science* 19.3 (2009): 291–312. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014

13. Han, Jingang, Jean-Frederic Charpentier, and Tianhao Tang. “An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat.” *Energies* 7.5 (2014): 2799–2820. DOI:10.3390/en7052799

14. Sakovich, I. A., A. I. Cherevko, and S. V. Platonenkov. "Output Voltage Quality of a Controlled Rectifier Made Using a Transformer with Rotating Magnetic Field." *Electrical Technology Russia* 1 (2016): 43–49.

15. Petukhov, V. A., A. P. Baranov, and A. V. Grigor'ev. "Analiz i optimizatsiya ekspluatatsionnykh rezhimov sudovykh dizel'-generatorov." *Effektivnost' raboty energeticheskikh ustanovok i tekhnicheskikh sredstv: mezhdunar. sb. nauch. tr.* Kaliningrad: Izd. KGTU, 2003. 98–105.

16. Yatskevich, Ya., S. D. Pekarek, and A. Davudi. "Parametricheskaya model' srednego znacheniya sinkhronnykh mashinno-vypryamitel'nykh system." *Sdelki po preobrazovaniyu energii* 21(1) (2006): 9–18.

17. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivlyuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo uni-versiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

18. Grigor'ev, A. V. "Issledovanie dizel'-generatora, rabotayushchego s peremennoi chastotoi vrashcheniya, na komp'yuternoi modeli." *Elektrosistemy* 2(14) (2006): 17–19.

19. Rumyantsev, A. Y., and V. F. Samoseyko. "Solution of the Problem of Optimal Control of a Dynamic System that Provides the Desired Transient Response." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 2.4 (2015): 92–94.

20. Yarovenko, V. A. "Sistemnyi podkhod k voprosam proektirovaniya grebnykh energeticheskikh ustanovok." *Problemitekhniki* 2 (2013): 82–94.

21. Grigor'ev, A. V., and V. Yu. Kolesnichenko. "Improving the efficency of marine disel power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 39–43.

22. Cherevko, A. I., M. M. Muzyka, S. V. Platonenkov, I. A. Sakovich, and I. Yu. Kuz'min. "Kachestvo vykhodnogo napryazheniya vypryamitelya, postroennogo na baze TVMP, pri chetnom i nechetnom chisle sektsii KO TVMP." *Elektrotekhnika* 4 (2012): 41–45.

23. Golubev, K. G. "Metodologiya formirovaniya skhemno-tekhnicheskikh i konstruktivnykh resheniy razrabatyvaemoy edinoy elektroenergeticheskoy sistemy dlya sudov s elektrodvizheniem." *Morskoy vestnik* 1 (2014): 49–51.

24. Gubanov, Yu. A., K. V. Zhdanov, A. G. Sotnikov, and D. S. Mulikov. "Elektrosnabzhenie i elektropitanie korabel'nykh potrebitelei: rabota po ispravleniyu nagruzki." *Morskoi vestnik* 1(49) (2014): 43–48.

25. Goldstein, M. E., and N. V. Korbukov. "VSC-HVDC transmission functions under short-circuit conditions in ac power system." *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"* 15.3 (2015): 20–24. DOI: 10.14529/power150303.

26. Korshunov, V. N., T. E. Kuvshinov, and A. N. Shein. "Perspektivy razvitiya sudovykh elektroenergeticheskikh system." *Vologdinskie chteniya* 69 (2008): 139–145.

27. Yarovenko, V. A. "Sistemnyi podkhod k voprosam proektirovaniya grebnykh energeticheskikh ustanovok." *Problemitekhniki* 2 (2013): 82–94.

28. Romanovskii, V. V., V. S. Ivanov, and A. I. Lebedev. "Perspektivy modernizatsii grebnykh elektricheskikh ustanovok ledokolov." *Morskoi vestnik* 2S(11) (2013): 56–59.

29. Kitaeva, S. A., and K. V. Chupina. "Sintez optimal'noi sistemy upravleniya ventil'noi grebnoi elektricheskoi ustanovkoi v usloviyakh deistviya sluchainogo morskogo volneniya." *Nauchnye trudy Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo rybokhozyaistvennogo universiteta* 19 (2007): 59–64.

30. Lagoda, F. I. "Ventil'nye dvigateli." *Aktual'nye voprosy energetiki: materialy Vserossiiskoi nauch. konf. studentov, magistrantov, aspirantov.* Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 76–80.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Романовский Виктор Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *romanovskiyvv@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanovskiy, Victor 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: *romanovskiyvv@gumrf.ru*

Малышев Владимир Алексеевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*
Бежик Артем Сергеевич — Аспирант
Научный руководитель:
Романовский Виктор Викторович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7,
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*

Malishev, Vladimir A. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*
Bezhik, Artem S. — Postgraduate
Supervisor:
Romanovskiy, Victor V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 31 января 2019 г.
Received: January 31, 2019.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-182-192

THE FILTERING PROPERTIES OF ELECTRICAL MACHINES AT WIDTH-PULSE MODULATION

F. A. Gelver[1,2], I. V. Belousov[2,1]

[1] — Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russian Federation
[2] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

The filtering properties evaluation of various types of electrical machines with the pulse-width modulation is considered in the paper. An indicator allowing the evaluation of the filtering properties of RL - load is introduced in the paper. The introduced indicator with certain assumptions allows us to assess the filtering properties of electric machines for determination the main quality indicator - the dispersion of currents flowing in the windings of the electric machines. The characteristic of electromagnetic processes, generated by PWM, in an electric motor is given. Three types of the most common AC machines: asynchronous, synchronous, and reactive electric machines - are compared on the proposed indicator. A mathematical description of these types of AC electric machines in a natural coordinate system is presented. Using the Lyapunov transformation, the equations written in the natural coordinate system are transformed into the equations written in the d and q axes. The characteristic polynomial is presented and the roots of the characteristic equation are found. The roots of the characteristic equation allow us to determine the analytical dependence for determining the index of filtering properties of the considered electric machine. For the convenience of writing and comparing the results of various electric drives, characterized by significant differences in power, the basic and relative values of the electric machines parameters are introduced. For the considered types of electric machines, the relative values of their parameters are presented for a wide range of powers represented in relative units. The numerical values of indicators of filtering properties of the considered types of electrical machines are determined, their comparison is made and the conclusions are made. The obtained results have a great practical importance at the synthesis of algorithms to control the powerful electric drives at the limitations imposed on the switching frequency of the power semiconductor elements of the electric converter.

Keywords: pulse width modulation (PWM), current dispersion, filtering properties, Lyapunov transformations, basic and relative values, asynchronous electric motor, synchronous electric motor, reactive electric motor, anisotropic magnetic conductivity, longitudinal rotor blend, transverse rotor blend.

For citation:
Gelver, Fedor A., and Igor V. Belousov. "The filtering properties of electrical machines at width-pulse modulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 182–192. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-182-192.

УДК: 621.313.3

ФИЛЬТРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Ф. А. Гельвер[1,2], И. В. Белоусов[2,1]

[1] — ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена вопросам оценки фильтрующих свойств различных типов электрических машин при широтно-импульсной модуляции. Введен показатель, который позволяет осуществлять оценку фильтрующих свойств RL-нагрузки. Введенный показатель при определенных допущениях позволяет производить оценку фильтрующих свойств электрических машин для определения основного показателя качества — дисперсии токов, протекающих в обмотках электрических машин. Приведена характеристика электромагнитных процессов в электрическом двигателе, порождаемых широтно-импульсной модуляци-

ей. Для сравнения по предложенному показателю произведено сравнение трех наиболее распространенных машин переменного тока: асинхронной, синхронной и реактивной электрических машин. Представлено математическое описание данных типов электрических машин переменного тока в естественной системе координат. С использованием преобразования Ляпунова уравнения, записанные в естественной системе координат, преобразованы в уравнения, записанные в осях d и q. Представлен характеристический полином и найдены корни характеристического уравнения. Корни характеристического уравнения позволили определить аналитическую зависимость для определения показателя фильтрующих свойств рассматриваемой электрической машины. Для удобства записи и сопоставления полученных результатов различных электроприводов, характеризующихся значительными отличиями в мощности, введены базовые и относительные величины параметров электрических машин. Для рассмотренных типов электрических машин приведены относительные значения их параметров для широкого диапазона мощностей, представленных в относительных единицах. Определены численные значения показателей фильтрующих свойств рассмотренных типов электрических машин, выполнено их сравнение и сделаны выводы. Полученные результаты имеют большое практическое значение при синтезе алгоритмов управления мощными электроприводами при ограничениях, наложенных на частоту коммутации силовых полупроводниковых элементов электрического преобразователя.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, дисперсия тока, фильтрующие свойства, преобразования Ляпунова, базовые и относительные величины, асинхронный электродвигатель, синхронный электродвигатель, реактивный электродвигатель, анизотропная магнитная проводимость, продольная шихтовка ротора, поперечная шихтовка ротора.

Для цитирования:
Гельвер Ф. А. Фильтрующие свойства электрических машин при широтно-импульсной модуляции / Ф. А. Гельвер, И. В. Белоусов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 182–192. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-182-192.

