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 12. № 3

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

ББК 95

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2020. — Т. 12. — № 3. — 204 с.

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

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

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

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

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

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

ISSN 2309-5180
9 772309 518784 >

© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Том 12. № 3
2020

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 423

Дерябин В. В. Обобщенная нейросетевая модель счисления пути судна 423

Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Иваненко Ю. С. Поддержка принятия решений при обеспечении безопасности движения судов на основе кластеризации траекторий 436

Устинов Ю. М., Припотнюк А. В., Горобцов А. П. Цифровая широкополосная система NAVDAT скоростной передачи данных с береговых станций на суда 450

Дыда А. А., Чинчукова Е. П. Синтез адаптивной системы управления курсом судна на основе локального критерия качества 459

Царик Р. С., Акмайкин Д. А. Математическая модель решения задачи планирования загрузки контейнеровоза с целью обеспечения безопасности перевозок 467

Ююкин И. В. Поиск ошибок в базе навигационных данных методом визуализации сплайновой изоповерхности 481

Ермаков С. В. Методика оценки координат центра тяжести «мертвого запаса» (константы) 492

Дьяконова М. Д. Сетевое моделирование процесса фрахтования танкеров как элемент цифровизации коммерческой работы на водном транспорте 504

Ершов А. А., Буклис П. И., Развозов С. Ю. Способы эффективного маневрирования танкера в условиях шторма 515

Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Семенов А. Д. Имитационное моделирование сетевых технологических процессов грузообработки в морских портах 526

Каретников В. В., Прохоренков А. А., Лысенко Ю. Н. Использование 3D электронных навигационных карт для предупреждения навигационных аварий судов при прохождении шлюзов на внутренних водных путях 537

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 551

Ильинский Д. А., Рогинский К. А., Ганжа О. Ю. Сейсморазведка в транзитной зоне. Натурные испытания системы КРАБ (этап 2) 551

Потапычев С. Н., Малый В. В., Ивакин Я. А. Модель рационального размещения приемных антенн позиционных гидроакустических средств в интересах диспетчеризации геопространственных процессов 567

Ничипоренко Н. Т., Сиваченко Б. Н., Зеркаль А. Д. Измерение толщины льда на акватории морского порта с помощью прибора «Пикор-Лед» 576

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

Зам. гл. редактора
А. П. Ныркov
д.т.н., проф.
NyrkowAP@gumrf.ru

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИЯ:
E-mail: journal@gumrf.ru
http://journal.gumrf.ru

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-54734 от 17.07.2013 г.
Адрес редакции: 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7.
Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.
Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

Члены редколлегии:

О. К. Безюков, д.т.н.
А. Т. Беккер, д.т.н.
Н. И. Ватин, д.т.н.
П. А. Гарибин, д.т.н.
Д. П. Голоскоков, д.т.н.
В. А. Жуков, д.т.н.
Ю. М. Искандеров, д.т.н.
О. Г. Каратаев, д.т.н.
В. В. Каретников, д.т.н.
А. В. Кириченко, д.т.н.
М. Н. Кирсанов, д.ф.-м.н.
М. А. Колосов, д.т.н.
Е. А. 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.
А. Л. Тезиков, д.т.н.
В. Б. Чистов, д.т.н.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 583

Леонов В. Е., Гуров А. А. Использование кислорода в качестве окислителя судового топлива вместо воздуха для судовых энергетических установок 583

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ 591

Романовский В. В., Малышев В. А., Бежик А. С. Судовые гибридные электроэнергетические системы с распределенной шиной постоянного тока 591

Самосейко В. Ф., Ширяев Э. В. Управление реактивным электрическим двигателем при питании обмоток синусоидальным током 606

CONTENST

Volume 12. № 3

2020

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 423

Deryabin V. V. A generalized model of a vessel dead reckoning based on neural networks....423

Grinyak V. M., Devyatisilnyi A. S., Ivanenko Yu. S. Decision support for marine traffic control based on route clustering....436

Ustinov Y. M., Pripotnyuk A. V., Gorobtsov A. P. NAVDAT digital broadband system for high-rate data transmission from coast station to ships....450

Dyda A. A., Chinchukova E. P. Synthesis of adaptive ship course control system based on a local quality criterion....459

Tsarik R. S., Akmaykin D. A. Mathematical model for solving the problem of container ship stowage planning for ensuring the safety of transportation....467

Yuyukin I. V. Search for errors in the base of navigation data by the method of spline isosurface visualization....481

Ermakov S. V. Method for assessing the coordinates of the general center of gravity of masses composing the ship constant....492

Diakonova M. D. Network modeling of the tankers chartering process as an element of commercial work digitalization in water transport....504

Ershov A. A., Buklis P. I., Razvozov S. Yu. Ways to effectively maneuver a tanker in a storm....515

Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Semenov A. D. Simulation modelling for network technological processes of seaports cargo handling....526

Karetnikov V. V., Prokhorenkov A. A., Lysenko Yu. N. Using 3D electronic navigational charts to prevent navigational accidents of vessels when passing locks on inland waterways....537

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 551

Ilinskiy D. A., Roginskiy K. A., Ganzha O. Y. Seismic survey in transit zone. KRAB system full-scale tests. Stage 2....551

Potapychev S. N., Malyj V. V., Ivakin Y. A. A model of rational placement of receiving antennas of positional sonar systems in the interests of dispatching geospatial processes....567

Nichiporenko N. T., Sivachenko B. N., Zerkal' A. D. Measurement of ice thickness in the sea port water area using PicoR-ICE device....576

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES....583

Leonov V. Ye., Gurov A. A. Using oxygen instead of air as an oxidizer of marine fuel for ship power plants....583

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.

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

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

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

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

EDITORIAL STAFF:
E-mail: journal@gumrf.ru
http://journal.gumrf.ru

Editorial Collegium:
O. K. Bezyukov, doctor of technical Sciences
A. T. Bekker, doctor of technical Sciences
N. I. Vatin, doctor of technical Sciences
P. A. Garibin, doctor of technical Sciences
D. P. Goloskokov, doctor of technical Sciences
V. A. Zhukov, doctor of technical Sciences
Y. M. Iskanderov, doctor of technical Sciences
O. G. Karatayev, doctor of technical Sciences
V. V. Karetnikov, doctor of technical Sciences
A. V. Kirichenko, doctor of technical Sciences
M. N. Kirsanov, doctor of phys.-math. Sciences
M. A. Kolosov, doctor of technical Sciences
Ye. A. Koroleva, doctor of economic Sciences
I. I. Kostylev, doctor of technical Sciences
A. L. Kuznetsov, doctor of technical Sciences
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
A. L. Tezikov, doctor of technical Sciences
V. B. Chistov, doctor of technical Sciences

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS.....591

Romanovskiy V. V., Malishev V. A., Bezhik A. S. Hybrid electricity systems of vessels with dc-grid system.....591

Samoseiko V. F., Shiryaev E. V. Control of a reactive electric motor when feeding the windings with a sinusoidal current.....606

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-423-435

A GENERALIZED MODEL OF A VESSEL DEAD RECKONING BASED ON NEURAL NETWORKS

V. V. Deryabin

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

The task of predicting the vessel kinematic parameters arises in the dead reckoning mode of its track calculation. This task is solved in the framework of the traditional approach based on using the ordinary differential equations. As a rule, while constructing these equations, the difficulties arise. The difficulties result from selection of the algorithms which are used for the certain forces calculation. These algorithms are not universal, and their working ability could not be guaranteed for all sailing conditions. The task of predicting the vessel kinematic parameters can be performed as the task of approximation of multiple variables functions. Neural networks are known as universal algorithms of such approximation. In the paper, a generalized model of the vessel dead reckoning on the basis of neural networks is performed. An algorithm of its operation is performed as well. The base of the model is formed with deep neural nets which are constructed through a cascade connection between two-layered (shallow) networks. There are two types of neural networks in the structure of the model: main and auxiliary nets. The main nets predict kinematic parameters using the information about force influences on the vessel. The auxiliary nets use the information about only the ship kinematic history. The model configuration allows two modes of operation. The first mode is used when dead reckoning is performed in the usual way. The second mode is used when the reliable information from a log or (and) gyrocompass is unavailable. In the case of both sensors failure the model reproduces the vessel dynamics in the horizontal plane (with three degree of freedom) thus substituting the system of corresponding differential equations. The input signals of the main nets are formed in accordance with the configuration vector of the model. The capabilities of learning the model and its using in practice are also analysed.

Keywords: vessel dead reckoning, deep neural networks, differential equations, machine learning, cascade connection.

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

УДК 656.61.052:527.61:004.032.26

ОБОБЩЕННАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ СЧИСЛЕНИЯ ПУТИ СУДНА

В. В. Дерябин

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

Рассмотрена задача прогноза кинематических параметров судна, возникающая при определении его места в режиме счисления, решаемая в рамках традиционного подхода на основе обыкновенных дифференциальных уравнений движения. Отмечается, что при составлении данных уравнений, как правило, возникают трудности с выбором алгоритмов, по которым рассчитываются отдельные силы: не универсальны и работоспособность их в любых условиях плавания не может быть гарантирована. Задача прогноза кинематических параметров судна может быть представлена в виде аппроксимации (приближения) функции многих переменных, поскольку нейронные сети являются универсальными алгоритмами такой аппроксимации. В работе предлагается обобщенная модель счисления пути судна на основе нейронных сетей, а также алгоритм ее функционирования. Основу модели составляют глубокие нейронные сети,

полученные каскадным соединением двухслойных (мелких) сетей. В структуре модели два типа нейронных сетей: основные и дополнительные. Основные сети прогнозируют кинематические параметры на основе информации о силовых воздействиях на судно, вспомогательные — только на основе его кинематической истории. Конфигурация модели предусматривает режим обычного и аварийного счисления, когда отсутствует достоверная информация, поступающая от однокомпонентного относительного лага или / и гирокомпаса. При неисправности обоих датчиков модель счисления воспроизводит динамику движения судна в горизонтальной плоскости (с тремя степенями свободы), заменяя систему соответствующих дифференциальных уравнений. При этом входные сигналы основных нейронных сетей формируются в соответствии с вектором конфигурации модели. Проанализированы возможности настройки модели и ее использования на практике.

Ключевые слова: счисление пути судна, глубокие нейронные сети, дифференциальные уравнения, машинное обучение, каскадное соединение.

Для цитирования:
Дерябин В. В. Обобщенная нейросетевая модель счисления пути судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 423–435. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-423-435.

Введение (Introduction)

Задача определения координат места судна автономными методами (счисления) является, как известно, актуальной научно-технической проблемой, так как счисление в ряде случаев может оказаться единственным источником навигационной информации. На большинстве судов торгового флота в качестве навигационных датчиков для счисления используются относительный лаг, измеряющий продольную скорость, а также гирокомпас. При такой комплектации основная проблема счисления заключается в адекватности учета внешних факторов (ветер, течение, волнение), для решения которой могут использоваться различные методы, основанные, как правило, на применении знаний из области обыкновенных дифференциальных уравнений [1]–[3].

При составлении дифференциальных уравнений движения судна всегда возникают проблемы, связанные с выбором методов учета силовых воздействий на корпус судна. Как правило, указанные методы имеют ограниченную область работоспособности, т. е. они не универсальны. Известно (см., например, [4]), что движение судна можно представить математически как решение задачи аппроксимации (приближения) функций многих переменных. В качестве инструментов универсальной аппроксимации, выступают искусственные нейронные сети (см., например, [5], [6]).

Идеи использования нейронных сетей для моделирования движения судна нашли широкое воплощение в современных исследованиях (см., например, [7]–[9]). При этом нейронные сети, как правило, применяются в задачах управления движением судна. Подобные задачи близки к задаче счисления, но все же не эквивалентны ей. Например, при построении прогнозирующей модели на основе нейронной сети требуется, чтобы данная модель была адекватной лишь на всем горизонте прогнозирования (как правило, речь идет о минутах и десятках минут). Счисление же может осуществляться сутками.

Целью настоящего исследования является разработка обобщенной нейросетевой модели счисления пути судна, а также алгоритма работы указанной модели. Для достижения данной обозначенной цели необходимо сначала записать дифференциальные уравнения движения судна, привести их к дискретному (по времени) виду, а затем показать, что решение данных уравнений может быть приближенно представлено как решение задачи аппроксимации функции многих переменных, для чего и следует использовать соответствующие нейронные сети.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Математическая формулировка задачи. Дифференциальные уравнения движения судна в горизонтальной плоскости могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{dV_x}{dt} &= f_1(V_x, V_y, \omega, p_{x1}, p_{x2}, ..., p_{xNx});\\
\frac{dV_y}{dt} &= f_2(V_x, V_y, \omega, p_{y1}, p_{y2}, ..., p_{yNy});\\
\frac{d\omega}{dt} &= f_3(V_x, V_y, \omega, p_{\omega 1}, p_{\omega 2}, ..., p_{\omega N\omega}),
\end{aligned} \tag{1}$$

где V_x — продольная составляющая скорости судна относительно воды; V_y — поперечная составляющая скорости судна относительно воды; ω — угловая скорость рыскания (поворота вокруг вертикальной оси); $p_{x1}, p_{x2}, \ldots, p_{xNx}$ — набор из N_x величин, характеризующих силовые воздействия в продольном направлении; $p_{y1}, p_{y2}, \ldots, p_{yNy}$ — набор из N_y величин, характеризующих силовые воздействия в поперечном направлении; $p_{\omega 1}, p_{\omega 2}, \ldots, p_{\omega N\omega}$ — набор из N_ω величин, характеризующих силовые воздействия вокруг вертикальной оси; f_1, f_2, f_3 — непрерывные функции.

Применив к каждой части каждого уравнения системы (1) операцию интегрирования по времени на отрезке [0; τ], получим:

$$\begin{aligned}
V_x(\tau) &= V_x(0) + \int_0^\tau f_1(V_x, V_y, \omega, p_{x1}, p_{x2}, ..., p_{xNx})dt;\\
V_y(\tau) &= V_y(0) + \int_0^\tau f_2(V_x, V_y, \omega, p_{y1}, p_{y2}, ..., p_{yNy})dt;\\
\omega(\tau) &= \omega(0) + \int_0^\tau f_3(V_x, V_y, \omega, p_{\omega 1}, p_{\omega 2}, ..., p_{\omega N\omega})dt.
\end{aligned} \tag{2}$$

Значения интегралов, стоящих в правых частях соотношений (2), определяются видом функций f_1, f_2, f_3 на отрезке времени [0; τ]. В условиях использования цифровой техники вид указанных функций приближенно представляется последовательностью их значений в опорных равноотстоящих точках отрезка [0; τ]: $t_0 = 0, t_1, t_2, \ldots, t_i, \ldots, t_n = \tau$, где n — число элементарных интервалов интегрирования; $i = 0 \div n$. Шаг интегрирования $\Delta t = t_1 - t_0, \ldots, t_n - t_{n-1}$. Очевидно, что $\tau = \Delta t n$. При переходе к такой дискретной постановке задачи получаем, что интегралы в соотношениях (2) определяются последовательностями функций вида $f_l(t_0 = 0), f_l(t_1), ..., f_l(t_n = \tau)$, где нижний индекс $l = 1, 2, 3$. В свою очередь, значение функции f_l в любой опорной точке определяется значениями ее аргументов в данной точке. Например, функция f_1 определяется последовательностями вида $\{V_x(t_i)\}_{i=0\div n}; \{V_y(t_i)\}_{i=0\div n}; \{\omega(t_i)\}_{i=0\div n}; \{p_{x1}(t_i)\}_{i=0\div n}; \{p_{x2}(t_i)\}_{i=0\div n}; ...; \{p_{xNx}(t_i)\}_{i=0\div n}$. Аналогичные рассуждения могут быть использованы и для функций f_2 и f_3.