Введение (Introduction)

В современных транспортных средствах, особенно автономных, все большее применение находят системы электродвижения с использованием регулируемого электропривода. Бурное развитие таких систем связано с лучшими эксплуатационными характеристиками, более высокой экономичностью и энергетической эффективностью, а также практически отсутствием вредных выбросов в окружающую среду. В состав электроприводов транспортных средств входят электрический, электромеханический и механические преобразователи. Современные электрические преобразователи реализуют на элементах силовой электроники, которые работают в ключевом режиме работы с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На выходе таких электрических преобразователей должен быть установлен фильтр низкой частоты для обеспечения высокого качества токов, протекающих по нагрузке. Качество токов характеризуется дисперсией тока. Индуктивные электрические машины сами являются фильтром низкой частоты. Поэтому необходима оценка фильтрующих свойств электрических машин для определения дисперсии токов, протекающих в них.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Базовые и относительные величины электрических машин. Для оценки фильтрующих свойств электрических машин необходимо осуществить их математическое описание в виде дифференциальных уравнений. При исследовании электрических машин удобно применять относительные единицы различных физических величин. Данное удобство обусловлено тем, что результаты исследования различных электроприводов, характеризующихся значительными отличиями в мощности, становятся универсальными и сопоставимыми. Кроме того, введение относительных величин ведет к сокращению числа параметров, фигурирующих в исследовании, и делает полученные результаты более обозримыми и удобными для использования [1]. Для введения относительных единиц переменных, используемых в математической модели, требуется выделить набор базовых величин. Базовые величины разделим на *основные* и *производные*.

В качестве основных базовых величин примем минимальный набор констант, имеющих различные единицы измерений, который позволяет выразить производные базовые величины через основные базовые величины. При выборе основных базовых величин целесообразно исходить из номинальных данных электрической машины: номинального фазного напряжения статора электродвигателя $U_н$, номинального тока статора $I_н$, номинальной угловой частоты напряжения статора $\omega_н$. В качестве основных базовых величин целесообразно использовать следующие:

$$U_б = \sqrt{2}U_н\,;\; I_б = \sqrt{2}I_н;\; \omega_б = \omega_н.$$

Производные базовые величины синтезируются из основных базовых величин: сопротивления: $R_б = U_б/I_б = U_н/I_н$; индуктивности: $L_б = U_б/I_б/\omega_б$; электромагнитного момента: $M_б = p\,(m/2)U_б I_б/\omega_б$; мощности: $P_б = (m/2)U_б I_б$, где m — число фаз; p — число пар полюсов.

Переменная, выраженная в относительных единицах, равна отношению переменой к соответствующему базовому значению. Переменные, выраженные в относительных единицах, будем помечать верхним индексом *.

Характеристика электромагнитных процессов в электрическом двигателе, порождаемых ШИМ. Электромагнитные процессы в электродвигателях переменного тока описываются дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами. При исследовании таких уравнений, как правило, используется теория Ляпунова – Флоке. Основной результат этой теории, сформулированный А. М. Ляпуновым, сводится к доказательству теоремы о возможности преобразования дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами к дифференциальным уравнениям с постоянными коэффициентами. Возмущающие воздействия таких уравнений будут импульсными периодическими функциями, частота которых совпадает с частотой модуляции. Возмущающие воздействия уравнений также будут функциями модулирующих функций, частота которых существенно ниже частоты модуляции. Поэтому при анализе электромагнитных процессов, обусловленных ШИМ преобразователя, можно считать, что возмущающие воздействия преобразованных уравнений будут импульсными периодическими функциями, частота которых определяется только частотой модуляции. Таким образом, в силу относительной малости интервала ШИМ, возмущающие воздействия на интервале модуляции можно считать постоянными величинами.

Исследования [1] показывают, что динамические процессы в электродвигателях переменного тока носят колебательный характер. Решения дифференциальных уравнений напряжений электродвигателя, подвергнутых преобразованию Ляпунова, относительно токов в обмотках на интервале ШИМ могут быть представлены выражением

$$i_X = B_0 + \sum_{k=1}^{n} \exp(\delta_k t)(B_k \cos(\omega_k t) + C_k \sin(\omega_k t)), \qquad (1)$$

где δ_k и ω_k — соответственно действительная и мнимая части корня k-го характеристического уравнения; B_0, B_k и C_k — постоянные интегрирования.

Покажем, что динамический процесс развития тока (1) в электрической машине на периоде ШИМ можно аппроксимировать LR-фильтром, постоянная времени которого $T = L/R$ много больше периода модуляции. Так как период модуляции мал, динамику тока (1) можно представить двумя слагаемыми ряда Маклорена:

$$i_X = A_0 + C_0 t, \qquad (2)$$

где $A_0 = B_0 + \sum_{k=1}^{n} B_k;\; C_0 = \sum_{k=1}^{n} \left(B_k \delta_k + C_k \omega_k\right)$.

Очевидно, что ток в цепи LR на интервале модуляции также можно представить выражением (2). Таким образом, фильтрующие свойства электрической машины на интервале ШИМ могут быть представлены LR-цепью. Рассмотрим некоторые особенности представления параметров LR-цепи, которая используется для аппроксимации фильтрующих свойств электрических машин.

Постоянные времени *LR*-цепи представим в относительном виде: $T^* = \omega_б \cdot T = \omega_б \cdot L/R$. Относительная постоянная времени нагрузки T^* далее рассматривается как характеристика фильтрующих свойств электрической машины, не связанная с управлением ШИМ. Если период модуляции ШИМ T_0 фиксирован исходя из ограничения на потери мощности в электронных ключах, то отношение

$$\varepsilon = \frac{T_0}{T} = \frac{\omega_б T_0}{T^*}$$

является характеристикой фильтрующих свойств электрической машины.

Для оценки фильтрующих свойств динамических систем, поведение которых описывается дифференциальными уравнениями, необходимо исследовать связи их параметрического пространства с переменными состояния. Выполнить такое исследование в общем случае представляется достаточно проблематичным. Однако для динамических систем, поведение которых описывается линейными дифференциальными уравнениями, такая связь определяется характеристическим уравнением. Известно, что отрицательные действительные части корней являются характеристиками скорости затухания динамических процессов. Обратные значения действительных частей корней являются постоянными времени. Следовательно, минимальный корень характеристического уравнения p_{max} может использоваться для оценки показателя фильтрующих свойств нагрузки при заданной частоте модуляции:

$$\varepsilon = -T_0 p_{max} = -T_0 \omega_б p^*_{max} = -\frac{2\pi p^*_{max}}{f^*}, \qquad (3)$$

где $p^*_{max} = p_{max}/\omega_б$ — минимальное относительное значение действительной части корней характеристического уравнения; $f^* = 2\pi/\omega_б/T_0$ — относительная частота модуляции.

Следует отметить, что наименьшему значению ε соответствуют лучшие фильтрующие свойства электрической машины. При сопоставлении полученных при сравнении различных типов электрических машин данных может быть использован параметр $\varepsilon_0 = \varepsilon \cdot f$, который характеризует фильтрующие свойства электрической машины без привязки к частоте модуляции силовых ключей электрического преобразователя.

Проведем исследование фильтрующих свойств различных типов электрических машин, наиболее часто используемых в регулируемом электроприводе транспортных средств, и выполним их сравнение по показателю фильтрующих свойств ε. К наиболее распространенным типам электрических машин относятся: асинхронная, синхронная и бурно развивающийся класс синхронных электрических машин — реактивная электрическая машина. Более подробно конструкция, принцип действия реактивных электрических машин с зубчатым статором и ротором представлены в источниках [2]–[4], а в монографии [5] приведена теория проектирования и управления такой электрической машиной. Продолжением развития конструкции реактивных электрических машин явилась реактивная машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора [6]–[8], принцип действия, теория проектирования и управления которой более полно представлены в источниках [9]–[11].

Фильтрующие свойства асинхронного электродвигателя при ШИМ. Асинхронные электродвигатели являются наиболее распространенным типом электрических машин, используемых в регулируемом электроприводе транспортных средств [12], [13]. Для решения поставленной задачи рассмотрим поведение корней характеристического уравнения асинхронного электродвигателя в функции скорости вращения ротора.

Уравнения, связывающие напряжения на обмотках статора и ротора асинхронной машины и токи, в естественной системе координат имеют следующий вид [1]:

$$\mathbf{U}_S = R_1 \mathbf{I}_S + L_1 p \mathbf{I}_S + p\{\mathbf{L}_{SS}\mathbf{I}_S + \mathbf{L}_{SR}(\gamma)\mathbf{I}_R\};$$

$$\mathbf{0} = R_2 \mathbf{I}_R + L_2 p \mathbf{I}_R + p\{\mathbf{L}_{RR}\mathbf{I}_R + \mathbf{L}_{RS}(\gamma)\mathbf{I}_S\}, \qquad (4)$$

где R_1 — сопротивление обмотки статора; R_2 — приведенное сопротивление обмотки ротора; L_1 — индуктивность рассеяния обмотки статора; L_2 — приведенная индуктивность рассеяния обмотки

ротора; $\mathbf{U}_S$ — вектор фазных напряжений статора; $\mathbf{I}_S$ — вектор токов статора; $\mathbf{I}_R$ — вектор приведенных токов ротора; $\mathbf{L}_{SS} = (2/m)L_0\mathbf{D}_S^T(0)\mathbf{D}_S(0)$ — матрица индуктивностей обмоток статора; $\mathbf{L}_{RR} = (2/m)L_0\mathbf{D}_R^T(0)\mathbf{D}_R(0)$ — матрица индуктивностей обмоток ротора; $\mathbf{L}_{SR}(\gamma) = \mathbf{L}_{RS}^T(\gamma) = (2/m)L_0\mathbf{D}_S^T(\gamma)\mathbf{D}_R(0)$ — матрица взаимных индуктивностей обмоток статора и ротора; L_0 — главная индуктивность обмотки; $\mathbf{D}_S(\gamma) = \mathbf{D}_R(\gamma)$ — фазные матрицы статора и ротора, γ — электрический угол поворота ротора.

Фазная матрица статора $\mathbf{D}_S(\gamma)$ представляет собой проекции магнитных осей фазных обмоток статора на оси координат d, q на плоскости поперечного разреза ротора машины:

$$\mathbf{D}_S(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \cos(\rho+\gamma) & \cdots & \cos((m-1)\rho+\gamma); \\ \sin(\gamma) & \sin(\rho+\gamma) & \cdots & \sin((m-1)\rho+\gamma), \end{bmatrix} \tag{5}$$

при условии, что ось координат d совпадает с направлением наибольшей магнитной проводимостью ротора, а ось координат q — с направлением наименьшей магнитной проводимостью ротора.

Фазная матрица является матрицей Ляпунова. Приняв следующие условия:

$$\mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} u_{1U} \\ u_{1V} \end{bmatrix} = (2/m)\mathbf{D}_S(\gamma_1 t)\mathbf{U}_S;\ \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} i_{1U} \\ i_{1V} \end{bmatrix} = (2/m)\mathbf{D}_S(\gamma_1 t)\mathbf{I}_S;\ \mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} i_{2U} \\ i_{2V} \end{bmatrix} = (2/m)\mathbf{D}_S(\gamma t)\mathbf{I}_R,$$

после преобразований уравнений (4) получим систему уравнений асинхронной машины с постоянными коэффициентами:

$$\mathbf{U}_1 = R_1\mathbf{I}_1 + \omega_1 L_{01}\mathbf{E}\mathbf{I}_1 + L_{01}p\mathbf{I}_1 + \omega_1 L_0\mathbf{E}\mathbf{I}_2 + L_0 p\mathbf{I}_2;$$

$$\mathbf{0} = R_2\mathbf{I}_2 + \omega_2 L_{02}\mathbf{E}\mathbf{I}_2 + L_{02}p\mathbf{I}_2 + \omega_2 L_0\mathbf{E}\mathbf{I}_1 + L_0 p\mathbf{I}_1, \tag{6}$$

где $L_{01} = L_0 + L_1$; $L_{02} = L_0 + L_2$;

ω_1 — угловая частота токов статора;

ω_2 — угловая частота токов ротора.

Уравнения, записанные для двухмерных векторов в осях координат u, v, можно переписать в комплексной форме записи путем формальной замены $\mathbf{E}$ на мнимую единицу j, а векторы $\mathbf{U}_1$, $\mathbf{I}_1$, $\mathbf{I}_2$ — на комплексные переменные:

$$\underline{u}_1 = u_{1U} + j \cdot u_{1V};\ \underline{i}_1 = i_{1U} + j \cdot i_{1V};\ \underline{i}_2 = i_{2U} + j \cdot i_{2V}.$$

Тогда уравнения в комплексной форме записи примут следующий вид:

$$\underline{u}_1 = R_1\underline{i}_1 + j\omega_1 \cdot L_{01}\underline{i}_1 + L_{01}p\underline{i}_1 + j\omega_1 L_0\underline{i}_2 + L_0 p\underline{i}_2;$$

$$\underline{u}_2 = R_2\underline{i}_2 + j\omega_2 L_{02}\underline{i}_2 + L_{02}p\underline{i}_2 + j\omega_2 L_0\underline{i}_1 + L_0 p\underline{i}_1. \tag{7}$$

Уравнениям (7) соответствует характеристический полином

$$\underline{Y}(p) = a_2 p^2 + \underline{a}_1 p + \underline{a}_0,$$

где $a_2 = \dfrac{L_{01}L_{02} - L_0^2}{R_1 R_2}$; $\underline{a}_1 = \dfrac{L_{01}}{R_1} + \dfrac{L_{02}}{R_2} + j a_2(\omega_1 + \omega_2)$; $\underline{a}_0 = 1 - \omega_1\omega_2 a_2 + j\left(\omega_1 \dfrac{L_{01}}{R_1} + \omega_2 \dfrac{L_{02}}{R_2}\right)$.

Так как характеристический полином имеет второй порядок, найти корни характеристического уравнения $\underline{Y}(p) = 0$ несложно:

$$p_{1,2} = 1/2\left(-\underline{a}_1/a_2 \pm \sqrt{(\underline{a}_1/a_2)^2 - 4\underline{a}_0/a_2}\right),$$

исходя из условия, что основная индуктивность достаточно велика и не оказывает существенного влияния на динамику переходных процессов, а следовательно, и на значения корней характеристического уравнения. Кроме того, будем полагать, что активные сопротивления обмоток статора

и ротора асинхронного электродвигателя одинаковы: $R_1 = R_2$. Основываясь на данных допущениях, упростим выражение для корней характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = \lim_{L_0 \to \infty} \left[\left(-\underline{a}_1 / a_2 \pm \sqrt{\left(\underline{a}_1 / a_2\right)^2 - 4 \cdot \underline{a}_0 / a_2} \right) / 2 \right] =$$

$$= -\omega_б \cdot \left(s_k + j \cdot \left({\omega_2}^* + \omega^* / 2 \right) \pm \sqrt{{s_k}^2 - \left(\omega^* / 2 \right)^2} \right),$$

где $s_k = {R_2}^*/({L_1}^* + {L_2}^*)/\omega_б$ — критическое скольжение;

${\omega_2}^* = \omega_2/\omega_б$ — относительная величина угловой частоты токов ротора;

$\omega^* = \omega/\omega_б$ — относительная величина угловой электрической скорости вращения ротора.

Ошибка, обусловленная допущением $L_0 \to \infty$ для действительных частей корней, существенна лишь в окрестности $\omega^* = 0$. Подкоренное выражение в формуле для корней характеристического уравнения может быть как положительным, так и отрицательным. Подкоренное выражение отрицательно, если $\omega^* \notin [-2s_k; 2s_k]$. В этом случае действительные части относительных значений корней одинаковы и определяются выражением

$$\mathrm{Re}({p^*}_{1,2}) = -s_k,$$

где ${p^*}_{1,2} = p_{1,2}/\omega_б$.

При выполнении условия $\omega^* \in [-2 \cdot s_k; 2 \cdot s_k]$ действительные части относительных значений корней различны и определяются выражением

$$\mathrm{Re}({p^*}_{1,2}) = -s_k \pm \sqrt{{s_k}^2 - \left(\omega^* / 2 \right)^2} .$$

Графики зависимостей действительной и мнимой частей корней от угловой скорости вращения ротора ω^* приведены на рис. 1.

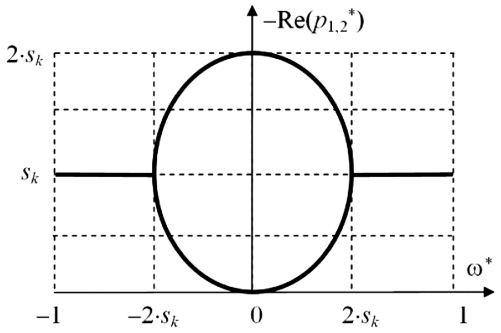


Рис. 1. Зависимости действительной частей корней характеристического уравнения от угловой скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя

Параметр, оценивающий фильтрующие свойства асинхронной электрической машины,

$$\varepsilon_0 = 2\pi s_k. \qquad (8)$$

Относительные значения параметров различных типов асинхронных машин принимают следующие значения: ${R_1}^* = {R_2}^* = 0{,}02–0{,}06$; ${L_1}^* = {L_2}^* = 0{,}07–0{,}14$; ${L_0}^* = 2–3$. Большие значения ${R_1}^* = {R_2}^*$ и ${L_1}^* = {L_2}^*$ относятся к машинам меньшей мощности. Значение параметра $\varepsilon_0 = 0{,}63–2{,}5$ характеризует фильтрующие свойства асинхронного электродвигателя.