С учетом ранее изложенного, уравнения (2) могут быть заменены уравнениями следующего вида:

$$\begin{aligned}
&V_x(\tau = t_n) \approx V_x(0) +\\
&+ f_x\left(\{V_x(t_i)\}_{i=0\div n}, \{V_y(t_i)\}_{i=0\div n}, \{\omega(t_i)\}_{i=0\div n}, \{p_{x1}(t_i)\}_{i=0\div n}, ..., \{p_{xNx}(t_i)\}_{i=0\div n}\right);\\
&V_y(\tau = t_n) \approx V_y(0) +\\
&+ f_y\left(\{V_x(t_i)\}_{i=0\div n}, \{V_y(t_i)\}_{i=0\div n}, \{\omega(t_i)\}_{i=0\div n}, \{p_{y1}(t_i)\}_{i=0\div n}, ..., \{p_{yNy}(t_i)\}_{i=0\div n}\right);\\
&\omega(\tau = t_n) \approx \omega(0) +\\
&+ f_\omega\left(\{V_x(t_i)\}_{i=0\div n}, \{V_y(t_i)\}_{i=0\div n}, \{\omega(t_i)\}_{i=0\div n}, \{p_{\omega 1}(t_i)\}_{i=0\div n}, ..., \{p_{\omega N\omega}(t_i)\}_{i=0\div n}\right).
\end{aligned} \tag{3}$$

где f_x, f_y, f_ω — некоторые непрерывные функции.

Общие черты модели счисления. Соотношения (3) представляют собой уравнения счисления для дискретного времени. Второе уравнение используется в том случае, когда необходимо определить скорость дрейфа судна (обычный режим счисления). Другие уравнения могут использоваться для «аварийного счисления» в случае, когда отсутствуют достоверные данные от лага или / и гирокомпаса. Более подробно схема использования уравнений системы (3) выглядит следующим образом:

1) обычное счисление: используется только второе уравнение;

2) неисправен лаг (используются первое и второе уравнения);

3) неисправен гирокомпас (используется второе и третье уравнения);

4) неисправны лаг и гирокомпас (используются все три уравнения системы).

В режиме «аварийного счисления» используется два или три уравнения в определенном порядке. Например, в случае неисправности относительного лага можно использовать вначале первое уравнение, а затем второе или наоборот. Последовательность использования уравнений, возможно, имеет значение, так как алгоритмы, реализующие преобразования f_x, f_y, f_ω, могут иметь различную степень адекватности. Поэтому уравнения (3) должны использоваться в порядке ухудшения адекватности приведенных ранее алгоритмов. При этом меньшая адекватность одного алгоритма может быть скомпенсирована более точным определением его входных данных на основе другого более адекватного алгоритма. Вообще, возможные варианты использования системы уравнений (3) могут быть представлены в виде *вектора конфигурации* $K = (k_1\ \ k_2\ \ k_3)$, где его ненулевые элементы могут принимать неодинаковые значения от одного до трех. Например, $K = (0\ \ 2\ \ 0)$ соответствует варианту обычного счисления, $K = (1\ \ 2\ \ 0)$, $K = (2\ \ 1\ \ 0)$ — варианту, когда неисправен относительный лаг, $K = (0\ \ 2\ \ 3)$, $K = (0\ \ 3\ \ 2)$ — варианту, когда неисправен гирокомпас. В случае неисправности обоих датчиков варианты вектора конфигурации следующие: $K = (1\ \ 2\ \ 3)$, $K = (1\ \ 3\ \ 2)$, $K = (2\ \ 1\ \ 3)$, $K = (2\ \ 3\ \ 1)$, $K = (3\ \ 1\ \ 2)$, $K = (3\ \ 2\ \ 1)$.

Оптимальные (по точности) значения вектора K для режима «аварийного счисления» могут быть получены на основе большого объема эмпирических данных в ходе тестирования модели. Таким образом, для каждого варианта счисления может быть определен оптимальный вектор конфигурации K. Использование системы (3) с выбранным вектором конфигурации K позволяет организовать *итерационный процесс Пикара*. Например, после однократного вычисления V_x, V_y, ω можно повторить вычисления, но уже с уточненными входными данными. Цикл следует остановить, когда модули разностей значений величин V_x, V_y, ω для двух последовательных итераций будут одновременно менее установленных значений ε_x, ε_y, ε_ω соответственно. При использовании только одной итерации ограничения не устанавливаются. Таким образом, параметрами модели счисления выступают вектор конфигурации K и ограничения ε_x, ε_y, ε_ω. Указанные параметры выбираются на этапе использования модели.

Реализация модели на основе нейронной сети. Функции f_x, f_y, f_ω могут быть реализованы при помощи нейронных сетей, из теории которых известно, что нейронная сеть прямого распространения с одним скрытым слоем способна аппроксимировать (равномерно приблизить) любую непрерывную функцию нескольких переменных с любой наперед заданной точностью [10]. Скрытые нейроны такой сети имеют функции активации, которые не являются многочленами и при этом они локально интегрируемые (по Риману). Выходной нейрон имеет при этом тождественную функцию активации. Общий вид такой сети представлен на рис. 1.

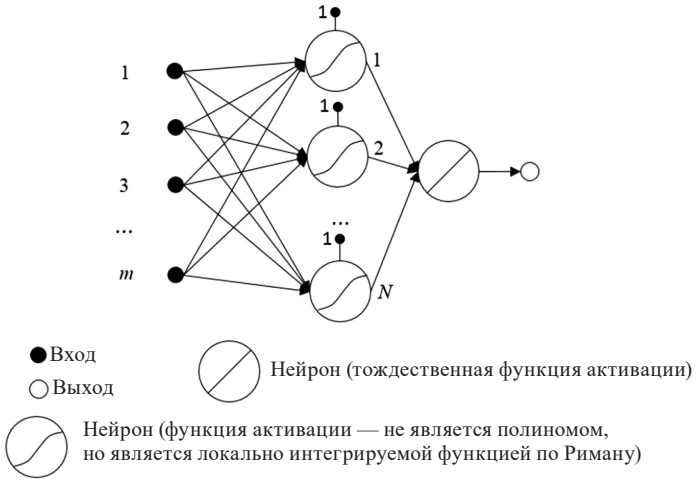


Рис 1. Общий вид архитектуры нейронной сети,
используемой для универсальной аппроксимации функций

Основная проблема использования нейронных сетей с одним скрытым слоем заключается в том, что размер слоя (число нейронов) может быть очень большим для того, чтобы обеспечить требуемую точность приближения функции. В качестве возможного решения проблемы иногда имеет смысл перейти к «глубокой» архитектуре, т. е. использовать два и более скрытых слоя исходя из того, что суммарное число нейронов сети может быть сокращено при сохранении точности аппроксимации.

Наибольшую популярность приобрели глубокие сети прямого распространения, т. е. имеющие архитектуру, подобную приведенной на рис. 1, но между скрытым слоем и выходным у них располагаются дополнительные слои. Интуитивно идею использования дополнительных слоев можно объяснить следующим образом. Пусть имеется сеть с одним скрытым слоем («мелкая» нейронная сеть). Пусть она приближает с требуемой точностью непрерывную функцию m переменных $f = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$. При добавлении еще одного слоя (ближе к выходу сети) на выходе каждого i-го нейрона первого скрытого слоя будет получаться функция $\tilde{f}_i = \tilde{f}_i(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, где $i = 1 \div N$. Впоследствии N таких функций представляют вход уже для обычной мелкой нейронной сети, гарантированно преобразующей их в функцию $f_1 = f_1(\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \ldots, \tilde{f}_N) = f_1(x_1, x_2, \ldots, x_m)$. Подбором числа нейронов в каждом скрытом слое и настройкой параметров можно добиться того, что $f \approx f_1$. При этом вход для мелкой сети в виде функций $(\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \ldots, \tilde{f}_i, \ldots, \tilde{f}_N)$ может потребовать для аппроксимации меньшее количество нейронов, чем если бы подавать на вход только $(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, а также общее количество нейронов может быть меньше для обеспечения такой же точности. Все ранее изложенное справедливо также в случае трех и более скрытых слоев. Основная идея заключается в том, что на вход мелкой сети (последнего скрытого слоя) поступает не вектор входных величин $(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, а вектор функций от указанных величин $(\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \ldots, \tilde{f}_N)$таким образом сформированных, что требуемая точность аппроксимации достигается меньшим суммарным числом нейронов по сравнению с мелкой архитектурой.

Далее возникает вопрос о том, каким образом формируются указанные функции $(\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \ldots, \tilde{f}_N)$, представляющие вход для последнего скрытого слоя. Можно показать, что данные функции в структуре такой глубокой сети зависят от одинаковых весовых коэффициентов и порогов предшествующих скрытых слоев. Иными словами, регулировка любого коэффициента сети оказывает влияние на вид каждой функции из набора $(\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \ldots, \tilde{f}_N)$. Получается, что рассматриваемая глубокая структура как бы ограничивает возможности представления функций $(\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \ldots, \tilde{f}_N)$, подаваемых на вход последнего скрытого слоя, в чем и заключается ее недостаток. Для устранения выявленного ограничения можно использовать каскадное соединение мелких нейронных сетей, так что вид функций $(\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \ldots, \tilde{f}_N)$ регулируется независимо. Сеть работает следующим образом. Входной вектор $X = (x_1, x_2, \ldots, x_m)$ подается одновременно на входы N_1 мелких нейронных сетей (см. рис. 2), имеющих архитектуру, представленную на рис. 1. Каждая такая сеть формирует N_1 функций переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$. Каждая из таких функций подается вновь на входы N_2 мелких сетей, прогнозирующих другой набор функций: переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$. Процесс повторяется до тех пор, пока не будут рассмотрены M слоев мелких сетей, причем $N_M \equiv 1$. Последняя сеть прогнозирует значение приближаемой функции. Общий вид архитектуры такой глубокой сети (ГС) представлен на рис. 2.

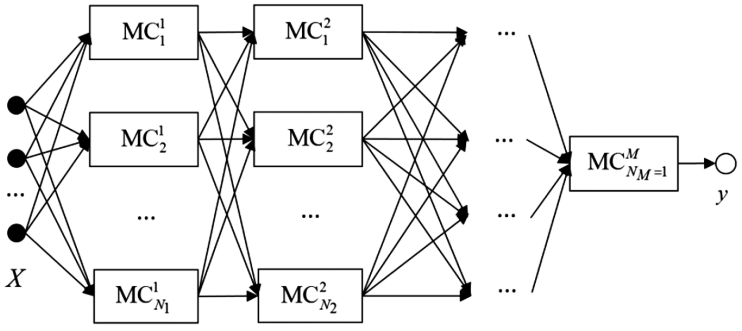


Рис 2. Общий вид архитектуры глубокой сети:
МС — мелкая нейронная сеть; X — вектор входа; y — выходная величина

Представленная на рис. 2 сеть используется для нелинейного отображения $y = y(X)$, выступая в качестве «глубокого» аппроксиматора. Использование глубокой архитектуры позволит, возможно, добиться удовлетворительной точности аппроксимации меньшим числом скрытых нейронов по сравнению с мелкой архитектурой. Параметрами архитектуры ГС являются матрица архитектуры A. Каждый столбец такой матрицы соответствует слою скрытых сетей. Формирование строк матрицы начинается всегда с первой строки и заканчивается номером строки, который равен количеству сетей $N_{j=1\div M}$ в данном скрытом слое. Элементы всех следующих строк принимаются нулевыми. Каждый ненулевой элемент матрицы архитектуры есть вектор, имеющий следующий вид: $A_{ij} = (s_{i=1\div:N_{j=1\div M}}$, тип и параметры ФА$_{i=1\div:N_{j=1\div M}})$, где s — число нейронов скрытого слоя мелкой нейронной сети $\mathrm{MC}^{j=1\div M}_{i=1\div:N_{j=1\div M}}$, «тип ФА» — вид функций активации нейронов ее скрытого слоя, «параметры ФА» — значения соответствующих параметров. Матрицей архитектуры ГС (в сокращенном виде — $\tilde{\mathrm{A}}$) будем называть матрицу, составленную из тех же элементов A_{ij}, но содержащих только число нейронов $s_{i=1\div:N_{j=1\div M}}$. Рассмотрим следующую матрицу архитектуры ГС в сокращенном виде:

$$\tilde{\mathrm{A}} = \begin{pmatrix} 10 & 15 & 5 & 20 \\ 10 & 15 & 5 & 0 \\ 10 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 \end{pmatrix}$$

Приведенная матрица задает ГС (см. рис. 2), первый слой которой содержит три мелкие сети, каждая из них содержит десять скрытых нейронов; второй слой содержит две мелкие сети, каждая из которых имеет по пятнадцать скрытых нейронов; третий слой содержит четыре мелкие сети с пятью скрытыми нейронами; четвертый слой представлен единственной сетью с двадцатью нейронами в скрытом слое. Таким образом, можно установить следующие свойства матрицы A (и $\tilde{\mathrm{A}}$). Во-первых, число строк матрицы определяется наибольшим количеством «скрытых» сетей, используемых в каком-либо слое (в данном примере, третий слой имеет 4 сети, что и определяет число строк матрицы). Во-вторых, все элементы последнего столбца матрицы, за исключением первого в строке, всегда равны нулю. Указанное свойство объясняется скалярным характером выходного сигнала ГС.

Матрицу $\tilde{\mathrm{A}}$ имеет смысл использовать вместо матрицы A в том случае, когда тип и параметры функций активации определяются более или менее одинаковыми для всех мелких сетей, составляющих ГС. В таком случае, параметрами архитектуры ГС является матрица $\tilde{\mathrm{A}}$ и дополнительные характеристики функции активации.

Будем использовать ГС для аппроксимации зависимостей f_x, f_y, f_ω в выражении (3), прежде обозначив набор аргументов указанных функций через ${}_nX_x$, ${}_nX_y$, ${}_nX_\omega$. Например, в соответствии с соотношением (3), получим

$${}_nX_x = \begin{pmatrix} \{V_x(t_i)\}_{i=0\div n}, \{V_y(t_i)\}_{i=0\div n}, \{\omega(t_i)\}_{i=0\div n}; \\ \{p_{x1}(t_i)\}_{i=0\div \boldsymbol{n}}, \ldots, \{p_{xNx}(t_i)\}_{i=0\div n}. \end{pmatrix}$$

Система уравнений (3) с учетом введенных обозначений примет вид:

$$\begin{aligned} V_x(\tau) &\approx V_x(0) + f_x\left({}_nX_x\right) \approx V_x^{\text{neuro}}(\tau) := V_x(0) + f_x^{\text{neuro}}\left({}_nX_x\right); \\ V_y(\tau) &\approx V_y(0) + f_y\left({}_nX_y\right) \approx V_y^{\text{neuro}}(\tau) := V_y(0) + f_y^{\text{neuro}}\left({}_nX_y\right); \\ \omega(\tau) &\approx \omega(0) + f_\omega\left({}_nX_\omega\right) \approx \omega^{\text{neuro}}(\tau) := \omega(0) + f_\omega^{\text{neuro}}\left({}_nX_\omega\right), \end{aligned} \qquad (4)$$

где $f_x^{\text{neuro}}(\cdot)$, $f_y^{\text{neuro}}(\cdot)$, $f_\omega^{\text{neuro}}(\cdot)$ — преобразования, выполняемые глубокими нейронными сетями, $V_x^{\text{neuro}}(\tau)$, $V_y^{\text{neuro}}(\tau)$, $\omega^{\text{neuro}}(\tau)$ — нейросетевые оценки соответствующих кинематических параметров движения судна.