Фильтрующие свойства синхронного электродвигателя при ШИМ. Дифференциальные уравнения синхронной машины имеют пятый порядок. Поэтому ее динамическое поведение является наиболее сложным. Уравнения, характеризующие динамику электромагнитных процессов в синхронной машине, записываются на основании второго закона Кирхгофа для обмоток статора *S*, демпферной обмотки ротора *R* и обмотки возбуждения *F* [1]:

$$\mathbf{U}_S = R_1\mathbf{I}_S + L_1 p\mathbf{I}_S + p\{\mathbf{L}_{SS}(\gamma)\mathbf{I}_S + \mathbf{L}_{SR}(\gamma)\mathbf{I}_R + \mathbf{L}_{SF}(\gamma)i_F\};$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{R}_R\mathbf{I}_R + \mathbf{L}_R p\mathbf{I}_R + p\{\mathbf{L}_{RS}(\gamma)\mathbf{I}_S + \mathbf{L}_{RR}\mathbf{I}_R + \mathbf{L}_{RF}i_F\};$$

$$u_f = R_F i_F + L_F p i_F + p\{\mathbf{L}_{FS}(\gamma)\mathbf{I}_S + \mathbf{L}_{FR}\mathbf{I}_R + L_{FF}i_F\}, \quad (9)$$

где R_1 — сопротивление обмотки статора;

$\mathbf{R}_R$ — матрица приведенных сопротивлений демпферной обмотки ротора;

L_1 — индуктивность рассеяния обмотки статора;

$\mathbf{L}_R$ — матрица приведенных индуктивностей рассеяния обмотки ротора;

$\mathbf{U}_S$ — вектор фазных напряжений статора;

u_f — приведенное напряжение обмотки возбуждения;

$\mathbf{I}_S$ — вектор токов статора;

$\mathbf{I}_R$ — вектор приведенных токов демпферной обмотки ротора;

R_F — приведенное сопротивление обмотки возбуждения;

L_F — приведенная индуктивность рассеяния обмотки возбуждения;

i_F — ток обмотки возбуждения;

$\mathbf{L}_{XX}$ — матрица индуктивностей обмоток X;

$\mathbf{L}_{XY}(\gamma) = \mathbf{L}_{YX}^{\mathrm{T}}(\gamma)$ — матрица взаимных индуктивностей обмоток X и Y;

γ — электрический угол поворота ротора.

Корни характеристического уравнения, образованного из уравнений (10), имеют достаточно сложный вид. Для их упрощения будем считать, что потери энергии в обмотках ротора отсутствуют. Принимая допущения: $\mathbf{R}_R = 0$, $R_F = 0$, после применения преобразования Ляпунова получим уравнения в осях d и q:

$$u_d = R_1 i_d - \omega L_q'' i_q + L_d'' p i_d;$$

$$u_q - E_f = R_1 i_q + \omega L_d'' i_d + L_q'' p i_q, \quad (12)$$

где $E_f = \omega L_d i_f$ — ЭДС обмотки статора;

L_d'', L_q'' — соответственно продольная и поперечная сверхпереходные индуктивности;

$R_1^* = 0{,}05 - 0{,}01$ — интервалы, которым принадлежат относительные значения параметров трехфазных явнополюсных синхронных машин в относительных единицах;

$L_d''^* \approx L_q''^* = 0{,}11–0{,}2$.

Относительные значения корней характеристического уравнения:

$$p_{1,2}{}^* \approx \frac{R_1^*}{2}\left(-\frac{L_d''^* + L_q''^*}{L_d''^* L_q''^*} \pm j\sqrt{\frac{4\omega^{*2}}{R_1^{*2}}}\right).$$

Относительные значения действительных частей корней:

$$\mathrm{Re}(p_{1,2}{}^*) \approx -\frac{R_1^*}{L_d''^*}.$$

Параметр, оценивающий фильтрующие свойства синхронной электрической машины:

$$\varepsilon_0 = \frac{2\pi R^*}{L_d''^*}. \quad (13)$$

Значения параметра $\varepsilon_0 = 0{,}32–2{,}8$ характеризуют фильтрующие свойства синхронного электродвигателя.

Фильтрующие свойства реактивных электродвигателей при ШИМ. Дифференциальные уравнения напряжений, описывающие динамику электромагнитных процессов реактивных электродвигателей, имеют периодические коэффициенты [1]:

$$\mathbf{U}_S = \mathbf{R}_S \mathbf{I}_S + p\{\mathbf{L}_{SS}(\gamma)\mathbf{I}_S\}, \tag{14}$$

где $\mathbf{U}_S$ — вектор напряжений на обмотках статора;

$\mathbf{I}_S$ — вектор токов в обмотках статора;

$\mathbf{R}_S = R_S \cdot \mathbf{1}$ — матрица сопротивлений обмотки статора;

R_S — сопротивление обмотки статора;

p — оператор дифференцирования по времени t;

γ — угол поворота ротора;

$\mathbf{L}_{SS}(\gamma) = \mathbf{D}_S{}^{\mathrm{T}}(\gamma)\mathbf{L}_0\mathbf{D}_S(\gamma)$ — матрица основных индуктивностей m-фазной обмотки статора;

$\mathbf{D}_S(\gamma)$ — фазная матрица (5);

$\mathbf{L}_0 = \mathrm{diag}(L_d, L_q)$ — матрица экстремальных проводимостей обмотки статора;

L_d и L_q — продольная и поперечная индуктивности соответственно.

Уравнения напряжений (14) имеют периодические коэффициенты. Их непосредственное использование для синтеза системы управления проблематично. Поэтому целесообразно их преобразование к уравнениям с постоянными коэффициентами при условиях:

$$\mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{2}{m}\mathbf{D}_S(\gamma)\mathbf{U}_S;\ \mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{m}\mathbf{D}_S(\gamma)\mathbf{I}_S.$$

Матрица $\mathbf{D}_S(\gamma)$ является в данном случае матрицей Ляпунова, преобразующей уравнения с периодическими коэффициентами (14) в уравнения с постоянными коэффициентами. Уравнения напряжений на обмотках статора и ротора (14), подвергнутые преобразованию Ляпунова, примут следующий вид:

$$\mathbf{U}_1 = R\mathbf{I}_1 + \omega\mathbf{E}\mathbf{L}_0\mathbf{I}_1 + \mathbf{L}_0 p\mathbf{I}_1, \tag{15}$$

где $\mathbf{E}$ — матрица поворота двухмерного вектора на угол $\pi/2$;

$R = R_S$ — отображение сопротивления обмотки статора на плоскость поперечного сечения машины;

ω — угловая электрическая скорость вращения ротора.

Уравнения (15) являются отображениями исходных уравнений (14) в оси координат ротора d, q. В развернутой форме записи уравнения напряжений статора (15) в относительных единицах примут следующий вид:

$$u_d{}^* = R^* i_d{}^* - \omega^* L_q{}^* i_q{}^* + \frac{L_d{}^*}{\omega_б{}^*} p i_d{}^*;$$

$$u_q{}^* = R^* i_q{}^* + \omega^* L_d{}^* i_d{}^* + \frac{L_q{}^*}{\omega_б{}^*} p i_q{}^*. \tag{16}$$

Ток продольного контура i_d намагничивает реактивную машину, а ток поперечного контура i_q определяет ее нагрузку.

Характеристический полином уравнений (16) имеет вид

$$Y(p) = L_d{}^* L_q{}^* \frac{p^2}{\omega_б{}^2} + \omega^* R^* (L_d{}^* + L_q{}^*)\frac{p}{\omega_б} + R^{*2} + \omega^{*2} L_d{}^* L_q{}^*.$$

Сравнивая уравнения (12) и (16), видим, что их характеристические уравнения идентичны.

Относительные значения корней характеристического уравнения $Y(p)=0$:

$$p_{1,2}{}^* = \frac{R^*}{2}\left(-\frac{L_d{}^* + L_q{}^*}{L_d{}^* L_q{}^*} \pm \sqrt{\left(\frac{L_d{}^* - L_q{}^*}{L_d{}^* L_q{}^*}\right)^2 - \frac{4\omega^{*2}}{R^{*2}}}\right),$$

при малой скорости вращения ротора:

$$\omega^* \le \frac{R^*}{2} \frac{L_d^* - L_q^*}{L_d^* L_q^*},$$

отрицательные и действительные. При $\omega^* = 0$ корни определяются выражениями:

$$p_1^* = -\frac{R^*}{L_d^*};\ p_2^* = p_{\max}^* = -\frac{R^*}{L_q^*}. \quad (17)$$

При большой скорости вращения корни комплексные. В этом случае модуль мнимой части корня приближенно равен ω, а действительная часть определяется выражением

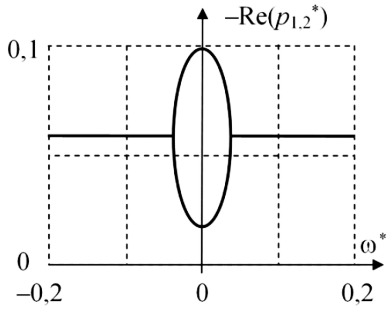


Рис. 2. Зависимости действительной и мнимой части корней характеристического уравнения от скорости

$$p^*_{\max} \le -\frac{R^*}{2} \frac{L_d^* + L_q^*}{L_d^* L_q^*} = -\frac{R^*}{2L_q^*}(1+\xi), \quad (18)$$

где $\xi = L_q^* / L_d^*$.

Зависимости относительных значений действительных частей корней характеристического уравнения от скорости приведены на рис. 2.

Параметр, оценивающий фильтрующие свойства реактивной электрической машины, будет определяться в виде

$$\varepsilon_0 = \frac{\pi R^*}{L_q^*}(1+\xi). \quad (19)$$

Относительные значения параметров различных типов реактивных электрических машин даны в табл. 1.

Таблица 1

Относительные значения параметров различных типов реактивных машин

Тип реактивной машины	$R^* \cdot 100$	L_d^*	L_q^*	ξ	ε_0
С зубчатым ротором и статором	2–6	1,2–2	0,48–1	0,4–0,5	0,18–0,28
С анизотропной магнитной проводимостью ротора (поперечная шихтовка)	2–6	1,5–3	0,21–0,36	0,14–0,12	0,34–0,59
С анизотропной магнитной проводимостью ротора (продольная шихтовка)	2–6	1,5–3	0,15–0,24	0,1–0,08	0,46–0,85

Большие значения R^* относятся к машинам меньшей мощности. Из табл. 1 следует, что лучшими фильтрующими свойствами обладают реактивные машины с зубчатым ротором и статором.

Заключение (Conclusion)

Из опыта эксплуатации систем электрический преобразователь частоты – электрический двигатель известно, что их фильтрующие свойства достаточно высоки. При большой частоте модуляции выходного напряжения обеспечивается высокое качество токов, протекающих по нагрузке во всех рассмотренных типах электрических машин. Данное обстоятельство при высокой частоте ШИМ позволяет отказаться от специальных выходных фильтрующих устройств. Однако для крупных электрических машин и мощных электрических преобразователей при ограничениях, наложенных на частоту модуляции, показатель ε увеличивается, и фильтрующие свойства электрических машин значительно ухудшаются, что приводит к значительным пульсациям и увеличению величины дисперсии тока в нагрузке.

Выполненные исследования позволяют сравнить фильтрующие свойства различных типов электрических машин. Параметры фильтрующих свойств для различных типов электрических машин представлены в сводной табл. 2.

Таблица 2

Параметры фильтрующих свойств для различных типов электрических машин

Типы электрических машин	ε_0
Реактивные машины с зубчатым ротором и статором	0,18–0,28
Реактивные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора (поперечная шихтовка)	0,34–0,59
Реактивные машины анизотропной магнитной проводимостью ротора (продольная шихтовка)	0,46–0,85
Асинхронные машины	0,63–2,5
Синхронные машины	0,32–2,8

Большие значения показателей ε_0 (см. табл. 1) относятся к машинам меньшей мощности. Из приведенных значений следует, что реактивные машины с зубчатым ротором и статором обладают наилучшими фильтрующими свойствами, однако их коэффициент мощности достаточно мал. Реактивные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора по своим фильтрующим свойствам превосходят асинхронные и синхронные двигатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Самосейко В. Ф.* Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.

2. *Bychkov M. G.* Elements of the switched reluctance drive theory / M. G. Bychkov // Электричество. — 1997. — № 8. — С. 35–44.

3. *Ваганов М. А.* Электромагнитный момент вентильного индукторного двигателя / М. А. Ваганов, И. А. Горюшкин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2012. — № 10. — С. 69–76.

4. *Голландцев Ю. А.* Вентильные индукторно-реактивные двигатели / Ю. А. Голландцев. — СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2003. — 148 с.

5. *Самосейко В. Ф.* Реактивные электрические машины с зубчатым статором и ротором. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В. Ф. Самосейко [и др.]. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. — 174 с.

6. *Nyman E.* Magnet-free motor technology for field speed applications reaching “IE5” efficiency level / E. Nyman, A. Tammi, P. Termini, T. Kansakangas. — ABB, 2015. — 9 p.

7. *Dmitrievskii V.* Development of a High Efficient Electric Drive with Synchronous Reluctance Motor/ V. Dmitrievskii, V. Prakht, V. Kazakbaev, A. Pozdeev, S. Oshurbekov // Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2015 18th International Conference on. — IEEE, 2015. — Pp. 876–881. DOI: 10.1109/ICEMS.2015.7385158.

8. *Захаров А. В.* Перспективы технического применения синхронных электродвигателей с анизотропной магнитной проводимостью ротора / А. В. Захаров // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Международной науч.-техн. конф. (XVIII Бенардосовские чтения). — Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, 2015. — С. 124–127.

9. *Самосейко В. Ф.* Синхронные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В. Ф. Самосейко [и др.]. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. — 174 с.

10. *Гельвер Ф. А.* Реактивный электрический преобразователь с анизотропной магнитной проводимостью ротора / Ф. А. Гельвер, Н. В. Белоусова, В. Ф. Самосейко // Труды VIII Международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (7–9 октября 2014 г.). — Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2014. — С. 394–398.

11. *Казакбаев В. М.* Разработка высокоэффективного синхронного реактивного двигателя: дис. … канд. техн. наук; специальность 05.09.01 — Электромеханика и электрические аппараты / В. М. Казакбаев. — Екатеренбург: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», 2017. — 128 с.

12. *Браславский И. Я.* Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. — М.: Академия, 2004. — 256 с.

13. *Дмитриевский В. А.* Экспериментальное сравнение асинхронного и синхронного реактивного электродвигателей / В. А. Дмитриевский [и др.] // Труды Международной 16-й научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2015)». — Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2015. — С. 19–22.

REFERENCES

1. Samoseiko, V.F. *Teoreticheskie osnovy upravleniya elektroprivodom*. SPb.: Elmor, 2007.

2. Bychkov, M. G. "Elements of the switched reluctance drive theory." *Electrical Technology Russia* 8 (1997): 35–44.

3. Vaganov, Michail Alexsandrovich, and Ivan Aleksandrovich Goriushkin. "Electromagnetic torque of reluctance motor." *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University* 10 (2012): 69–76.

4. Gollandtsev, Yu. A. *Ventil'nye induktorno-reaktivnye dvigateli*. SPb.: TsNII «Elektropribor», 2003.

5. Samoseiko, V. F., F. A. Gel'ver, V. A. Khomyak, and N. A. Lazarevskii. *Reaktivnye elektricheskie mashiny s zubchatym statorom i rotorom. Metodika proektirovaniya. Algoritmy upravleniya*. SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr», 2016.

6. Nyman, E., Ari Tammi, Pietro Savio Termini, and Tero Känsäkangas. *Magnet-free motor technology for field speed applications reaching "IE5" efficiency level.* ABB, 2015.

7. Dmitrievskii, Vladimir, V. Prakht, V. Kazakbaev, A. Pozdeev, and S. Oshurbekov. "Development of a high efficient electric drive with synchronous reluctance motor." *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2015 18th International Conference on*. IEEE, 2015. 876–881. DOI: 10.1109/ICEMS.2015.7385158.

8. Zakharov, A. V. "Prospects for the technical application of synchronous motors with anisotropic conductive magnetic rotor." *Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii: (XVIII Benardosovskie chteniya)*. Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet imeni V.I. Lenina, 2015. 124–127.

9. Samoseiko, V. F., F. A. Gel'ver, V. A. Khomyak, and D. A. Khairov. *Sinkhronnye elektricheskie mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'yu rotora. Metodika proektirovaniya. Algoritmy upravleniya*. SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr», 2016.

10. Gel'ver, F. A., N. V. Belousova, and V. F. Samoseiko. "Reaktivnyi elektricheskii preobrazovatel' s anizotropnoi magnitnoi provodimost'yu rotora." *Trudy VIII mezhdunarodnoi (XIX vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014 (7-9 oktyabrya 2014 g.)*. Saransk: Izdatel'stvo mordovskogo universiteta, 2014. 394–398.

11. Kazakbaev, V. M. Razrabotka vysokoeffektivnogo sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya. PhD diss. Ekaterenburg: FGAOU VO «Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina», 2017.

12. Braslavskii, I. Ya., Z. Sh. Ishmatov, and V. N. Polyakov. *Energosberegayushchii asinkhronnyi elektroprivod: Uchebnoe posobie dlya stud. vyssh. ucheb.zavedenii*. M.: Akademiya, 2004.

13. Dmitrievskii, Vladimir A., Vladimir A. Prakht, Vadim V. Kazakbaev, Andrey S. Pozdeev, Safarbek H. Oshurbekov, and Alexander F. Mikhalitsyn. "Experimental comparison of induction and synchronous reluctance electric drive performance." *Trudy mezhdunarodnoi shestnadtsatoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroprivody peremennogo toka (EPPT 2015)».* Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2015. 19–22.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Гельвер Фёдор Андреевич — кандидат технических наук ФГУП «Крыловский государственный научный центр» 196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *gelver@bk.ru*, *kaf_electroprivod@gumrf.ru*	**Gelver, Fedor A.** — PhD Krylov State Research Center 44 Moscow highway, St. Petersburg, 196158, Russian Federation Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *gelver@bk.ru*, *kaf_electroprivod@gumrf.ru*
Белоусов Игорь Владимирович — ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр» 196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *ibel@bk.ru*, *kaf_electroprivod@gumrf.ru*	**Belousov, Igor V.** — Leading Engineer Krylov State Research Center 44 Moscow highway, St. Petersburg, 196158, Russian Federation Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *ibel@bk.ru*, *kaf_electroprivod@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 25 января 2019 г.
Received: January 25, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-193-201

SHIP ELECTRIC POWER PLANT WITH VALVE DIESEL-GENERATORS OF VARIABLE ROTATION SPEED

A. V. Grigoryev[1,2], S. M. Malyshev[2,3], R. R. Zaynullin[3]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation
[2] — Saint Petersburg Electrotechnical University,
St. Petersburg, Russian Federation
[3] — JSC "RPC "Ship electric propulsion",
St. Petersburg, Russian Federation

Diesel-generators of autonomous ship electric power plants operating on the regulatory characteristic with constancy of rotation speed are considered. It is confirmed that using of diesel-generators at a constant speed in a wide range of loads variations has a number of negative consequences. The selection of the quantity and rated power of diesel-generators under the condition of ensuring their operation with a load close to the rated value in all modes of the vessel operation is highly difficult and almost unrealizable in practice. It is proved that the traditional way to solve the problem is to increase the number of diesel-generators or use of generators of different rated power leads to an increase in the cost of equipment and the deterioration of mass and dimensions parameters. It is noted that the modern solution of the problem is connected with the regulation of a diesel-generator according to the optimum characteristic in terms of fuel and lubricants consumption, when the rotation speed changes as a function of the load. The implementation of the diesel-generator operation with variable speed is possible when the generator is equipped with a semiconductor converter and the valve mode of operation is implemented. The using of valve diesel-generators as part of the ship electric power plant allows to use generator sets of the same power and to reduce their quantity. It is advisable for reducing the rated power and, accordingly, the semiconductor converter cost, to implement two modes of diesel-generator's operation: the traditional mode with a constant rotation speed at a load close to the rated and the valve mode with variable rotation speed. It is fundamentally new to realize the mode of the parallel operation of two diesel-generators, one of which can operate in the traditional mode, and the second one in the mode of the valve generator. The results of experimental studies of diesel-generator operation with variable rotation speed are presented in the paper and a structural diagram of the ship electric power plant with valve diesel-generators of a new generation is proposed.