В дальнейшем нейронную сеть, реализующую одно из отображений $f_x^{\text{neuro}}(\cdot), f_y^{\text{neuro}}(\cdot), f_\omega^{\text{neuro}}(\cdot)$, будет называть *основной глубокой сетью* (ОГС) и для сокращения записей использовать следую-

щие обозначения: $ОГС_q^n$, где нижний индекс q принимает значения x, y или ω и показывает, какая величина прогнозируется; а верхний n, как и прежде, показывает число отрезков равной длины, образующих промежуток [0; τ]. Например, символ «$ОГС_x^1$» обозначает, что используется основная глубокая нейронная сеть, входной вектор которой ${}_1X_x$ (сеть прогнозирует $V_x^{\text{neuro}}(\tau)$), т. е. для его формирования необходимы данные только на концах отрезка [0; τ]. В соответствии с соотношениями (4), нейронная сеть $ОГС_q^n$ прогнозирует приращение скорости на промежутке [0; τ]. Однако, если начальную скорость подать на последний (выходной) нейрон через постоянный единичный вес, то получится, что $ОГС_q^n$ прогнозирует само значение скорости (например, $V_x^{\text{neuro}}(\tau)$). В дальнейшем будем считать, что такая операция выполнена, и сети $ОГС_q^n$ имеют последний нейрон, соединенный с начальной скоростью через ненастраиваемый коэффициент, равный единице.

Для любых вариантов конфигурации необходимо использовать *спрогнозированные* аналоги кинематических параметров $\hat{V}_x(\tau)$, $\hat{V}_y(\tau)$, $\hat{\omega}(\tau)$, полученные на основе их значений в предшествующие моменты времени. Например, при конфигурации $K = (0 \quad 2 \quad 0)$, в соответствии с соотношениями (4), для определения поперечной скорости как входной величины $V_y(\tau)$ необходимо (на первой итерации) использовать ее спрогнозированный аналог, т. е. значение $\hat{V}_y(\tau)$. В данном случае $V_y(\tau)$ является определяемой величиной и можно использовать лишь ее спрогнозированное значение $\hat{V}_y(\tau)$.

Необходимость использования спрогнозированных значений возникает также и в режимах «аварийного счисления». Например, при конфигурации $K = (1 \quad 2 \quad 0)$, в соответствии с соотношениями (4), для определения продольной скорости $V_x(\tau)$ необходимо знание поперечной для всех точек интервала, включая τ. Однако $V_y(\tau)$ определится лишь после решения второго уравнения. Поэтому в данном случае на первой итерации необходимо взять $V_y(\tau) \approx \hat{V}_y(\tau)$. Конечно, уже на второй итерации значение $V_y(\tau)$ берется как вычисленное на первой итерации. Таким образом, возникает задача прогноза временных рядов. Для прогноза (на шаг вперед) логично использовать глубокую нейронную сеть той же архитектуры (см. рис. 2), которую будем называть *вспомогательной глубокой сетью* (ВГС) и обозначать символом $ВГС_q^{lq}$, где $l_q \geq 1$ — количество интервалов, используемых для построения прогноза. Например, символ $ВГС_y^2$ обозначает нейронную сеть, которая прогнозирует скорость $V_y(t_3)$, если известны предыдущие значения $V_y(t_0 = 0)$, $V_y(t_1)$, $V_y(t_2)$, т. е. использует два интервала для построения прогноза.

Решение системы (4) может быть реализовано при различных значениях вектора конфигурации K, определяющего вид входных векторов: ${}_nX_x$, ${}_nX_y$, ${}_nX_\omega$. Как известно, существует одиннадцать вариантов вектора конфигурации. Прежде чем определять входные векторы для каждого варианта, уточним следующие обозначения. Символами V_x, V_y, ω обозначаются теоретические значения кинематических параметров движения судна, символами $\hat{V}_x$, $\hat{V}_y$, $\hat{\omega}$ — спрогнозированные значения на основе вспомогательных нейронных сетей $ВГС_q^{lq}$; V_y^{neuro}, V_x^{neuro}, ω^{neuro} — спрогнозированные значения при помощи основных нейронных сетей $ОГС_q^n$ на *текущей итерации*; $\tilde{V}_x^{\text{neuro}}, \tilde{V}_y^{\text{neuro}}, \tilde{\omega}^{\text{neuro}}$ — спрогнозированные значения при помощи основных нейронных сетей $ОГС_q^n$, взятые с *предыдущей итерации*; V_x^*, ω^* — значения параметров, полученные на основе измерений.

Вне зависимости от конфигурации, каждый из входных векторов ${}_nX_x$, ${}_nX_y$, ${}_nX_\omega$ содержит измеренные значения параметров $\left\{p_{q1}(t_i)\right\}_{i=0\div n}, \ldots, \left\{p_{qNq}(t_i)\right\}_{i=0\div n}$, характеризующих силовые воздействия на судно.

Далее рассмотрим наиболее интересные для практики варианты конфигурации модели счисления, отличающиеся правилами формирования входных векторов ${}_nX_x$, ${}_nX_y$, ${}_nX_\omega$.

1. При векторе $K = (0 \quad 2 \quad 0)$ выполняется обычное счисление. Начальные значения кинематических параметров определяются следующим образом:

$$V_x(0), V_y(0), \omega(0) = \begin{cases} V_x^*(T=0), V_y(T=0), \omega(T=0), & \text{если } T/\tau = 1; \\ V_x^*(0), V_y^{\text{neuro}}(0), \omega^*(0), & \text{если } T/\tau > 1, \end{cases}$$

где T — общее время плавания.

Здесь и в дальнейшем предполагается, что угловая скорость поворота ω определяется численным дифференцированием курса судна, поэтому $\omega(0) = \omega(T = 0)$, если $T / \tau = 1$, а не $\omega(0) = \omega^*(T = 0)$.

Последовательности $\{V_x(t_i)\}_{i=1\div n}$ и $\{\omega(t_i)\}_{i=1\div n}$ заполняются измеренными значениями соответствующих величин, т. е. $\{V_x(t_i)\}_{i=1\div n} = \{V_x^*(t_i)\}_{i=1\div n}$ и $\{\omega(t_i)\}_{i=1\div n} = \{\omega^*(t_i)\}_{i=1\div n}$. Последовательность $\{V_y(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{V_y^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$. Естественно, что векторы ${}_nX_x$, ${}_nX_\omega$ не формируются.

В качестве значения $V_y(\tau)$ на первой итерации используется спрогнозированное вспомогательной нейронной сетью ВГС_y^{ly} значение $\hat{V}_y(\tau)$. При этом $l_y + 1$ должно быть не более общего количества имеющихся предыдущих значений скорости: $V_y(T = 0)$, $V_y^{\text{neuro}}(T = 1\Delta t)$, $V_y^{\text{neuro}}(T = 2\Delta t)$, ... , $V_y^{\text{neuro}}(t_{n-1})$. Для последующих итераций в качестве $V_y(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_y^n на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{V}_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

2. При векторе $K = (1 \quad 2 \quad 0)$ начальные значения кинематических параметров определяются следующим образом:

$$V_x(0), V_y(0), \omega(0) = \begin{cases} V_x(T=0), V_y(T=0), \omega(T=0), \text{если } T/\tau = 1; \\ V_x^{\text{neuro}}(0), V_y^{\text{neuro}}(0), \omega^*(0), \text{если } T/\tau > 1. \end{cases}$$

Последовательность $\{\omega(t_i)\}_{i=1\div n}$ заполняется измеренными значениями угловой скорости, т. е. $\{\omega(t_i)\}_{i=1\div n} = \{\omega^*(t_i)\}_{i=1\div n}$. Последовательность $\{V_x(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{V_x^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$ и $\{V_y(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{V_y^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$. Вектор ${}_nX_\omega$ не формируется.

Для сети ОГС_x^n конечная продольная скорость $V_x(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_x(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_x^{lx}. При этом $l_x + 1$ должно быть не более общего количества имеющихся предыдущих значений скорости: $V_x(T = 0)$, $V_x^{\text{neuro}}(T = 1\Delta t)$, $V_x^{\text{neuro}}(T = 2\Delta t)$, ... , $V_x^{\text{neuro}}(t_{n-1})$. Для последующих итераций в качестве $V_x(\tau)$ берется спрогнозированное ОГС_x^n значение скорости с предыдущей итерации, т. е. $\tilde{V}_x^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_y(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_y^{ly}. Условие для l_y должно быть выполнено по аналогии с принципом, описанным ранее. Для последующих итераций в качестве $V_y(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_y^n на предыдущей итерации $\tilde{V}_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

Для сети ОГС_y^n конечная продольная скорость $V_x(t_n = \tau)$. Используется значение $V_x^{\text{neuro}}(\tau)$, спрогнозированное ОГС_x^n для текущей итерации.

Конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_y(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_y^{ly}. Для последующих итераций в качестве $V_y(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_y^n на предыдущей итерации $\tilde{V}_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

3. При $K = (2 \quad 1 \quad 0)$ начальные значения кинематических параметров определяются следующим образом:

$$V_x(0), V_y(0), \omega(0) = \begin{cases} V_x(T=0), V_y(T=0), \omega(T=0), \text{если } T/\tau = 1; \\ V_x^{\text{neuro}}(0), V_y^{\text{neuro}}(0), \omega^*(0), \text{если } T/\tau > 1. \end{cases}$$

Последовательность $\{\omega(t_i)\}_{i=1\div n}$ заполняется измеренными значениями угловой скорости, т. е. $\{\omega(t_i)\}_{i=1\div n} = \{\omega^*(t_i)\}_{i=1\div n}$. Последовательность $\{V_x(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{V_x^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$ и $\{V_y(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{V_y^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$. Вектор ${}_nX_\omega$ не формируется.

Для сети ОГС_y^n конечная продольная скорость $V_x(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_x(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_x^{lx}. Для последующих итераций в качестве $V_x(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_x^n на предыдущей итерации $\tilde{V}_x^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_y(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_y^{ly}. Для последующих итераций в качестве $V_y(\tau)$ берется спрогнозированное ОГС_y^n значение, спрогнозированное ОГС с предыдущей итерации, т. е. $\tilde{V}_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

Для сети ОГС_x^n конечная продольная скорость $V_x(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_x(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_x^{lx}. Для последующих итераций в качестве $V_x(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_x^n на предыдущей итерации $\tilde{V}_x^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. Используется значение $V_y^{\text{neuro}}(\tau)$, спрогнозированное ОГС_y^n для текущей итерации.

4. При $K = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 3 \end{pmatrix}$ начальные значения кинематических параметров определяются следующим образом:

$$V_x(0), V_y(0), \omega(0) = \begin{cases} V_x^*(T=0), V_y(T=0), \omega(T=0), & \text{если } T/\tau = 1; \\ V_x^*(0), V_y^{\text{neuro}}(0), \omega^{\text{neuro}}(0), & \text{если } T/\tau > 1. \end{cases}$$

Последовательность $\{V_x(t_i)\}_{i=1\div n}$ заполняется измеренными значениями продольной скорости, т. е. $\{V_x(t_i)\}_{i=1\div n} = \{V_x^*(t_i)\}_{i=1\div n}$. Последовательность $\{V_y(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{V_y^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$ и $\{\omega(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{\omega^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$. Вектор ${}_nX_x$ не формируется.

Для сети ОГС_y^n конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_y(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_y^{ly}. Для последующих итераций в качестве $V_y(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_y^n на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{V}_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная угловая скорость $\omega(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{\omega}(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью $\text{ВГС}_\omega^{l\omega}$. Для последующих итераций в качестве $\omega(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_ω^n на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{\omega}^{\text{neuro}}(\tau)$.

Для сети ОГС_ω^n конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. Берется значение, получаемое на выходе ОГС_y^n на текущей итерации, т. е. $V_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная угловая скорость $\omega(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{\omega}(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью $\text{ВГС}_\omega^{l\omega}$. Для последующих итераций в качестве $\omega(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_ω^n на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{\omega}^{\text{neuro}}(\tau)$.

5. При $K = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 2 \end{pmatrix}$ начальные значения кинематических параметров определяются следующим образом:

$$V_x(0), V_y(0), \omega(0) = \begin{cases} V_x^*(T=0), V_y(T=0), \omega(T=0), & \text{если } T/\tau = 1; \\ V_x^*(0), V_y^{\text{neuro}}(0), \omega^{\text{neuro}}(0), & \text{если } T/\tau > 1. \end{cases}$$

Последовательность $\{V_x(t_i)\}_{i=1\div n}$ заполняется измеренными значениями продольной скорости, т. е. $\{V_x(t_i)\}_{i=1\div n} = \{V_x^*(t_i)\}_{i=1\div n}$. Последовательность $\{V_y(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{V_y^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$ и $\{\omega(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{\omega^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$. Вектор ${}_nX_x$ не формируется.

Для сети ОГС_ω^n конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_y(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_y^{ly}. Для последующих итераций в качестве $V_y(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_y^n на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{V}_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная угловая скорость $\omega(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{\omega}(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью $\text{ВГС}_\omega^{l\omega}$. Для последующих итераций в качестве $\omega(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_ω^n на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{\omega}^{\text{neuro}}(\tau)$.

Для сети ОГС_y^n конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_y(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_y^{ly}. Для последующих итераций в качестве $V_y(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_y^n на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{V}_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная угловая скорость $\omega(t_n = \tau)$. Берется значение, получаемое на выходе ОГС_{ω}^{n}, на текущей итерации, т. е. $\omega^{\text{neuro}}(\tau)$.

6. При $K = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$ начальные значения кинематических параметров определяются следующим образом:

$$V_x(0), V_y(0), \omega(0) = \begin{cases} V_x(T=0), V_y(T=0), \omega(T=0), \text{ если } T/\tau = 1; \\ V_x^{\text{neuro}}(0), V_y^{\text{neuro}}(0), \omega^{\text{neuro}}(0), \text{ если } T/\tau > 1. \end{cases}$$

Последовательности $\{V_x(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{V_x^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$, $\{V_y(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{V_y^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$ и $\{\omega(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{\omega^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}$.

Для сети ОГС_{x}^{n} конечная продольная скорость $V_x(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_x(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_{x}^{lx}. Для последующих итераций в качестве $V_x(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_{x}^{n} на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{V}_x^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_y(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_{y}^{ly}. Для последующих итераций в качестве $V_y(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_{y}^{n} на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{V}_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная угловая скорость $\omega(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{\omega}(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью $\text{ВГС}_{\omega}^{l\omega}$. Для последующих итераций в качестве $\omega(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_{ω}^{n} на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{\omega}^{\text{neuro}}(\tau)$.

Для сети ОГС_{y}^{n} конечная продольная скорость $V_x(t_n = \tau) = V_x^{\text{neuro}}(\tau)$, т. е. берется непосредственно с выхода ОГС_{x}^{n} на текущей итерации. Конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{V}_y(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью ВГС_{y}^{ly}. Для последующих итераций в качестве $V_y(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_{y}^{n} на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{V}_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная угловая скорость $\omega(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{\omega}(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью $\text{ВГС}_{\omega}^{l\omega}$. Для последующих итераций в качестве $\omega(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_{ω}^{n} на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{\omega}^{\text{neuro}}(\tau)$.

Для сети ОГС_{ω}^{n} конечная продольная скорость $V_x(t_n = \tau) = V_x^{\text{neuro}}(\tau)$, т. е. берется непосредственно с выхода ОГС_{x}^{n} на текущей итерации. Конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau) = V_y^{\text{neuro}}(\tau)$, т. е. берется значение, получаемое на выходе ОГС_{y}^{n} на текущей итерации.