Keywords: generator set, diesel-generator, variable rotation speed, valve generators, ship electric power plant, semiconductor converters, quality of electric power, fuel consumption, experimental studies, structural diagram.

For citation:
Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Ruslan R. Zaynullin. "Ship electric power plant with valve diesel-generators of variable rotation speed." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-193-201.

УДК 621.315:621.3.025

СУДОВАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ С ВЕНТИЛЬНЫМИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРАМИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

А. В. Григорьев[1,2], С. М. Малышев[2,3], Р. Р. Зайнуллин[3]

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[3] — АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены дизель-генераторы (ДГ) в автономных судовых электростанциях (СЭС), работающие по регуляторной характеристике с постоянством частоты вращения. Подтверждено, что эксплуатация ДГ при постоянной частоте вращения в широком диапазоне изменения нагрузок имеет ряд негативных по-

следствий. Выбор количества и мощности ДГ СЭС при условии обеспечения их работы с нагрузкой, близкой к номинальной во всех режимах эксплуатации судна, является весьма сложной и на практике практически нереализуемой задачей. Доказано, что традиционным способом решения проблемы является увеличение количества ДГ или использование генераторов разной мощности, что приводит к увеличению стоимости оборудования и снижению массо-габаритных показателей. Отмечается, что современное решение проблемы связано с регулированием ДГ по оптимальной (с точки зрения расхода горюче-смазочных материалов) характеристике, когда частота вращения изменяется в функции нагрузки. Реализация работы ДГ с переменной частотой вращения возможна при комплектации генератора полупроводниковым преобразователем (ПП) и реализации вентильного режима эксплуатации. Использование в составе СЭС вентильных ДГ позволяет использовать генераторные агрегаты одинаковой мощности, при этом сократить их количество. Целесообразно для уменьшения мощности, а, соответственно, и стоимости ПП реализовать два режима эксплуатации ДГ: традиционный — с постоянством частоты вращения при нагрузке, близкой к номинальной, и вентильный — с изменяющейся частотой вращения ДГ. Принципиально по-новому целесообразно реализовать и режим параллельной работы двух ДГ, один из которых может работать в режиме традиционного, а второй — в режиме вентильного генератора. В статье представлены результаты экспериментальных исследований работы ДГ с переменной частотой вращения и предложена структурная схема СЭС с вентильными ДГ нового поколения.

Ключевые слова: генераторный агрегат, дизель-генератор, переменная частота вращения, вентильные генераторы, судовая электростанция, полупроводниковые преобразователи, качество электроэнергии, расход топлива, экспериментальные исследования, структурная схема.

Для цитирования:
Григорьев А. В. Судовая электростанция с вентильными дизель-генераторами переменной частоты вращения / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-193-201.

Введение (Introduction)

Назначением судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) является производство электроэнергии во всех режимах эксплуатации судна. Основным источником электроэнергии на современных судах остаются генераторные агрегаты (ГА) и, прежде всего, дизель-генераторы (ДГ). На стадии технического проектирования морские конструкторские бюро производят выбор количества и мощности ГА. Основной целью при проектировании СЭЭС является снижение строительной стоимости оборудования и уменьшение расхода горюче-смазочных материалов при эксплуатации судна. При этом предпринимается попытка обеспечить работу ДГ в наиболее экономичном диапазоне нагрузки от 40 до 90 % во всех режимах эксплуатации судна, при минимальном их количестве, которое определяется требованиями международных классификационных обществ[1].

Обоснование и выбор количества и мощности ГА при проектировании СЭЭС является многокритериальной задачей. Мощность судовых приемников, работающих в конкретный момент времени, зависит от многих факторов, в том числе от режима эксплуатации судна. На судах с автономной электростанцией одним из режимов эксплуатации является стояночный режим у причала или при стоянке на якоре, когда нагрузка приемников электроэнергии снижается до минимума. Данный режим на многих судах является довольно продолжительным, и для питания общесудовых приемников электроэнергии в составе судовой электростанции (СЭС) используется стояночный ДГ, мощность которого значительно меньше мощности вспомогательных агрегатов, что способствует увеличению количества ГА.

Традиционное решение задачи компоновки СЭЭС путем выбора минимального количества ДГ, работающих с постоянной частотой вращения и нагрузкой, близкой к номинальной, при изменении режима эксплуатации судна является трудно реализуемым [1]. В связи с этим в статье рассматривается возможность применения в СЭС вентильных ДГ, работающих с переменной частотой вращения при изменении нагрузки. Создание и внедрение СЭС на базе вентильных ДГ позволит уменьшить количество ГА, в частности отказаться от применения стояночных ДГ, зна-

[1] Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2019. 230 с.

чительно уменьшить расход горюче-смазочных материалов и по-новому подойти к решению проблемы выбора количества и мощности ГА и комплектации СЭЭС [2].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Типовая автономная СЭС состоит из нескольких одинаковых по мощности вспомогательных и одного стояночного ДГ. Традиционная структурная схема автономной СЭС с двумя вспомогательными и одним стояночным ДГ представлена на рис. 1.

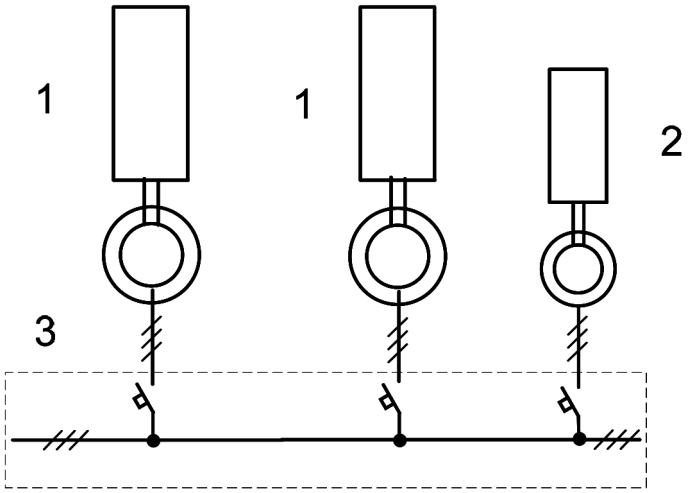


Рис. 1. Структурная схема автономной СЭС традиционной комплектации:
1 — вспомогательные дизель-генераторы; *2* — стояночный дизель-генератор;
3 — главный распределительный щит

В ходовых режимах эксплуатации судна электроэнергию вырабатывают вспомогательные ДГ, при стоянке судна — стояночный дизель-генератор. При изменении режима эксплуатации судна возможна как одиночная, так и параллельная работа ДГ [3]. Основным недостатком СЭС традиционной комплектации является увеличение количества ДГ за счет необходимости применения стояночного ДГ, вследствие чего повышается стоимость оборудования и ухудшаются его массогабаритных показатели. Кроме того, при изменении мощности судовых приемников электроэнергии сложно обеспечить нагрузку ДГ, близкой к номинальной, что значительно повышает расход горюче-смазочных материалов. При этом стояночный ДГ не может обеспечивать потребности судна в ходовом режиме, а работа вспомогательных ДГ не только не экономична, но и при снижении нагрузки более чем на 30 % от номинальной величины недопустима. Решение данной проблемы связано со снижением частоты вращения ДГ при уменьшении нагрузки, что позволит не только снизить расход горюче-смазочных материалов, но и обеспечит работу приводного двигателя на нагрузке, близкой к долевой, без ограничения по времени эксплуатации [4]. Большинство приемников электроэнергии рассчитаны на питание от сети с постоянными параметрами частоты и напряжения.

До настоящего времени задача поддержания постоянства частоты в электрической сети при питании от ДГ решалась путем поддержания постоянства частоты вращения вспомогательного приводного дизеля в любом эксплуатационном режиме с учетом степени неравномерности регулирования в пределах 2–3 %. Опыт эксплуатации автономных СЭС показывает, что значительную часть времени ДГ работают на режимах с долевой нагрузкой или нагрузкой, близкой к холостому ходу. Работа ДГ на долевых нагрузках при постоянстве частоты вращения имеет ряд отрицательных моментов, среди которых можно отметить существенное увеличение удельного расхода топлива и масла, снижение ресурса подшипников и деталей цилиндропоршневой группы.

Уменьшение частоты вращения приводного дизеля при снижении нагрузки и переход к эксплуатации ДГ по оптимальной с точки зрения расхода горюче-смазочных материалов характеристике позволит решить данную проблему [5].

В связи с появлением и интенсивным внедрением новых типов полупроводниковых преобразователей электроэнергии на запираемых вентилях появилась возможность принципиально по-новому решать проблему поддержания постоянства частоты в автономной электрической сети. ДГ при этом может работать с переменной частотой вращения, в то время как частота в электрической сети будет поддерживаться постоянной с помощью ПП. В этом случае отпадает необходимость эксплуатации ДГ по регуляторной характеристике с поддержанием постоянства частоты вращения по всем диапазонам изменения нагрузки. ДГ целесообразно эксплуатировать по оптимальной характеристике, где в качестве критерия оптимальности выбирается условие минимального удельного расхода горюче-смазочных материалов [6].

На ДГ фирмы *Caterpillar* модели 3406 (рис. 2) в ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова проведены экспериментальные исследования работы приводного дизеля с переменной частотой вращения. Номинальные параметры вспомогательного дизеля: мощность Ne = 309 кВт, номинальная частота вращения n = 1500 об/мин [7].



Рис. 2. Вспомогательный ДГ фирмы *Caterpillar* (модель 3406)

При проведении исследований с помощью электронного флоуметра определялся удельный расход топлива вспомогательного дизеля при изменении нагрузки в диапазоне от номинальной величины до холостого хода. Частота вращения при этом уменьшалась в диапазоне от номинальной до 80 % от номинальной величины. Экспериментальные зависимости изменения удельного расхода топлива вспомогательного дизеля ДГА от частоты вращения при различной нагрузке приведены на рис. 3.

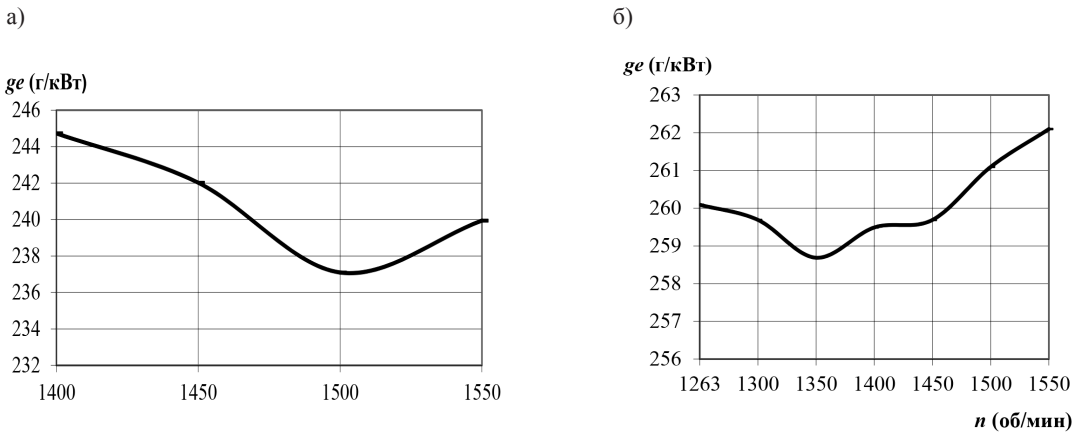


Рис. 3. Изменение удельного расхода топлива ДГА Cat 3406 в зависимости от частоты вращения: *а* — при 80 %-й нагрузке; *б* — при 35 %-й нагрузке

Из рис. 3 видно, что на долевых нагрузках и нагрузке, близкой к холостому ходу, оптимальная частота вращения ДГА, при которой удельный расход топлива минимален, значительно меньше номинальной частоты. С увеличением нагрузки точка минимума удельного расхода топлива смещается в область более высоких частот, а при нагрузке, превышающей 80 % от номинальной, оптимальная частота вращения ДГА становится равной номинальной.

На основании результатов проведенных экспериментальных исследований построена оптимальная с точки зрения расхода горюче-смазочных материалов характеристика изменения частоты вращения ДГА в функции изменения нагрузки, которая приведена рис. 4.

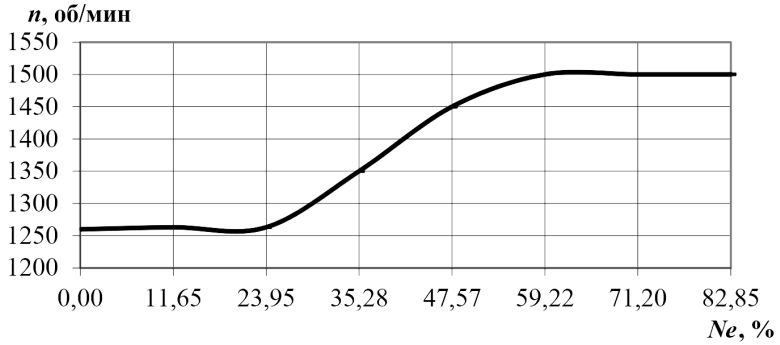


Рис. 4. Оптимальная характеристика изменения частоты вращения ДГ в функции изменения нагрузки

При уменьшении нагрузки ДГ до 60 % и менее от номинальной величины целесообразно снижать частоту вращения вспомогательного дизеля с целью экономии горюче-смазочных материалов. При работе ДГ с нагрузкой менее 30 % оптимальная частота вращения составляет 80–85 % от номинальной величины. Зависимость изменения разности удельного расхода топлива при эксплуатации ДГ по регуляторной и оптимальной характеристике приведена на рис. 5.

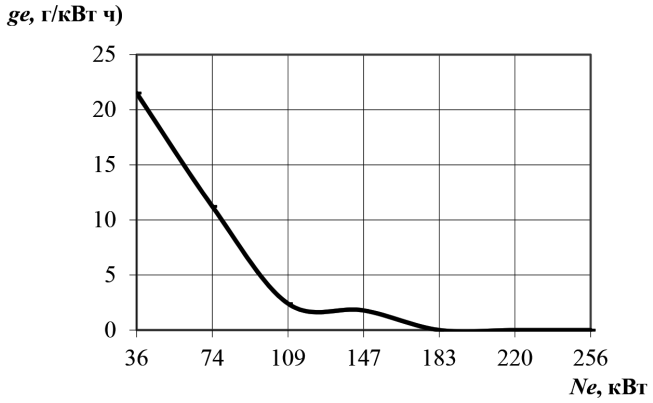


Рис. 5. Разность удельного расхода топлива при эксплуатации ДГ *Cat* 3406 по регуляторной и оптимальной характеристике

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Результаты экспериментальных исследований показали, работа ДГ с переменной частотой вращения в функции изменения нагрузки позволит уменьшить удельный расход топлива на 10–20 % при работе на долевой нагрузке. Кроме того, при снижении частоты вращения работа дизеля при долевой нагрузке не ограничивается по времени. Рекомендуемое снижение частоты вращения не превышает 15–20 % от номинальной величины, что реализуемо на серийных ДГ. Снижение частоты вращения ДГ приводит к изменению частоты тока и напряжения в судовой сети. Стабилизировать параметры электроэнергии в судовой сети при переменной частоте вращения ДГ можно

путем применения современных полупроводниковых преобразователей электроэнергии на полностью управляемых вентилях.

На основе поведенного анализа и результатов экспериментальных исследований разработана структурная схема СЭС нового поколения с применением вентильных ДГ, представленная на рис. 6.

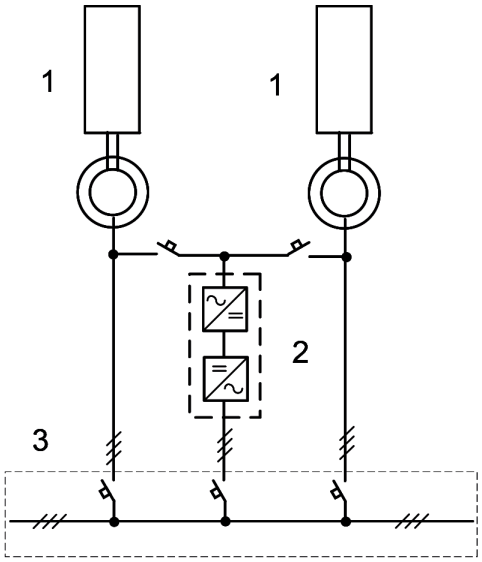


Рис. 6. Структурная схема автономной СЭС с вентильным ДГ:
1 — вспомогательные дизель-генераторы; *2* — полупроводниковый преобразователь;
3 — главный распределительный щит

Параллельная работа ДГ в данной СЭС может осуществляться традиционным способом с распределением нагрузки пропорционально мощностям ДГ или принципиально новым способом, когда один ДГ работает с номинальной частотой вращения с нагрузкой, близкой к номинальной, а второй — в режиме вентильного ДГ с изменением частоты вращения в функции изменения нагрузки [10], [11].

Новый принцип поддержания постоянства напряжения и частоты требует корректировки текстов Правил Российского морского регистра судоходства ввиду следующих причин:

– частота вращения приводного двигателя вентильного ДГ может изменяться в широком диапазоне, а стабилизация частоты напряжения при этом обеспечивается за счет ПП;

– напряжение генератора вентильного ДГ может изменяться в широком диапазоне либо генератор может не иметь обмотки возбуждения, а стабилизация напряжения при этом обеспечивается за счет ПП.