Конечная угловая скорость $\omega(t_n = \tau)$. На первой итерации используется значение $\hat{\omega}(\tau)$, спрогнозированное вспомогательной сетью $\text{ВГС}_{\omega}^{l\omega}$. Для последующих итераций в качестве $\omega(\tau)$ берется значение, спрогнозированное основной сетью ОГС_{ω}^{n} на предыдущей итерации, т. е. $\tilde{\omega}^{\text{neuro}}(\tau)$.

Оставшиеся пять вариантов вектора конфигурации K могут быть рассмотрены по аналогии с вариантами, рассмотренными ранее, и для сокращения записей не приводятся.

Результаты (Results)

Теперь можно определить параметры архитектуры нейросетевой модели счисления пути судна в виде следующего списка:

1. Вектор конфигурации K.

2. Итерационные ограничения $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_\omega$ (при наличии).

3. Число шагов модели n и длительность временного интервала τ.

4. Матрицы архитектуры $\text{A}_{\text{ОГС}_x^i}$, $\text{A}_{\text{ОГС}_y^i}$, $\text{A}_{\text{ОГС}_\omega^i}$ (или сокращенные их версии $\tilde{\text{A}}_{\text{ОГС}_x^i}$, $\tilde{\text{A}}_{\text{ОГС}_y^i}$, $\tilde{\text{A}}_{\text{ОГС}_\omega^i}$ + характеристики функций активации) основных глубоких сетей ($i = 1 \div n$).

5. Матрицы архитектуры $\text{A}_{\text{ВГС}_x^{lx}}$, $\text{A}_{\text{ВГС}_y^{ly}}$, $\text{A}_{\text{ВГС}_\omega^{l\omega}}$ (или сокращенные их версии $\tilde{\text{A}}_{\text{ВГС}_x^{lx}}$, $\tilde{\text{A}}_{\text{ВГС}_y^{ly}}$, $\tilde{\text{A}}_{\text{ВГС}_\omega^{l\omega}}$ + характеристики функций активации) вспомогательных глубоких сетей.

6. Количества интервалов, используемых для построения прогноза вспомогательными сетями, l_x, l_y, l_ω (количества соответствующих точек, уменьшенные на единицу).

7. Наборы параметров $p_{x1}, p_{x2}, \dots, p_{xNx}, p_{y1}, p_{y2}, \dots, p_{yNy}, p_{\omega 1}, p_{\omega 2}, \dots, p_{\omega N\omega}$, характеризующих управляющие и возмущающие воздействия в соответствии с выражением (1).

Алгоритм работы нейросетевой модели счисления:

1. Задаются параметры архитектуры модели.

2. Начинается определение кинематических параметров V_x, V_y, ω (в зависимости от вектора конфигурации K) на конец промежутка времени [0; τ]:

2.1. Прогноз значения на конец отрезка $[t_0 = 0; t_1]$.

2.2. Прогноз значения на конец отрезка $[t_1; t_2]$.

……..

2. *n*. Прогноз значения на конец отрезка $[t_{n-1}; t_n = \tau]$.

При выполнении указанных операций, описываемых п. 2.1–2.*n*, формируются соответствующие входные векторы ${}_nX_x$, ${}_nX_y$, ${}_nX_\omega$ в зависимости от вектора конфигурации K (с. 426), работают задействованные основные ОГС $ОГС_q^n$ и вспомогательные ВГС $ВГС_q^{lq}$ глубокие нейронные сети. При этом контролируется, чтобы $l_q \geq 1$, если данных недостаточно для выполнения прогноза с использованием установленного числа промежутков l_x, l_y, l_ω. В ходе каждой операции, описанной в пп. 2.1–2.*n* , реализуется в общем случае циклическая процедура, критерием выхода из которой является то, что изменение прогнозируемых величин от итерации к итерации не превосходит по модулю установленные значения $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_\omega$.

3. Границы промежутка [0; τ] сдвигаются на элементарный шаг Δ*t* вперед (по мере поступления данных на момент τ + Δ*t*). Затем переход к пп. 2.

Обсуждение (Discussion)

Приведенный в проведенном исследовании алгоритм предполагает реализацию в режиме реального времени. Как только поступают данные на дискретный момент, алгоритм сразу начинает свою работу. Модель содержит основные и вспомогательные глубокие нейронные сети, которые обучаются, в общем случае, различным образом. Основные сети обучаются, как правило, на основе большого объема заранее накопленных данных, хотя теоретически нельзя исключать и настройку таких сетей в реальном времени (по мере поступления образцов). Их свободные параметры определяются физическими характеристиками конкретного судна. Вспомогательные сети обучаются только в режиме реального времени на выборках прогнозируемых параметров, т. е., как правило, в последовательном режиме. Их свободные параметры определяются непосредственно лишь предыдущими значениями прогнозируемых величин. Использование таких сетей необходимо только на первых итерациях циклов.

При малой временной дискретности Δ*t* система должна «успеть» выполнить вычисления до следующего момента времени, что накладывает определенные ограничения, относящиеся к быстродействию навигационной вычислительной машины. Указанные ограничения не слишком критичны, так как основные сети обучаются заранее, либо последовательно (по мере поступления данных), а вспомогательные настраиваются обычно последовательно. В значительной степени быстродействие системы определяется выбранным вектором конфигурации *K*.

Алгоритм работы модели цикличен. Во-первых, цикличность заключается в том, что для вычисления интересующих параметров на конце отрезка [0; τ], в общем случае, используется итерационная процедура. Во-вторых, цикличность выражается в том, что внутри любого отрезка [0; τ] необходимо последовательно рассмотреть *n* архитектур основных сетей, при этом индекс архитектуры пробегает значения от 1 до *n*.

Вектор конфигурации *K* для режимов аварийного счисления может быть подобран опытным путем на основе тестирования системы с использованием больших объемов данных, накапливаемых по мере повседневной эксплуатации судна. Можно подобрать такие конфигурации для режимов неисправности лага, гирокомпаса и обоих датчиков одновременно. Вектор конфигурации $K = (0\ \ 2\ \ 0)$ является единственным для режима обычного счисления. Таким образом, из одиннадцати возможных векторов конфигурации остаются четыре оптимальные.

Заключение (Conclusion)

В результате настоящего исследования разработана обобщенная нейросетевая модель счисления пути судна. При этом счисление понимается в широком смысле: традиционное и аварийное (когда неисправен один или более навигационных датчиков). В последнем случае нейросетевая модель фактически имитирует движение судна в горизонтальной плоскости, точнее динамику такого движения в условиях взаимодействия с окружающей средой. Модель прогнозирует продольную и поперечную составляющие линейной скорости судна, а также составляющую угловой скорости вокруг вертикальной (к плоскости горизонта) оси. Основу обобщенной модели составляют глубокие нейронные сети, которые выполняют задачи аппроксимации (приближения) функций многих переменных, возникающие, как показано, в процессе выработки счислимых координат места судна. Глубокие сети представляют собой каскадные соединения обычных («мелких») двухслойных нейронных сетей прямого распространения, обладающих свойствами универсальной аппроксимации. Сформирован список параметров обобщенной модели счисления пути судна на основе нейронных сетей. Предложен алгоритм работы синтезированной модели счисления, реализация которого возможна в судовой навигационной аппаратуре.

Разработанная модель имеет достаточно сложную архитектуру с большим числом параметров, определяющих ее конечную точность. Следует отметить, что определение оптимального набора указанных параметров модели — задача сложная, требующая дополнительных исследований. Проблема выбора параметров усугубляется тем, что оптимальные их значения зависят в общем случае от условий плавания конкретного судна и его физических характеристик. В связи с этим получение теоретического решения в общем виде (для всех судов и условий плавания) является затруднительным.

Предлагаемая обобщенная нейросетевая модель счисления и алгоритм ее работы представляют собой всего лишь начальный этап общего пути построения работоспособной нейросетевой системы счисления. Следующими этапами являются процесс подготовки набора учебных данных (образцов), непосредственная настройка (обучение) системы и, наконец, ее тестирование на основе реальных данных, полученных в процессе повседневной эксплуатации судна. Разработка методов реализации указанных этапов и представляет собой задачу дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дерябин В. В.* Модель счисления пути судна в условиях воздействия внешних факторов / В. В. Дерябин // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1 (63). — С. 33–39.

2. *Дмитриев С. П.* Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории: научное издание / С. П. Дмитриев, А. Е. Пелевин. — СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2002. — 160 с.

3. *Юдин Ю. И.* Идентификация математической модели контейнеровоза проекта Arctic Container Ship ACS 650 для различных этапов швартовки / Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев, Б. В. Дабижа, С. О. Петров // Эксплуатация морского транспорта. — 2019. — № 3 (92). — С. 89–107. DOI: 10.34046/aumsuomt92/15.

4. *Дерябин В. В.* Использование нейронных сетей для стабилизации судна на траектории / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 665–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-665-678.

5. *Haykin S.* Neural Networks and Learning Machines / S. Haykin. — Third Edition. — New Jersey: Pearson, 2009. — 936 p.

6. *Liu Z.* Neural network as a function approximator and its application in solving differential equations / Z. Liu, Y. Yang, Q. Cai // Applied Mathematics and Mechanics. — 2019. — Vol. 40. — Is. 2. — Pp. 237–248. DOI: 10.1007/s10483-019-2429-8.

7. *Дерябин В. В.* Обзор исследований, посвященных использованию нейросетевых технологий в судовождении / В. В. Дерябин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 29–43. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-29-43.

8. *Подпорин С. А.* Использование нейро-нечетких контроллеров в системах управления движением морских судов / С. А. Подпорин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. — 2012. — № 4 (33). — С. 181–187.

9. *Kula K. S.* Model-based controller for ship track-keeping using neural network / K. S. Kula // 2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics (CYBCONF). — IEEE, 2015. — Pp. 178–183. DOI: 10.1109/CYBConf.2015.7175928.

10. *Hornik K.* Some new results on neural network approximation / K. Hornik // Neural Networks. — 1993. — Vol. 6. — Is. 8. — Pp. 1069–1072. DOI: 10.1016/S0893-6080(09)80018-X.

REFERENCES

1. Deryabin, V. V. "Vessel's dead reckoning model under external factors conditions." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(63) (2011): 33–39.

2. Dmitriev, S. P., and Pelevin A. E. *Zadachi navigatsii i upravleniya pri stabilizatsii sudna na traektorii.* SPb.: Elektropribor, 2002.

3. Yudin, Yu. I., S. V. Pashentsev, B. V. Dabizha, and S. O. Petrov. "Arctic Container Ship ACS 650 mathematical model identification for various stages of mooring." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(92) (2019): 89–107. DOI: 10.34046/aumsuomt92/15.

4. Deryabin, Victor V. "Neural networks implementation for a vessel track control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 665–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-665-678.

5. Haykin, Simon. *Neural Networks and Learning Machines.* Third Edition. New Jersey: Pearson, 2009.

6. Liu, Zeyu, Yantao Yang, and Qingdong Cai. "Neural network as a function approximator and its application in solving differential equations." *Applied Mathematics and Mechanics* 40.2 (2019): 237–248. DOI: 10.1007/s10483-019-2429-8.

7. Deryabin, V. V. "Review of researches of neural network technologies implementation in navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(34) (2015): 29–43. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-29-43.

8. Podporin, S.A. "Ispolzovanie neyro-nechetkih kontrollerov v sistemah upravlenia dvizheniem morskih sudov." *Sbornik naukovyh prac Harkivskogo universitety Povitryannyh Sil* 4(33) (2012): 181–187.

9. Kula, Krzysztof S. "Model-based controller for ship track-keeping using Neural Network." *2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics (CYBCONF).* IEEE, 2015. 178–183. DOI: 10.1109/CYBConf.2015.7175928.

10. Hornik, Kurt. "Some new results on neural network approximation." *Neural Networks* 6.8 (1993): 1069–1072. DOI: 10.1016/S0893-6080(09)80018-X.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2019 г.
Received: December 8, 2019.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-436-449

DECISION SUPPORT FOR MARINE TRAFFIC CONTROL BASED ON ROUTE CLUSTERING

V. M. Grinyak[123], A. S. Devyatisilnyi[2], Yu. S. Ivanenko[3]

[1] — Vladivostok State University of Economics and Service,
Vladivostok, Russian Federation
[2] — Institute of Automation and Control Processes FEBRAS,
Vladivostok, Russian Federation
[3] — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

This paper is about navigation safety of marine traffic at sea areas. In addition to traditional approach of danger situation detection based on vessels approaching, the current paper introduces another metrics derived from kinematic parameters of the vessel itself, to identify whether it follows patterns (rules) of the traffic at a certain sea area. Authors focused their efforts on analyzing existing traffic schemas in order to identify its danger level in general rather than scrutinizing on individual cases.Along with the traditional approach of sea traffic schema identifications, proposed original method of automated identification of sea traffic schemes based on clustering of movement parameters using historical AIS data. The kinematic model with additional clustering of the objects at sea area is used. Clustering is built up on identification of "typical" objects with splitting maritime area into subsets of arias with similar movement patterns. For the clustering decomposition Mountain clustering and Subtraction clustering algorithms were considered. The model under research is built depending on the heading parameter and is applicable for both unidirectional and bidirectional traffic. The historical AIS data of sea traffic at Tsugaru strait is used for identifying traffic schema with the model designed under presented research.

The proposed model shows correct identification of the traffic schema, accurately identifies straight-line traffic clustering areas crossing likes traffic clustering areas and active maneuvering areas. Based on model output results, the algorithm is proposed to help with navigation decision making for safe ship traffic in certain sea areas. The calculation of deviation between identified clusters and real ship traffic shows that about 15% of the vessels are not following sea area specific traffic schema.As a part of the work there are analyses of relevant research with emphasizes on superior differences such as automated identification of vessel movement types and quantitative measure of overall danger for the traffic scheme based on clustering analyses.

Study of proposed approach for safety measures on real navigation area proves its potential for future implementation in real applications to provide navigation schema for vessel navigators.

Keywords: navigation safety, route planning, ship track system, clustering, AIS.

For citation:
Grinyak, Victor M., Alexander S. Devyatisilnyi, and Yuryi S. Ivanenko. "Decision support for marine traffic control based on route clustering." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 436–449. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-436-449.

УДК 519.68:15:681.5

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИЙ

В. М. Гриняк[123], А. С. Девятисильный[2], Ю. С. Иваненко[3]

[1] — Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
Владивосток, Российская Федерация
[2] — Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток, Российская Федерация
[3] — Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация

Проанализирована проблема обеспечения безопасности движения судов на морских акваториях. Отмечается, что в условиях интенсивного трафика безопасность движения судов может быть обеспе-

чена только при соблюдении ими определенной схемы движения. В работе ставится задача определения схем движения судов на основе кластеризации ретроспективных данных о траекториях. Таким образом, выделяются устоявшиеся, выработанные эксплуатационной практикой паттерны движения конкретной морской акватории. Данная информация может быть использована при управлении движением судов бортовыми и береговыми средствами в дополнение к классическим методам оценки риска, предупреждения опасного сближения и планирования безопасной траектории. Несмотря на то, что нарушающие правила движения на акватории суда, с точки зрения классических концепций, могут не представлять опасности, но через некоторое время они способны создать трудноразрешимую опасную навигационную ситуацию.

Признаками объектов выбраны координаты, скорости и курсы. Отмечается, что для рассматриваемой задачи подходят методы кластеризации, ориентированные на поиск центров кластеров при неизвестном их числе. Это дает возможность определять характерные значения курсов и скоростей на том или ином участке акватории и оценивать близость параметров движения судна к рекомендуемым. Подробно рассмотрены методы горной и субтрактивной кластеризации, сделан выбор в пользу последнего. Предлагается декомпозиция исходной задачи: акватория разбивается на небольшие участки, и кластеризация осуществляется для каждого из участков в отдельности, исходя из того, что признаками объектов являются только скорости и курсы — по отдельности или одновременно. Решение описанной задачи кластеризации возможно с использованием данных, предоставляемых сервисами автоматической идентификационной системы (АИС), как актуальных, так и ретроспективных, доступных в открытых интернет-ресурсах.