В 2018 г. АО «НПЦ «Электродвижение судов» при участии ведущих специалистов ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова и СПбГЭТУ «ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина)» была проведена научно-исследовательская работа (НИР) «Разработка проекта требований Регистра судоходства к судовым вентильным генераторным агрегатам, работающим с переменной частотой вращения», в рамках которой разработаны предложения для внесения в тексты «Правил классификации и постройки морских судов» и «Правил технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов» Регистра судоходства.

Ожидаемый эффект от применения вентильных ДГ в составе СЭС состоит в следующем:

– снижение массы и габаритов оборудования СЭС за счет уменьшения количества ДГ;

– снижение удельного расхода горюче-смазочных материалов за счет работы ДГ по оптимальной характеристике;

– повышение КПД ДГ при работе на долевых нагрузках до 25 %;

– повышение ресурса и надежности приводных дизелей ДГ;

– снижение количества отказов и повышение надежности СЭС.

Сравнение автономных СЭС традиционной комплектации с СЭС нового поколения на базе вентильных ДГ представлено в следующей таблице:

Наименование параметра	Традиционная СЭС	СЭС с вентильными ДГ
Частота вращения ДГ	Постоянна во всем диапазоне изменения нагрузки	Постоянна в диапазоне изменения нагрузки от 60 до 100 % от номинальной величины и снижается с уменьшением нагрузки менее 60 %
КПД ДГ	Значительно снижается при уменьшении нагрузки	КПД меняется не значительно во всем диапазоне изменения нагрузки
Стояночный ДГ	Необходимо использовать	Отсутствует необходимость применения стояночного ДГ
Ресурс и надежность работы ДГ	Значительно снижается ресурс и надежность приводного дизеля при работе на долевой нагрузке	Ресурс и надежность приводного дизеля ДГ при работе на долевой нагрузке не снижается

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время судовые ДГ в автономных СЭС работают с постоянной частотой вращения во всем диапазоне изменения нагрузки, вплоть до нагрузки, близкой к холостому ходу, что значительно снижает их экономичность и ресурс.

2. Комплектация СЭС дизель-генераторами традиционного типа, работающими с постоянной частотой вращения, требует применения генераторов разной мощности или увеличения их количества, что не всегда решает проблему низкой экономичности работы приводных дизелей на долевой нагрузке [12], [13].

3. Переход от эксплуатации ДГ по регуляторной характеристике к регулированию с изменением частоты вращения в функции нагрузки позволит значительно снизить расход горюче-смазочных материалов и обеспечит возможность длительной работы приводных дизелей на долевой нагрузке и нагрузке, близкой к холостому ходу.

4. Применение вентильных ДГ в составе автономных СЭС позволит уменьшить количество генераторных агрегатов, повысит их экономичность и ресурс. В СЭС на базе вентильных ДГ возможна реализация при автономной и параллельной работе как традиционного способа регулирования приводного дизеля с поддержанием постоянства частоты вращения, так и оптимального регулирования частоты вращения в функции нагрузки.

5. В связи с внедрением вентильных ГА в состав СЭС целесообразно произвести корректировку текстов правил регистра судоходства в части требований к составу, структуре и режимам эксплуатации судовых источников электроэнергии и ввести дополнительные термины и определения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Куколев А. А.* Классификационные требования, предъявляемые к судовым дизель-генераторам / А. А. Куколев // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2017. — № 2 (19). — С. 24–26.

2. *Григорьев А. В.* Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций / А. В. Григорьев, В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 39–43.

3. *Бурмакин О. А.* Имитационная модель судовой электростанции / О. А. Бурмакин, М. П. Шилов, Ю. С. Малышев, С. В. Попов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2016. — № 48. — С. 273–280.

4. *Вишневский Л. В.* Включение синхронных генераторов в многоагрегатную судовую электростанцию / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, И. П. Козырев, И. Е. Войтецкий // Электромашиностроение и электрооборудование. — 2007. — № 68. — С. 26–29.

5. *Григорьев А. В.* Перспективы внедрения вентильных газотурбогенераторов на морском флоте / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова — 2016. — № 1 (35). — С. 165–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165-169.

6. *Коробко Г. И.* Разработка и моделирование дизель-генератора с изменяемой частотой вращения в судовой единой электроэнергетической системе / Г. И. Коробко, О. С. Хватов, И. Г. Коробко // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2017. — № 1. — С. 55–61.

7. *Григорьев А. В.* Оптимальная регулировочная характеристика дизель-генераторного агрегата / А. В. Григорьев // Электросистемы. — 2006. — № 1 (13). — С. 23–25.

8. *Сугаков В. Г.* Внешняя форсировка систем возбуждения судовых синхронных генераторов / В. Г. Сугаков, О. С. Хватов, Ю. С. Малышев [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 103–111.

9. *Григорьев А.* Первый отечественный судовой вентильный дизель-генераторный агрегат переменного тока / А. Григорьев, В. Фатов, С. Малышев // Морской флот. — 2018. — № 5 (1539). — С. 40–42.

10. *Алаев А. В.* Распределение реактивной мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторов / А. В. Алаев, П. А. Дараган, Р. А. Байбаков // Эксплуатация морского транспорта. — 2016. — № 2 (79). — С. 70–74.

11. *Baldi F.* Optimal load allocation of complex ship power plants / F. Baldi, F. Ahlgren, F. Melino, C. Gabrielii, K. Andersson // Energy Conversion and Management. — 2016. — Vol. 124. — Pp. 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.

12. *Ancona M.A.* Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization / M.A. Ancona, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, J. Rosati // Energy Conversion and Management 164 (2018): 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.

13. *Zahedia B.* Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems / B. Zahedia, L. E. Norum, K. B. Ludvigsen // Journal of Power Sources. — 2014. — Vol. 255. — Pp. 341–354. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.031.

REFERENCES

1. Kukolev, A. “Classification socities requirements for diesel generators.” *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 2(19) (2017): 24–26.

2. Grigoryev, A. V., and V. Yu. Kolesnichenko “Improving the efficency of marine disel power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 39–43.

3. Burmakin, O. A., M. P. Shilov, Y. S. Malyshev, and S. V. Popov “A ship power plant simulation model.” *Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* 48 (2016): 273–280.

4. Vishnevskii, L. V., A. M. Veretennik, I. P. Kozyrev, and I. E. Voitetskii. “Vklyuchenie sinkhronnykh generatorov v mnogoagregatnuyu sudovuyu elektro-stantsiyu.” *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie* 68 (2007): 26–29.

5. Grigoryev, Andrey Vladimirovich, Ruslan Rinatovich Zaynullin, and Sergey Mihaylovich Malyshev. “Opportunities of inroduction of ship valve gas turbogenerators in marine fleet.” Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 1(35) (2016): 165–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165-169.

6. Korobko, G. I., O. S. Khvatov, and I. G. Korobko “Designing and modelling of variable speed diesel generators for ship unified electric power systems.” *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* 1 (2017): 55–61.

7. Grigoryev, A. V. “Optimalnaya regulirovochnaya kharacteristika dizel-generatornogo agrega*ta.” Elektrosistemy* 1(13) (2006): 23–25.

8. Sugakov, V. G., O. S. Khvatov, Y. S. Malyshev, A. A. Toshchev, and I. V. Sychushkin. “External boost of excitation systems of marine synchronous generators.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 103–111.

9. Grigoryev, A., V. Fatov, and S. Malyshev. “Perviy otechestvenniy sudovoy ventilniy dizel-generatorniy agregat peremennogo toka.” *Morskoy flot* 5(1539) (2018): 40–42.

10. Alaev, V. V., P. A. Daragan, and R. A. Baibakov. “Distribution of reactive power of ship synchronous generators.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(79) (2016): 70–74.

11. Baldi, Francesco, Fredrik Ahlgren, Francesco Melino, Cecilia Gabrielii, and Karin Andersson. "Optimal load allocation of complex ship power plants." *Energy Conversion and Management* 124 (2016): 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.

12. Ancona, Maria Alessandra, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, and J. Rosati. "Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization." *Energy Conversion and Management* 164 (2018): 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.

13. Zahedi, Bijan, Lars E. Norum, and Kristine B. Ludvigsen. "Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems." *Journal of power sources* 255 (2014): 341–354. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.031.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Владимирович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
e-mail: *a.grigorev@eds-marine.ru*,
kaf_saees@gumrf.ru
Малышев Сергей Михайлович —
ассистент, начальник отдела
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: *malyshevsergey@list.ru*
Зайнуллин Руслан Ринатович —
начальник отдела
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: *zaynullin@eds-marine.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoryev, Andrey V. —
PhD, Associate Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
e-mail: *a.grigorev@eds-marine.ru*,
kaf_saees@gumrf.ru
Malyshev, Sergei M. —
Assistant, Head of Department
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
JSC "RPC "Ship electric propulsion"
12 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: *malyshevsergey@list.ru*
Zaynullin, Ruslan R. —
Head of Department
JSC "RPC "Ship electric propulsion"
12 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: *zaynullin@eds-marine.ru*

Статья поступила в редакцию 30 января 2019 г.
Received: January 30, 2019.

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 11. № 1

2019 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Редактор *Т. В. Середова*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета ??.02.19. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 25,25. Тираж 500 экз. Заказ № 197/19

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7