Работа сопровождается результатами расчетов, полученных на основе реальных данных о движении судов в Сангарском проливе. Предлагается алгоритм поддержки принятия решений при обеспечении безопасности движения судов с учетом решения обсуждаемой задачи. Дана оценка соответствия параметров реального движения судов результатам кластеризации. Так, в Сангарском проливе число судов, хотя бы раз «нарушивших» правила движения по акватории составило около 15 %, что подтверждает актуальность исследования. Отмечается, что рассмотренный подход к кластерному анализу является также способом количественной оценки опасности схемы движения на акватории.

Ключевые слова: безопасность судовождения, планирование маршрута, система установления путей движения судов, кластеризация, АИС.

Для цитирования:
Гриняк В. М. Поддержка принятия решений при обеспечении безопасности движения судов на основе кластеризации траекторий / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, Ю. С. Иваненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 436–449. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-436-449.

Введение (Introduction)

Обеспечение навигационной безопасности движения является основной проблемой, решаемой в процессе эксплуатации морских судов. Классические отраслевые представления о безопасном движении включают три задачи, решаемые судоводителями и операторами береговых служб: оценку риска опасного сближения, предупреждение опасного сближения и планирование траектории безопасного движения [1]. Первая задача состоит в заблаговременном обнаружении возможности опасного сближения и предупреждении судоводителя о том, что существует риск столкновения с препятствием или сближения с ним на недопустимо малое расстояние [2], [3]. Вторая задача связана с маневрированием для ухода судна от опасного сближения, выработкой алгоритма действий судоводителя, позволяющих избежать опасного сближения с другими объектами [4]–[6]. Третья задача направлена на прогноз навигационной ситуации на основе текущей обстановки и расчтт планируемой траектории судна таким образом, чтобы обеспечить его движение на безопасной от других объектов дистанции [7]–[9].

В последние годы наблюдается постоянный рост интенсивности трафика в акваториях морских портов и на подходах к ним. Так, в акваториях, прилегающих к крупным портам Азии, может одновременно находиться до 3,5 тыс. судов, движение которых имеет характер разнонаправленных интенсивных судопотоков [10]. Ситуацию усложняет систематическое присутствие на акватории нетрадиционных транспортных средств, требующих особого внимания: буксируемых к месту назначения буровых платформ, судов военного и специального назначения, а в перспективе высокоскоростных и высокоманевренных судов типа экранопланов и беспилотных морских транспортных средств с их особой правовой и навигационной спецификой [11]–[13]. В таких

условиях для эффективного управления коллективным движением судов недостаточно традиционных подходов. Данное обстоятельство требует разработки новых методов и модельных представлений поддержки принятия решений, обеспечивающих работу бортовых и береговых систем управления движением.

Одним из элементов организации коллективного движения на море является система установления путей движения судов [14], [15], представляющая собой набор ограничений, накладываемых определенной схемой движения судов («правилами движения»), принятой на конкретной акватории. Задача выработки таких схем движения окончательно сформировалась в середине 50-х гг. XX в. [16]–[18], когда на гражданском флоте была массово внедрена радиолокационная техника, дающая возможность достаточно точного определения местоположения судна. Целью системы установления путей движения судов является исключение неопределенностей или возможностей принятия ошибочных решений судоводителями. Оценка соблюдения требований системы установления путей («правил движения») способна дополнить традиционные инструменты обеспечения безопасности в условиях интенсивного движения. Суда, нарушающие правила движения на акватории, с точки зрения классических представлений могут не представлять опасности в настоящий момент, однако они способны привести к трудноразрешимой опасной навигационной ситуации через некоторое время.

Определение схем движения может осуществляться как экспертным способом: с учетом географии акватории, особенностей трафика и различных практических аспектов судовождения, так и на основе наблюдений: путем выделения устоявшихся, выработанных эксплуатационной практикой паттернов движения конкретной морской акватории. Перспективным способом реализации последнего подхода является анализ ретроспективных данных о трафике морских акваторий. В основе модельных представлений этой задачи может быть использована идея кластеризации параметров движения.

Целью настоящей статьи является оценка возможности определения схем движения судов предлагаемым способом, а также использования их для обеспечения безопасности движения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Движение реального судна представляет собой многоаспектное и сложное явление. В задачах обеспечения навигационной безопасности движения судов традиционно прибегают к упрощенным кинематическим моделям, где основными параметрами являются координаты, курс и скорость движения [1], [19].

Коллективное движение судов, как правило, характеризуется типичными (рекомендуемыми и / или реализуемыми) значениями курса и скорости на тех или иных участках акватории [20], [21]. Например, на участках фарватеров, характерных для проливов или мелководья, суда идут строго определенными курсами, соблюдая скоростной режим. В районах якорных стоянок значения курсов разнообразны и велика доля покоящихся судов. В районах рыбного промысла движение судов нерегулярно и хаотично. Таким образом, имеет место корреляция координат судна с курсом и скоростью. С точки зрения задачи описания схемы движения на акватории для задания зависимости скоростей, курсов и координат удобно использовать модельные представления кластеризации [22].

В основу идеи кластеризации положено выделение подмножеств объектов (кластеров), близких друг к другу по своим характеристикам. Существует два типа кластеров: кластеры — области связности и кластеры-«сгустки». В первом случае выделяются подмножества объектов, «похожих» друг на друга и существенно отличающихся от остальных объектов множества, во втором — объекты с «самыми типичными» характеристиками, принимаемые за центры кластеров. Остальные объекты относят к соответствующим подмножествам, если они «похожи» на выделенные центры. В обоих случаях задача кластеризации решается на определенной метрике — функции, задающей степень близости («расстояние») между объектами [23]–[25].

В известной работе [10] описана задача кластеризации траекторий первого типа. Признаками объектов при кластеризации являлись координаты судов. При нахождении областей связ-

ности были выделены основные траектории движения судов в районе интенсивного судоходства. Это позволило определять аномально движущиеся суда, путь которых не являлся характерным для данной акватории, что представляло интерес, например, для правоохранительных органов. С точки зрения задач навигационной безопасности целесообразной является кластеризация траекторий второго типа, поскольку она дает возможность определять характерные значения курсов и скоростей на том или ином участке акватории и оценивать близость параметров движения судна к рекомендуемым.

Центральным элементом задачи кластеризации является определение метрики расстояния между объектами. Пусть каждое судно характеризуется величинами *LON*, *LAT*, *SPEED*, *COURSE* — соответственно долгота, широта, скорость и курс. Введем метрику расстояния D_{12} между объектами 1 и 2 следующим образом:

$$D_{12}^2 = w_{lon}(LON_1 - LON_2)^2 + w_{lat}(LAT_1 - LAT_2)^2 +$$
$$+w_{speed}(SPEED_1 - SPEED_2)^2 + w_{course}(COURSE_1 - COURSE_2)^2.$$

Подбор весовых коэффициентов w_{lon}, w_{lat}, w_{speed}, w_{course} осуществляется исходя из представлений о характерных размерах кластеров по каждому из измерений. Так, например, по курсу характерные размеры кластера могут составлять 5–10 град., а по скорости 2–3 м/с. Функция разности курсов $COURSE_1 - COURSE_2$ доопределяется с учетом периодичности данных по углу. Что касается характерных размеров по координатам, то их определение является нетривиальной задачей. На акватории могут встречаться как участки длительного равномерного движения судов в несколько десятков километров, так и участки маневренного движения (поворота) размером в несколько сотен метров. Поэтому для некоторых приложений целесообразно прибегнуть к декомпозиции исходной задачи, т. е. разбить акваторию на небольшие (например, квадратные) участки размером от сотен метров до нескольких километров и осуществлять кластеризацию для каждого из участков отдельно, считая, что признаками объектов являются только скорости и курсы по отдельности (одномерная кластеризация) или одновременно (двумерная кластеризация). Такое модельное представление вполне соотносится с практической отраслевой спецификой задачи.

Для решения задачи кластеризации второго типа хорошо зарекомендовали себя алгоритмы горной и субтрактивной кластеризации, не требующие задания количества кластеров. Первый из них состоит в следующем. Пусть имеются множество из M объектов и матрица расстояний D_{ij}, задающая степень близости между объектами с индексами i и j. Примем, что возможными центрами кластеров являются сами объекты. Для каждого из них рассчитывается значение потенциала, показывающего возможность формирования кластера в его окрестности:

$$P_i = \sum_{j=1}^{M} \exp(-\alpha D_{ij}),$$

где α — число, характеризующее масштаб расстояний D_{ij}; exp( ) — оператор экспоненты.

На первом шаге алгоритма рассчитывают потенциал P_i каждого объекта и выбирают объект с наибольшим потенциалом. Этот объект (пусть его индекс равен $\max_1$) считают центром первого кластера. На втором шаге пересчитывают значения потенциалов всех объектов так, чтобы исключить влияние потенциала уже найденного кластера: от текущих значений потенциала P_i вычитают вклад центра найденного первого кластера по формуле

$$P_i^{(2)} = P_i - P_{\max_1} \exp(-\beta D_{i\max_1}),$$

где β — число, характеризующее размер кластеров.

Центр второго кластера — точка с индексом $\max_2$ с максимальным значением потенциала $P_i^{(2)}$. Аналогично находятся центры всех следующих кластеров. Итерационная процедура пересчета потенциалов и выделения центров кластеров продолжается до тех пор, пока максимальное значение потенциала превышает некоторый заданный порог. Принадлежность точки к тому или иному кластеру определяется по расстоянию до его центра.

Метод субтрактивной кластеризации является модификацией горного алгоритма. После нахождения центра первого кластера из множества объектов исключаются объекты, принадлежащие

первому кластеру, затем процедура итеративно повторяется до тех пор, пока максимальное значение потенциала превышает заданный порог.

В рассматриваемой задаче имеется специфическая особенность данных по курсу судна: возможно задание курса как на множестве [0, 360°), так и на множестве [0, 180°). В первом случае различаются суда, движущиеся по фарватеру как «вперед», так и «назад»; такой способ подходит для моделирования «двустороннего» движения. Во втором случае суда, движущиеся в противоположных направлениях, неразличимы. Такое представление целесообразно, когда важно описать зоны пересечения судопотоков.

Решение описанной задачи кластеризации возможно с использованием данных, предоставляемых сервисами автоматической идентификационной системы (АИС), как актуальных, так и ретроспективных, доступных в открытых интернет-ресурсах типа [26]. На рис. 1 показан пример визуализации таких данных — участок акватории Сангарского пролива в зоне пересечения судопотоков с координатами и курсами судов, находившихся на нем в течение суток. На рисунке хорошо видны преобладающие курсы судов: движение в направлениях «север-юг» (красные кружки-стрелки) и «запад-восток» (синие кружки-стрелки), что подтверждает конструктивность модельных представлений, основанных на идее кластеризации.

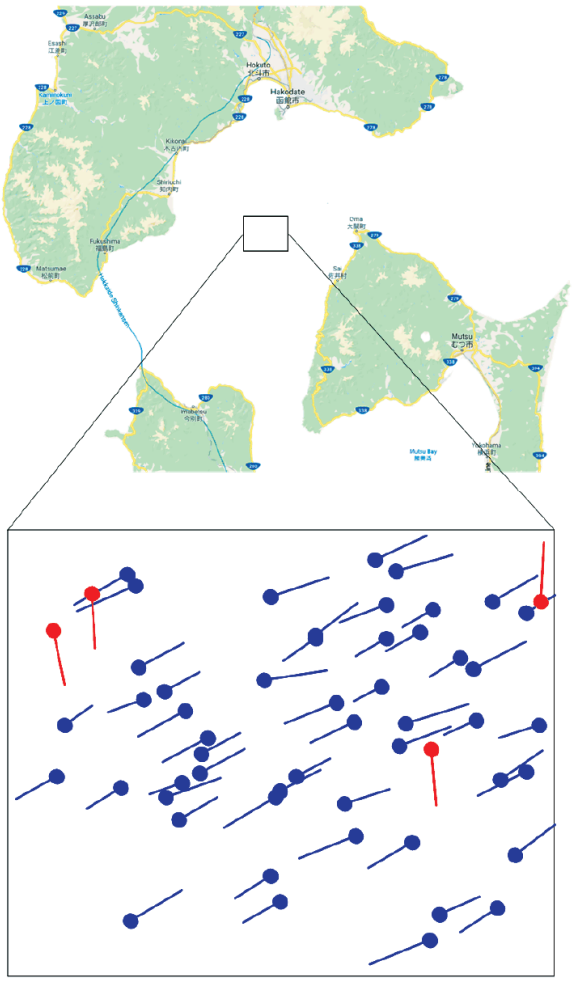


Рис. 1. Координаты, скорости и курсы судов в Сангарском проливе

Результаты (Results)

Исследование проводилось на реальных данных о движении судов в Сангарском проливе, собранных с ресурса [26] с помощью специально разработанной программной системы [27], [28]. Были взяты данные о движении в течение одной недели, всего около 1,5 млн записей. Акватория,

показанная на рис. 1, разбивалась на квадратные участки со стороной 1 км. Кластеризация выполнялась для каждого из участков, где число данных было больше двадцати. Признаками объектов считались курсы.

Метрика расстояния между объектами с индексами i и j задавалась как $D_{ij} = \sqrt{(COURSE_i - COURSE_j)^2}$, разность курсов доопределялась с учетом периодичности значений угла. Курсы задавались на множестве [0, 180°). Количество значений курсов на некоторых участках достигало двухсот.

Использовался *метод субтрактивной кластеризации*. Значения параметров метода подбирались таким образом, чтобы корректно идентифицировать кластеры эталонной выборки. В качестве одной из таких выборок использовались данные, показанные на рис. 1. В результате значение параметра α было выбрано соответствующим характерному радиусу кластера 16°; объекты считались принадлежащими кластеру, если они лежали ближе, чем в 20° от его центра (обычно значение этого параметра равно 1,25α). Итерационная процедура поиска центров кластеров заканчивалась, если потенциал очередного кластера не превышал 10 % потенциала первого кластера, оставшиеся кластеры считались незначимыми.

На рис. 2 показаны данные о количестве найденных кластеров: голубым цветом отмечены участки акватории, где курсы судов образуют один кластер, зеленым — два, желтым — три, красным — четыре. Участков с большим числом кластеров найдено не было. Показаны зоны регулярного движения судов с постоянными курсами — голубые участки, зеленые участки — это области пересечения двух судопотоков, желтые и красные — зоны пересечения нескольких судопотоков и зоны нерегулярного хаотичного движения в районе, прилегающем к порту Хакодате.

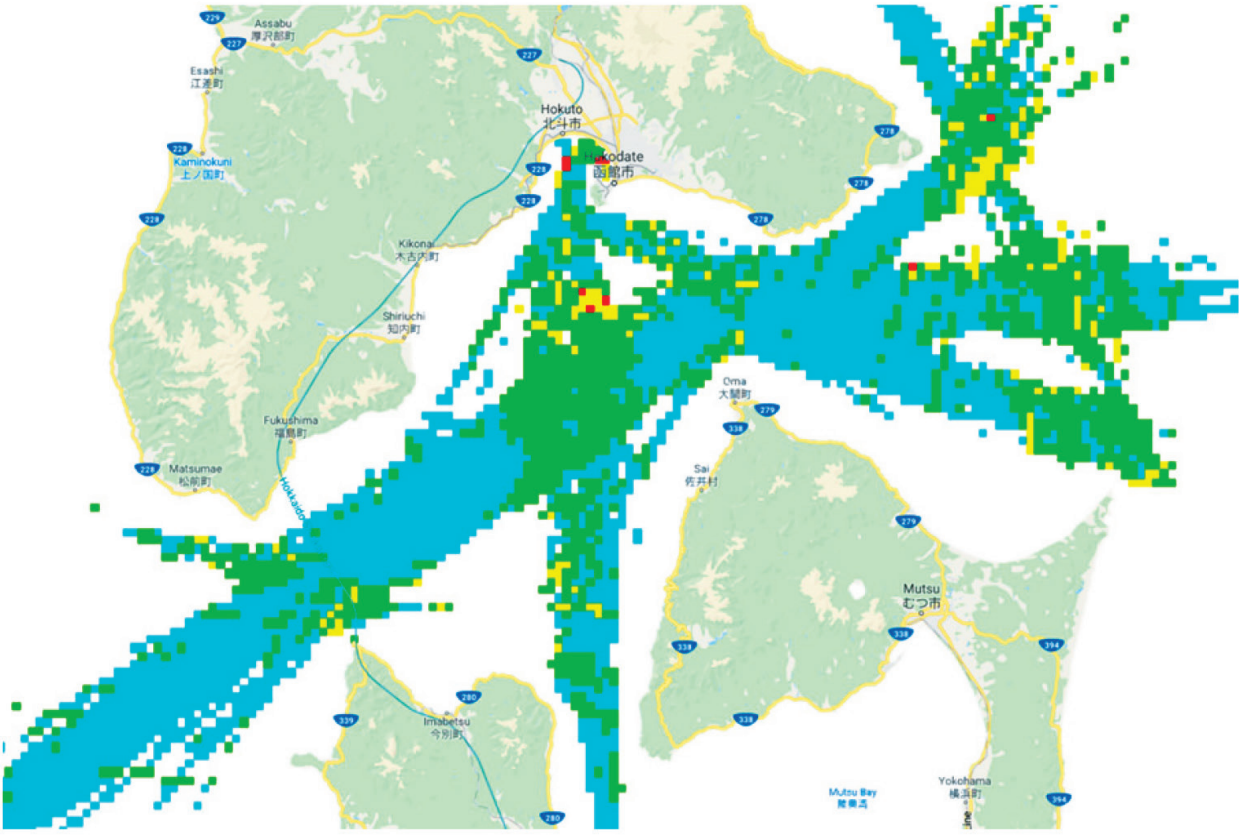


Рис. 2. Количество кластеров в данных о курсах судов

На рис. 3 линиями показаны курсы, соответствующие этапу 1 (синие линии) и этапу 2 (зеленые линии) кластеризации. Видно, что найденные значения курсов полностью соответствуют направлению движения реальных судопотоков.

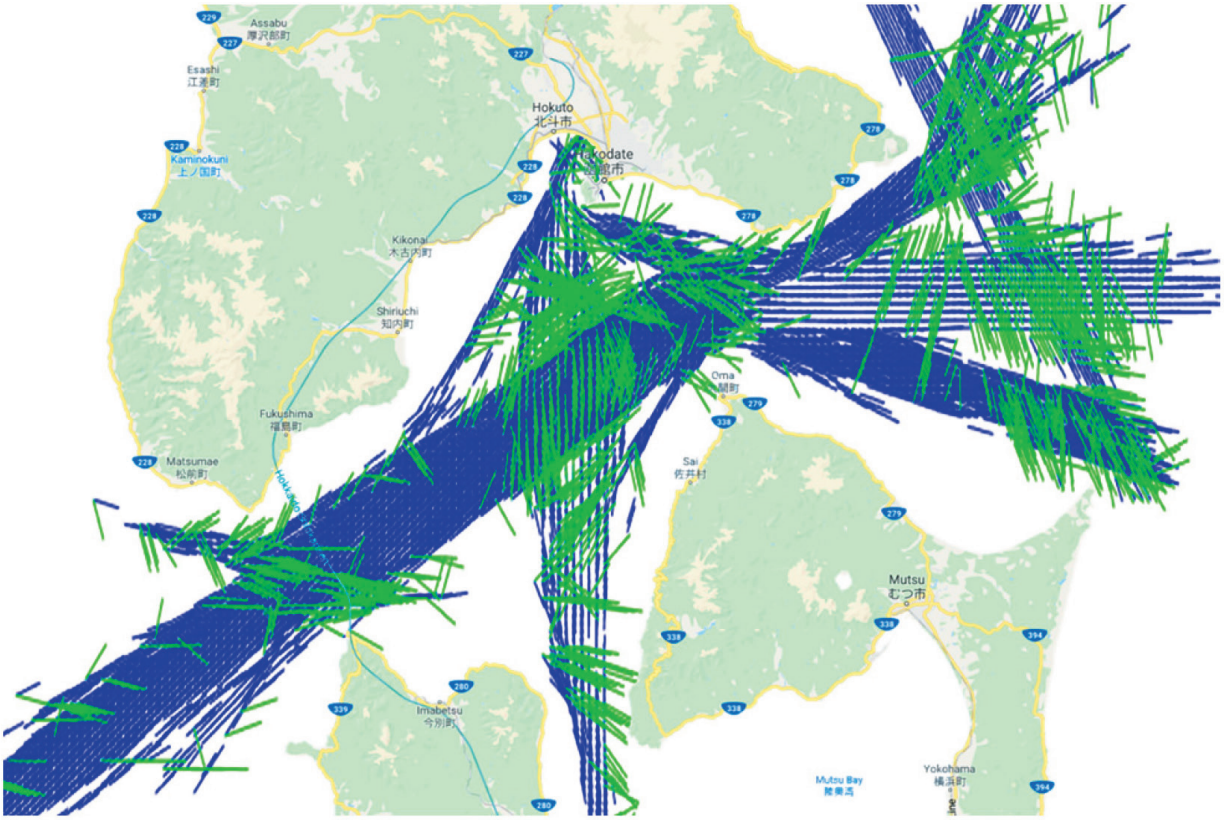


Рис. 3. Центры первого (синие участки)
и второго (зеленые участки) кластеров в данных о курсах судов

Поддержка принятия решений при обеспечении безопасности движения судов с учетом реализации обсуждаемой задачи оценки схем движения судов осуществляется в приведенной последовательности.

1. На основе ретроспективных данных о движении судов и рассмотренного алгоритма кластеризации выполняется оценка характерных значений курсов и / или скоростей судов на тех или иных участках выбранной акватории.

2. По результатам кластеризации на этапе 1 акватория делится на участки с регулируемым (там, где выделены характерные значения курсов и / или скоростей) и нерегулируемым движением и формируется соответствующая база данных.

3. Для каждого судна, находящегося на наблюдаемой акватории, решается задача оценки риска опасного сближения с другими судами. Если такое опасное сближение возможно, то решается задача предупреждения опасного сближения. При этом имеются в виду ограничения, обусловленные результатами кластеризации на этапах 1 и 2.

4. Для каждого судна, находящегося на участках с регулируемым движением, решается задача оценки соответствия параметров движения результатам кластеризации на этапе 1. Если судно выполняет движение не по правилам, то решается задача планирования траектории безопасного движения с учетом ограничений, обусловленных результатами кластеризации на этапах 1 и 2.

На рис. 4 показана оценка соответствия параметров реального движения судов результатам кластеризации. Считая, что возможные курсы судов заданы в соответствии с данными рис. 3, а отклонение от рекомендованного курса не должно превышать принятый размер кластера (20°), было проанализировано движение судов в течение одних суток, следующих за периодом исходных данных о движении. Серым цветом показана область акватории, где курсы судов считаются установленными, — это зона, где задана и контролируется схема движения судов. Красным цветом показаны точки, где было зафиксировано движение судов по курсам, не соответствующим

установленным. Число таких судов, хотя бы раз нарушивших правила движения по акватории, составило около 15 %, что подтверждает актуальность рассматриваемой задачи.

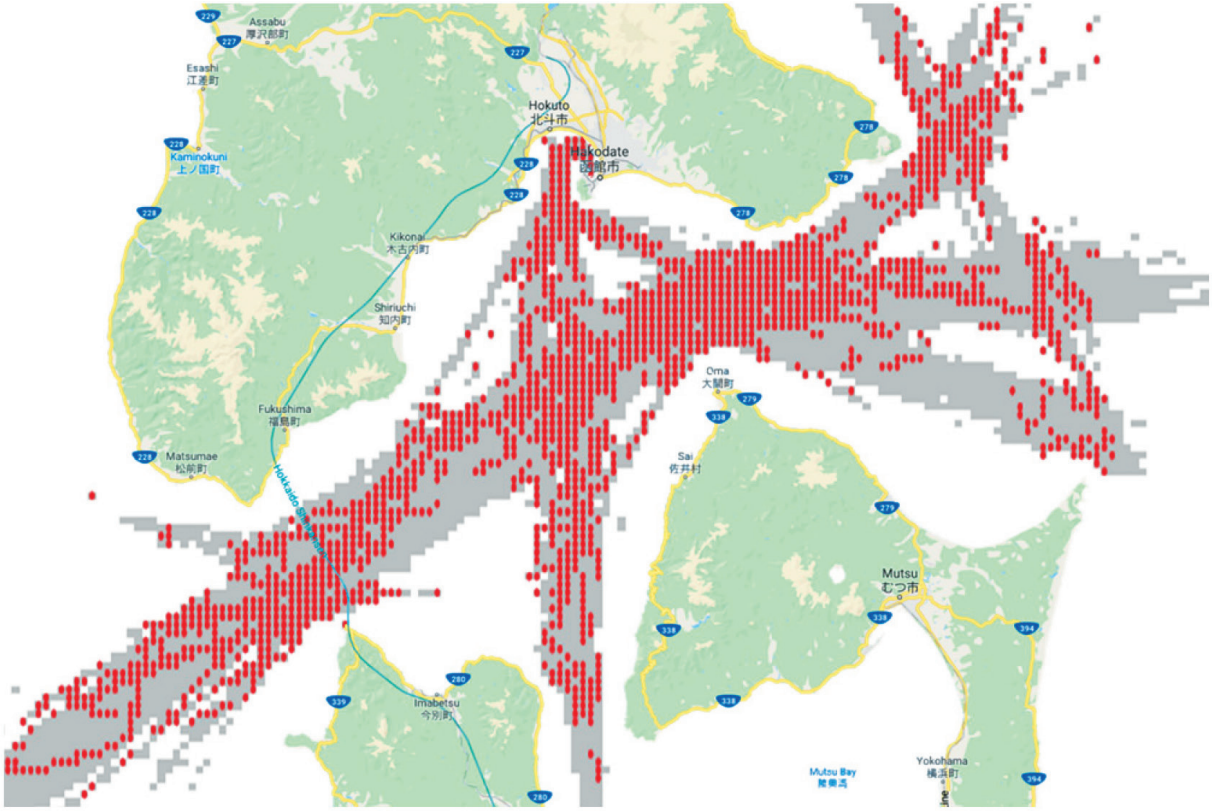


Рис. 4. Область с установленными курсами судов (серый цвет) и точки «нарушения» правил движения (красный цвет)

Кроме того, следует отметить, что в приведенном на рис. 2–4 примере кластеризация проводилась только по курсам в силу особенностей имеющихся данных: движение в Сангарском проливе характеризуется стабильностью скоростей судов. Несмотря на то, что результат кластеризации уже оказывается достаточно репрезентативным, по данным о движении судов в течение одной недели, для качественного решения задачи в реально эксплуатируемых системах следует увеличить объем выборки.

Обсуждение (Discussion)

В последнее десятилетие отмечается повышенное внимание исследователей к задачам анализа данных о движении на акваториях. Заслуживает внимания работа [29], в которой предложена экспертная система оценки степени опасности движения судов в ограниченных водах, основанная на вероятностных модельных представлениях. В этой работе предложена пятиуровневая шкала оценки степени опасности в задаче «судно–судно», приведены данные исследований в акватории порта Сингапур, причем типы опасных ситуаций заданы априорно, в отличие от настоящей работы, где характерные типы движения идентифицируются на основе ретроспективных данных.

С развитием технологий и сервисов АИС концепции е-Навигации [30] и технологий «облачных вычислений» у исследователей появилась возможность работать с большими массивами данных о реальном движении судов. В этой области можно выделить статью [31], в которой описаны данные, доступные через систему АИС, исследуются статистические характеристики траекторных данных о движении судов близ берегов Португалии, предлагается вероятностная модель оценки риска опасного сближения судов и дается оценка количества опасных ситуаций в рассматриваемом регионе. На основе анализа массивов данных о движении выделяются характерные навигационные

ситуации «судно-судно». В этой части исследование [31] идентично проведенному отечественными авторами в работе [32], где выполнен анализ системы экспертных представлений о коллективном движении судов на основе его разделения на базисные информационные конструкции, обладающие общностью и репрезентативностью характеристик; описаны паттерны опасных ситуаций различного типа (для двух, трех и караванов судов). Однако, в отличие от работы [31], в статье [32] навигационные ситуации определяются априорно, исходя из классических геометрических соображений. В работе [33] выполнен анализ данных о движении судов в акватории порта Сингапур. На основе классической модели корабельного домена и оценки точки кратчайшего сближения судов оценивается количество опасных сближений судов различных классов на тех или иных участках акватории, выделяются наиболее сложные для движения участки. При этом для оценки опасности используется относительная шкала, не позволяющая оценить необходимость и возможные варианты изменения существующей схемы движения судов. Даны лишь рекомендации относительно того, каким образом пассажирским судам следует избегать отмеченные участки. Схожий подход используется также в работе [34].

В отличие от всех приведенных ранее работ, в настоящей статье рассмотрен способ количественной оценки опасности схемы движения на акватории путем кластерного анализа, раскрывающий еще одну сторону комплексного и многозначного понятия «безопасность движения». Участки акваторий со стабильными параметрами траекторий потенциально менее опасны. Данные, представленные на рис. 2, демонстрируют вариант оценки стабильности параметров движения на том или ином участке акватории. При этом важно учитывать число выявленных кластеров параметров движения, их «ширину», «разброс» величин относительно центров кластеров. Так, если выявлено 1–2 «узких» кластера по курсу, то это свидетельствует о регулярном, стабильном судопотоке на участке, большее их количество сигнализирует о разнонаправленных пересекающихся судопотоках или нерегулярном движении. Например, данные рис. 2 свидетельствуют о том, что в акватории Сангарского пролива движение судов в основном безопасно, повышенное внимание требуется лишь при движении в области пересечения судопотоков в центре пролива и у его западного входа.

Выводы (Conclusion)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе обоснован дополняющий классические представления подход к оценке безопасности движения судна — необходимость оценки не только актуального риска опасного сближения с другими судами, но и соответствия кинематических параметров движения допустимым значениям для данной точки акватории («правилам движения»). Это множество допустимых значений предлагается определять с помощью кластеризации данных о движении судов, включающих в себя географические координаты, скорость и курс судна, т. е. путем кластеризации оценивать параметры схемы движения на акватории.

2. При решении задачи целесообразно прибегнуть к декомпозиции: разбить акваторию на небольшие участки (от сотен метров до нескольких километров) и осуществлять кластеризацию для каждого из участков отдельно, считая при этом, что признаками объектов являются скорости и курсы по отдельности (одномерная кластеризация) или одновременно (двумерная кластеризация).

3. Перспективными методами кластеризации в рассматриваемой задаче являются алгоритмы, ориентированные на поиск центров кластеров без предварительного задания их количества (например, горный и субтрактивный).

4. Источником данных для оценки параметров схемы движения на акватории могут служить сервисы АИС. В работе показана возможность использования не только первичных данных АИС, но и их вариантов, доступных на специализированных интернет-ресурсах. Несмотря на некоторую «разреженность» этой версии данных, они достаточно адекватно представляют сводные особенности трафика.

5. Для кластеризации параметров траекторий необходимы данные о движении судов в течение нескольких суток. Так, для формирования рис. 2–4 были обработаны массивы из 1,5 млн записей. Для высоконагруженных акваторий характерны объемы данных до 50 млн записей в течение недели. Решение задачи в таких районах требует разработки специальных программных систем и алгоритмов на основе технологий суперкомпьютеров и больших данных.

6. Исследования рассмотренного подхода к оценке безопасности на основе реальных данных о движении подтвердили его перспективность. Использование этого подхода позволяет получить информацию о сформировавшейся схеме движения судов на выбранной акватории и осуществлять поддержку принятия решений при обеспечении безопасности бортовыми и береговыми системами управления движением.

Благодарности

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект 18-07-00132.

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-07-00132

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tam Ch. K.* Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / Ch. K. Tam, R. Bucknall, A. Greig // The Journal of Navigation. — 2009. – Vol. 62. — Is. 3. — Pp. 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.

2. *Васьков А. С.* Способы представления зоны навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, М. А. Гаращенко // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 3 (84). — С. 38–44.

3. *Szlapczynski R.* A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions / R. Szlapczynski, J. Szlapczynska // The Journal of Navigation. — 2015. — Vol. 68. — Is. 06. — Pp. 1041–1055. DOI: 10.1017/S0373463315000296.

4. *Бурмака И. А.* Использование областей опасных курсов и опасных скоростей для выбора маневра расхождения / И. А. Бурмака, С. С. Пасечнюк, М. А. Кулаков // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 2 (83). — С. 76–81.

5. *Астреин В. В.* Базовая модель распределенной системы предупреждения столкновений судов / В. В. Астреин, А. Л. Боран-Кешишьян // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2016. — № 1 (14). — С. 19–23.

6. *Дмитриев С. П.* Система интеллектуальной поддержки судоводителя при расхождении судов / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов, Г. Н. Романычева // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2003. — № 2. — С. 98–105.

7. *Вишневецкий С. А.* Использование метода полей потенциалов для локального планировщика маршрута судна / С. А. Вишневецкий // Эксплуатация морского транспорта. — 2016. — № 3 (80). — С. 37–43.

8. *Lebkowski A.* Intelligent ship control system / A. Lebkowski, R. Smierzchalski, W. Gierusz, K. Dziedzicki // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation-TransNav. — 2008. — Vol. 2. — No. 1. — Pp. 63–68.

9. *Lazarowska A.* Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony otimisation / A. Lazarowska // The Journal of Navigation. — 2015. — Vol. 68. — Is. 2. — Pp. 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.

10. *Zhao L.* Maritime Anomaly Detection using Density-based Clustering and Recurrent Neural Network / L. Zhao, G. Shi // The Journal of Navigation. — 2019. — Vol. 72. — Is. 4. — Pp. 894–916. DOI: 10.1017/S0373463319000031.

11. *Szłapczyński R.* Framework of an evolutionary multi-objective optimisation method for planning a safe trajectory for a marine autonomous surface ship / R. Szłapczyński, H. Ghaemi // Polish Maritime Research. — 2019. — Vol. 26. — Is. 4. — Pp. 69–79. DOI: 10.2478/pomr-2019-0068.

12. *Каминский В. Ю.* Принципы формирования противоаварийных алгоритмов амфибийных судов на воздушной подушке / В. Ю. Каминский, Д. А. Скороходов, С. Н. Турусов, А. В. Фёдоров // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 4–2 (46). — С. 39–45.

13. *Каретников В. В.* К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории / В. В. Каретников, С. В. Козик, А. А. Буцанец // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.

14. *Лентарёв А. А.* Морские районы систем обеспечения безопасности мореплавания: учеб. пособие / А. А. Лентарёв. — Владивосток: Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского, 2004. — 114 с.

15. *Лентарёв А. А.* Основы теории управления движением судов / А. А. Лентарёв. — Владивосток: Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского, 2018. — 181 с.

16. Общие положения об установлении путей движения судов, № 9036. — Изд. ГУНиО МО СССР, 1987. — 32 с.

17. *Таратынов В. В.* Целесообразность разделения морских путей / В. В. Таратынов // Морской флот. — 1969. — № 9. — С. 19–20.

18. *Таратынов В. П.* Судовождение в стесненных районах / В. П. Таратынов. — М.: Транспорт, 1980. — 128 с.

19. *Васьков А. С.* Сопровождение параметров траектории движения судна / А. С. Васьков, А. А. Грищенко // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 4–3 (46). — С. 77–82.

20. *Гриняк В. М.* Оценка опасности трафика морской акватории по данным Автоматической идентификационной системы / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, В. И. Люлько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 681–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690.

21. *Гриняк В. М.* Оценка эмоциональной нагрузки на судоводителей в условиях коллективного движения / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, А. В. Шуленина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 640–651. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-640-651.

22. *Zhen R.* Maritime anomaly detection within coastal waters based on vessel trajectory clustering and naïve Bayes classifier / R. Zhen, Y. Jin, Q. Hu, Z. Shao, N. Nikitakos // The Journal of Navigation. — 2017. — Vol. 70. — Is. 3. — Pp. 648–670. DOI: 10.1017/S0373463316000850.

23. *Bishop C. M.* Pattern recognition and machine learning / C. M. Bishop. — New York, NY: Springer, 2006. — 738 p.

24. *Bezdek J. C.* Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms / J. C. Bezdek. — Boston: Springer US, 1981. — 272 p.

25. *Yager R. R.* Essentials of fuzzy modeling and control / R. R. Yager, D. P. Filev. — New York: John Wiley & Sons, 1994. — 408 p.

26. MarineTraffic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.marinetraffic.com (дата обращения: 01.03.2020).

27. *Головченко Б. С.* Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории / Б. С. Головченко, В. М. Гриняк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 156–162.

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618729, Российская Федерация. Программа сбора траекторных данных о движении судов из открытых интернет источников / В. М. Гриняк, А. В. Шурыгин; заявитель и патентообладатель ВГУЭС. — № 2018615154; заявл. 22.05.2018; опубл. 19.07.2018.

29. *Debnath A. K.* Navigational traffic conflict technique: a proactive approach to quantitative measurement of collision risks in port waters / A. K. Debnath, H. C. Chin // The Journal of Navigation. — 2010. — Vol. 63. — Is. 1. — Pp. 137–152. DOI: 10.1017/S0373463309990233.

30. *Титов А. В.* Состояние и перспективы реализации технологии е-навигации / А. В. Титов, Л. Баракат, А. Хаизаран // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 621–630. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630.

31. *Silveira P. A. M.* Use of AIS data to characterise marine traffic patterns and ship collision risk off the coast of Portugal / P. A. M. Silveira, A. P. Teixeira, C. G. Soares // The Journal of Navigation. — 2013. — Vol. 66. — Is. 6. — Pp. 879–898. DOI: 10.1017/S0373463313000519.

32. *Дорожко В. М.* Экспертные представления об основных ситуационных моделях коллективного движения судов / В. М. Дорожко, А. Н. Лебедева // Проблемы управления. — 2006. — № 4. — С. 43–49.

33. *Weng J.* Ship collision frequency estimation in port fairways: a case study / J. Weng, S. Xue // The Journal of Navigation. — 2015. — Vol. 68. — Is. 3. — Pp. 602–618. DOI: 10.1017/S0373463314000885.

34. *Debnath A. K.* Modelling collision potentials in port anchorages: application of the navigational traffic conflict technique (NTCT) / A. K. Debnath, H. C. Chin // The Journal of Navigation. — 2016. — Vol. 69. — Is. 1. — Pp. 183–196. DOI: 10.1017/S0373463315000521.

REFERENCES

1. Tam, CheeKuang, Richard Bucknall, and Alistair Greig. “Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters.” *The Journal of Navigation* 62.3 (2009): 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.

2. Vaskov, A. S., and M. A. Garashchenko. “The methods for conception of ship’s domain.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(84) (2017): 38–44.

3. Szlapczynski, Rafal, and Joanna Szlapczynska. “A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions.” *The Journal of Navigation* 68.6 (2015): 1041–1055. DOI: 10.1017/S0373463315000296.

4. Burmaka, I., C. Pasechnjuk, and M. Kulakov. “Use of regions of dangerous courses and dangerous speeds for choice of manoeuvre of divergence.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(83) (2017): 76–81.

5. Astrein, V., and A. L. Boran-Keshishyan. “Base model distributed system for preventing collisions.” *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova* 1(14) (2016): 19–23.

6. Dmitriev, S. P., N. V. Kolesov, A. V. Osipov, and G. N. Romanycheva. “System of intelligent support of a ship navigator for collision avoidance.” *Journal of Computer and Systems Sciences International* 42.2 (2003): 256–263.

7. Vishnevetskiy, S. A. “Use of method potential fields for local ship route planning.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(80) (2016): 37–43.

8. Lebkowski, A., R. Smierzchalski, W. Gierusz, and K. Dziedzicki. “Intelligent ship control system.” *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation-TransNav* 2.1 (2008): 63–68.

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

10. Zhao, Liangbin, and Guoyou Shi. “Maritime Anomaly Detection using Density-based Clustering and Recurrent Neural Network.” *The Journal of Navigation* 72.4 (2019): 894–916. DOI: 10.1017/S0373463319000031.

11. Szłapczyński, Rafał, and Hossein Ghaemi. “Framework of an evolutionary multi-objective optimisation method for planning a safe trajectory for a marine autonomous surface ship.” *Polish Maritime Research* 26.4 (2019): 69–79. DOI: 10.2478/pomr-2019-0068.

12. Kaminsky, Valery Yu., Dmitriy A. Skorokhodov, Sergey N. Turusov, and Alexandr V. Fedorov. “Principles of formation of anti-accident algorithms of amphibious hovercrafts.” *Marine Intelligent Technologies* 4-2(46) (2019): 39–45.

13. Karetnikov, Vladimir V., Sergey V. Kozik, and Artem A. Butsanets. “Risks assessment of applying unmanned means of water transport in the water area.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019- 11-6-987-1002.

14. Lentarev, A. A. *Morskiye rayony sistem obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya.* Vladivostok: Morskoy gosudarstvennyi universitet, 2004.

15. Lentarev, A. A. *Osnovy teorii upravleniya dvijeniem sudov.* Vladivostok: Morskoy gosudarstvennyi universitet, 2018.

16. *Obshchiye polozheniya ob ustanovlenii putey dvizheniya sudov*. No 9036. MO SSSR, 1987.

17. Taratynov, V. V. “Tselesoobraznost’ razdeleniya morskikh putei.” *Morskoi flot* 9 (1969): 19–20.

18. Taratynov, V. P. *Sudovozhdeniye v stesnennyh rayonah*. M: Transport, 1980.

19. Vaskov, Anatoly S., and Alexander A. Grischenko. “Support tracking of parameters of the vessels movement.” *Marine Intelligent Technologies* 4-3(46) (2019): 77–82.

20. Grinyak, Victor M., Alexander S. Devyatisilnyi, and Victor I. Lulko. “Use of automatic identification system data for estimation of marine traffic safety.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 681–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690.

21. Grinyak, Victor M., Alexander S. Devyatisilnyi, and Alena V. Shulenina. “Estimation of the emotional load on the navigators under the conditions of heavy traffic.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 640–651. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4- 640-651.

22. Zhen, Rong, Yongxing Jin, Qinyou Hu, Zheping Shao, and Nikitas Nikitakos. “Maritime anomaly detection within coastal waters based on vessel trajectory clustering and naïve Bayes classifier.” *The Journal of Navigation* 70.3 (2017): 648–670. DOI: 10.1017/S0373463316000850.

23. Bishop, Christopher M. *Pattern recognition and machine learning*. New York, NY: Springer, 2006.

24. Bezdek, James C. *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*. Boston: Springer US, 1981.

25. Yager, Ronald R., and Dimitar P. Filev. *Essentials of fuzzy modeling and control.* New York: John Wiley & Sons, 1994.

26. MarineTraffic. Web. 1 March 2020 <http://www.marinetraffic.com>.

27. Golovchenko, B. S., and V. M. Grinyak. “Information system for vessels traffic data capture.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 156–162.

28. Grinyak, V. M., and A. V. Shurygin. RU 2018618729. Programma sbora trajektornyh dannyh o dvijenii sudov. Russian Federation, assignee. Publ. 19 July 2018.

29. Debnath, Ashim Kumar, and Hoong Chor Chin. “Navigational traffic conflict technique: a proactive approach to quantitative measurement of collision risks in port waters.” *The Journal of Navigation* 63.1 (2010): 137–152. DOI: 10.1017/S0373463309990233.

30. Titov, Alexey V., Lama Barakat, and Anas Khaizaran. “Status and perspectives of E-Navigation technology implementation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 621–630. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630.

31. Silveira, P. A. M., A. P. Teixeira, and C. Guedes Soares. “Use of AIS data to characterise marine traffic patterns and ship collision risk off the coast of Portugal.” *The Journal of Navigation* 66.6 (2013): 879–898. DOI: 10.1017/S0373463313000519.

32. Dorozhko, V. M., and A. N. Lebedeva. “Expert judgments about basic situational models of collective movements of ships.” *Problemy Upravleniya* 4 (2006): 43–49.

33. Weng, Jinxian, and Shan Xue. “Ship collision frequency estimation in port fairways: a case study.” *The Journal of Navigation* 68.3 (2015): 602–618. DOI: 10.1017/S0373463314000885.

34. Debnath, Ashim Kumar, and Hoong Chor Chin. “Modelling collision potentials in port anchorages: Application of the navigational traffic conflict technique (ntct).” *The Journal of Navigation* 69.1 (2016): 183–196. DOI: 10.1017/S0373463315000521.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гриняк Виктор Михайлович —
доктор технических наук, профессор
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
690014, Российская Федерация, Владивосток, ул. Гоголя, 41
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, Российская Федерация, Владивосток, ул. Радио, 5
Дальневосточный федеральный университет
690091, Российская Федерация, Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: *victor.grinyak@gmail.com*

Девятисильный Александр Сергеевич —
доктор технических наук,
главный научный сотрудник
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, Российская Федерация, Владивосток, ул. Радио, 5
e-mail: *devyatis@iacp.dvo.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grinyak, Victor M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Vladivostok State University of Economics and Service
41 Gogolya Str., Vladivostok, 690014, Russian Federation
Institute of Automation and Control Processes FEBRAS
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russian Federation
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690091, Russian Federation
e-mail: *victor.grinyak@gmail.com*

Devyatisilnyi, Alexander S. —
Dr. of Technical Sciences,
Chief Researcher
Institute of Automation and Control Processes FEBRAS
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russian Federation
e-mail: *devyatis@iacp.dvo.ru*

Иваненко Юрий Сергеевич —
старший преподаватель
Дальневосточный федеральный университет
690091, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Суханова, 8
e-mail: *ivanenko_yus@dvfu.ru*

Ivanenko, Yuryi S. —
Senior lecturer
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str., Vladivostok,
690091, Russian Federation
e-mail: *ivanenko_yus@dvfu.ru*

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2020 г.
Received: April 3, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-450-458

NAVDAT DIGITAL BROADBAND SYSTEM FOR HIGH-RATE DATA TRANSMISSION FROM COAST STATIONS TO SHIPS

Y. M. Ustinov, A. V. Pripotnyuk, A. P. Gorobtsov

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

The existing narrowband direct data systems NAVTEX and TELEX which send information from shore stations to the ships at a low rate of 50 bps and parcels duration of 20ms are outdated already and do not meet modern requirements of information exchange. It is impossible to raise the rate by shortening a parcel duration due to the multipath effect and deformation defects of a message shape when signal passing through the Earth atmosphere. Deformation defects are resulted in extension of a message in time and superposition on each other.

The KENTA Company (France) has introduced digital wideband system NAVDAT for MSI and security-related information. The system central frequency is 500 kHz with band of 10 kHz. 228 subcarrier frequencies are used. It is shown the dependency of a modulation mode and data transfer rate.

They have refused from frequency modulation to reduce width of the signal spectrum in favor of multiply amplitude-phase encoding. The noise immunity of the system is solved with convolutional encoding which decreases the required signal-to-noise ratio at the receiver input by 6 dB.

NAVDAT stations are deployed off the coast of Europe and Asia. NAVDAT data transfer rate in the presence of real interference increases hundreds of times in comparison with the existing systems. It has been shown necessity to increase signal-to-noise ratio at a signal reception area.

Updated version of NAVDAT system is able to provide better data transmission rate due to some technological decisions: multifrequency signal transmission; multifrequency modulation (QAM) of signal; redundant convolutional coding.

Digital wideband data transmission through updated NAVDAT provides a possibility to replace narrowband data transmission via TELEX.

Keywords: narrowband communication systems, data rate, convolutional encoding, multiply amplitude-phase modulation, RADIOTELEX, NAVTEX, NAVDAT.

For citation:
Ustinov, Yury M., Andrey V. Pripotnyuk, and Alexander P. Gorobtsov. "NAVDAT digital broadband system for high-rate data transmission from coast station to ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 450–458. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-450-458.

УДК 621.396

ЦИФРОВАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ СИСТЕМА NAVDAT СКОРОСТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С БЕРЕГОВЫХ СТАНЦИЙ НА СУДА

Ю. М. Устинов, А. В. Припотнюк, А. П. Горобцов

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

Отмечается, что действующие системы узкополосной передачи данных с береговых станций на суда NAVTEX и TELEX со скоростью 50 бит/с и длительностью посылок 20 мс уже не отвечают современным требованиям передачи информации. Подчеркивается, что увеличить скорость путем сокращения длительности посылок невозможно из-за многолучевости и дисперсных искажений формы посылок при распространении сигналов в атмосфере Земли. В результате искажения формы приводят к растягиванию посылок во времени и наложению их друг на друга. Для увеличения скорости передачи данных на основе использования многочастотных сигналов, современных многократных методов модуляции сигналов и избыточного сверточного кодирования компанией KENTA (Франция) предложена цифровая широкополосная система NAVDAT на центральной частоте 500 кГц в полосе 10 кГц. Данные передаются на 228 поднесущих

частотах. Показана зависимость видов многократной амплитудно-фазовой модуляции и скорости передачи данных. Для сокращения ширины спектра занимаемых частот отказались от частотной модуляции и перешли на многократную амплитудно-фазовую модуляцию. Помехозащищенность системы решается с помощью сверточного кодирования, при котором на 6 дБ уменьшается необходимое соотношение сигнал / шум на входе приемника.

Станции системы NAVDAT развернуты у побережья Европы и Азии. Результаты испытаний NAVDAT показали возможности дальнейшей модернизации действующей системы NAVTEX. Скорость передачи данных при наличии реальных помех в системе NAVDAT, в сравнении с действующими системами, возрастает в сотни раз. Показана необходимость увеличения отношения сигнал – шум в месте приема. В модернизированной системе NAVDAT увеличение скорости передачи данных получено за счет использования многочастотной передачи сигналов, многочастотной амплитудно-фазовой модуляции сигналов и избыточного сверточного кодирования. Широкополосная передача данных в модернизированной системе NAVDAT позволяет в дальнейшем заменить узкополосную передачу данных в системе TELEX.

Ключевые слова: системы узкополосной связи, скорость передачи данных, сверточное кодирование, многократная амплитудно-фазовая модуляция, RADIOTELEX, NAVTEX, NAVDAT.

Для цитирования:
Устинов Ю. М. Цифровая широкополосная система NAVDAT скоростной передачи данных с береговых станций на суда / Ю. М. Устинов, А. В. Припотнюк, А. П. Горобцов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 450–458. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-450-458.

Введение (Introduction)

Передача информации по безопасности мореплавания (ИБМ) является обязательством, которое принимают на себя правительства государств согласно «Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (Конвенция СОЛАС–74)». Правило 4 гл. V этой конвенции определяет, что каждое правительство принимает все меры для безотлагательного доведения надежной информации об опасности на море до сведения всех, кого она касается. Его выполнение опирается не только на сбор навигационной и гидрометеорологической информации, но и техническое обеспечение передачи указанной информации и ее прием на судне. Для этой цели в настоящее время используется так называемый *навигационный телекс NAVTEX* [1], [2] и передача осуществляется через спутники связи INMARSAT в рамках системы SafetyNet. Объем информации в последние годы увеличился, изменились также реальные потребности не только к содержанию, но и к форме представления ИБМ. Требуется обеспечить представление полученных сведений в реальном времени на электронных картах и иных геоинформационных системах в цифровом формате.

В системе NAVTEX [2] ИБМ передается на суда береговыми станциями методом узкополосной частотной телеграфии в режиме работы FEC на частотах 518 и 490 кГц в ПВ-диапазоне и на частоте 4209,5 кГц — в КВ-диапазоне. Скорость передачи данных 50 бит/с, ширина спектра частот 254 Гц, ширина частотного канала 500 Гц. Следует отметить, что такая скорость является слишком низкой для использования в перспективных системах обмена и передачи информации, она не предполагает передачи современных объемов данных, непригодна для передачи графической информации. В работах ряда исследователей систем судовой радиосвязи, являющихся пригодными для использования в работе морских автономных судов, не только выполнена оценка существующих ограничений, но и предлагаются некоторые технические решения [3]–[6].

Увеличение скорости передачи данных в ПВ/КВ-диапазонах при используемых в настоящее время методах формирования узкополосной частотной телеграфии невозможно из-за многолучевости и дисперсионных искажений формы телеграфных посылок при распространении сигналов в ионосфере Земли: телеграфные посылки малой длительности недопустимо растягиваются во времени, наслаиваясь друг на друга. Поэтому требуются иные подходы [6], в том числе рассматриваемые в настоящей статье.

Цель настоящей работы заключается в демонстрации возможности более высокой скорости передачи данных в цифровых системах. Для этого должны быть решены задачи исследования зависимости видов многократной амплитудно-фазовой модуляции и скорости передачи данных

и исследования связи отношения мощности сигнал / шум в месте приема и вероятности ошибочного приема данных в зависимости от используемого метода модуляции. Скорость передачи данных для современных систем связи наряду с помехоустойчивостью и достоверностью являются ключевыми характеристиками при выборе возможных вариантов связи. Береговые станции морской подвижной системы связи для передачи данных на суда в телеграфном режиме RADIOTELEX используют такую же узкополосную частотную телеграфию. Частота 2177 кГц в диапазоне ПВ и множество частот в диапазоне КВ в полосе 4202,5 … 22443,5 кГц выделены для передачи данных с береговых станций на суда.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Компания KENTA (Франция) в 2012 г. для решения задачи увеличения пропускной способности систем передачи ИБМ и перехода на цифровые технологии, пригодные для использования в любой навигационной технике, предложила широкополосную систему NAVDAT [7][1] на несущей частоте 500 кГц в полосе 10 кГц. Предложенная технология увеличения скорости передачи данных и расширения видов передаваемой ИБМ основана на использовании современных многократных методов модуляции, многочастотных сигналов, а также методов избыточного кодирования.

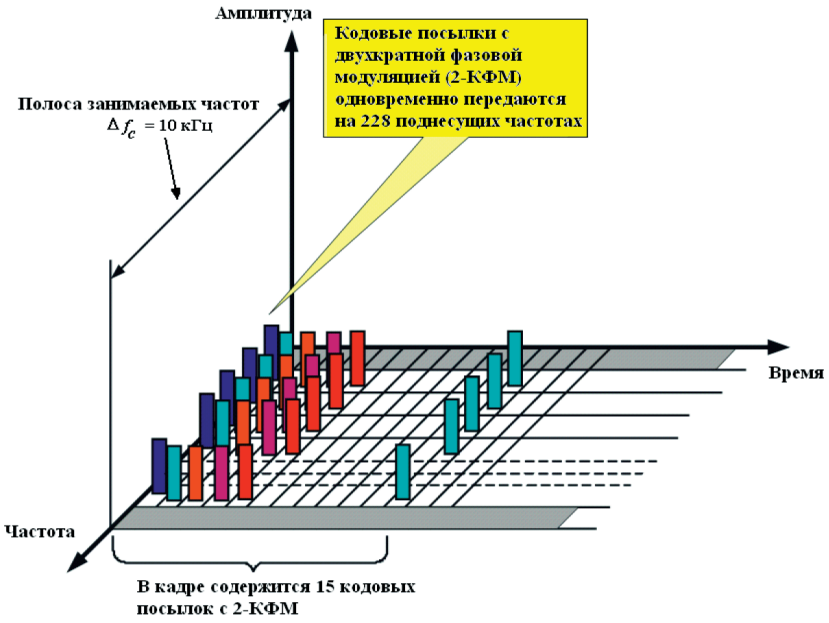


Рис. 1. Передача данных с 2-КФМ
на 228 поднесущих частот многочастотного сигнала

На рис. 1 приведена амплитудно-частотная структура пакета фазокодированных посылок, излучаемых на несущей частоте 500 кГц в полосе 10 кГц (±5 кГц) на 228 ортогональных поднесущих частотах в системе NAVDAT. Длительность кодовой посылки T_n = 26,66 мс, число информационных посылок в кодовом пакете равно 15. Спектры передаваемых сигналов примыкают друг к другу, поэтому полоса 10 кГц полностью используется для передачи данных. Для сокращения ширины спектра отказались от частотной модуляции, перейдя на фазовую модуляцию. Вместо двукратной фазовой модуляции 2-КФМ предлагается четырехкратная (4-КФМ) и многократная амплитудно-фазовая модуляция, позволяющая в несколько раз увеличить скорость передачи данных без увеличения ширины спектра частот. NAVDAT обеспечивает следующие режимы работы: общее вещание (всем судам), избирательное вещание (всем судам в определенном районе или определенной группе судов) и целевое сообщение конкретному судну по MMSI. Во всех трех режимах предусмотрена возможность шифрования конфиденциальной информации.

[1] NAVDAT: Navigational Data. System Presentation. Pascal Olivier. Kenta. JCG GMDSS Symposium 2013.

Помехозащищенность передаваемых данных решается с помощью избыточности сверточного кодирования [8], [9]. При сверточном кодировании с большой вероятностью на приемной стороне убирается один неправильно принятый бит в кадре сигнала. Сверточное кодирование позволяет на 6 дБ уменьшать необходимое соотношение сигнал – шум при заданной вероятности ошибочного приема бит.



Рис. 2. Структура кадра, состоящая из 15 кодовых посылок с относительной фазовой модуляцией

Длина кодового пакета, образующего кадр сигнала, $T_к = 26{,}66 \cdot 15 = 399{,}9 \approx 400$ мс, показана на рис. 2. В каждом кадре передаются два символа, кодированных 7-битовым кодом ASCII. Так как при переходе в месте приема от относительной к фазовой модуляции теряется один бит, в кадре содержится 15 кодовых посылок. На передающей стороне производится разделение массива данных на один или несколько пакетов, которые одновременно передаются на разных несущих частотах.

На приемной стороне принятые на каждой из частот один или несколько пакетов собираются в один файл. Длительность кодовой посылки в системе NAVDAT превышает 20 мс, поэтому искажение формы посылок исключено. Ширина спектра кодовой посылки $\Delta f_п = \frac{1}{T_п} = 37{,}5$ Гц, частотный разнос между поднесущими частотами $\Delta f = \frac{\Delta f_с}{228} = \frac{10000}{228} = 43{,}86$ Гц. Условие ортогональности поднесущих частот выполняется, так как $\Delta f > \Delta f_п$.

При 2-КФМ скорость передачи данных на одной поднесущей частоте $B_1 = \frac{1}{T_п} = \frac{1}{26{,}66 \cdot 10^{-3}} =$ = 37,5 бит/с. Скорость передачи данных на 228 поднесущих частотах $B_{228} = B_1 \cdot 228 = 37{,}5 \cdot 228 =$ = 8550 бит/с.

При использовании 4-КФМ в одной кодовой посылке в системе NAVDAT передается 2 бита данных, поэтому информационная скорость удваивается: $B = 2B_{228} = 17100$ бит/с. При избыточном сверточном кодировании в зависимости от кодовой скорости (0,75 или 0,5) общее число информационных и проверочных бит возрастет в 1,3 или в 2 раза.

Результаты (Results)

В ближайшие годы планируется развернуть ряд наземных станций системы NAVDAT для передачи информации по безопасности мореплавания на суда у побережья Европы (рис. 3) и в странах Азии. Станции NAVDAT являются своеобразным «полигоном» для внедрения

инновационных цифровых технологий в системе передачи данных на суда. В настоящее время продолжаются эксперименты по определению скорости передачи данных и других характеристик системы NAVDAT[1] в странах Азии (Китай, Япония, Сингапур) и Европы (Дания, Франция). В Китае полевые испытания начались в 2016 г. в Шанхае, Жоушае (в 62 милях к югу от Шанхая) на трех судах. Испытания проводятся при разных видах модуляции сигналов: 2-КФМ, 4-КФМ, 8-КАФМ, 16-КАФМ, 32-КАФМ, 64 КАФМ. При использовании 8-КАФМ, 16-КАФМ, 32-КАФМ, 64-КФМ в одной кодовой посылке, соответственно, передаются 3, 4, 5, 6 бит. Например, использование 64 КАФМ при степени коррекции ошибок 0,75 с полосой 10 кГц позволит обеспечить высокую пропускную способность ~28 кбит/с и минимальное для приема соотношение сигнал / шум 22 дБ, тогда как использование 4 КФМ при той же степени коррекции ошибок 0,75 даст более низкую скорость, но большую зону покрытия, в которой минимальное соотношение сигнал / шум уменьшено до 12 дБ.

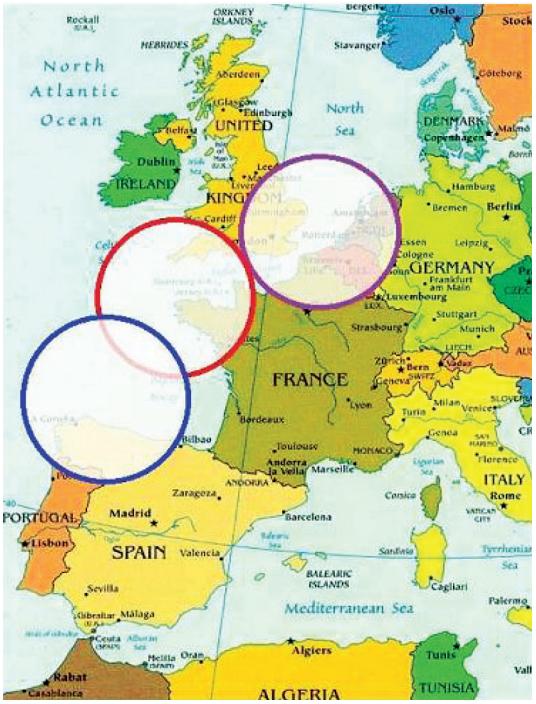


Рис. 3. Наземные станции системы NAVDAT на побережье Европы

На Всемирной конференции по радиосвязи WRC-12 [10] системе NAVDAT была выделена частота 500 кГц с полосой +/–5 кГц. Частоты высокочастотного диапазона для NAVDAT были подтверждены на WRC-19. Частота 4226 кГц будет второй международной частотой NAVDAT.

В диапазоне промежуточных частот (500 кГц) инфраструктура береговой станций будет такой же [11], как и для системы НАВТЕКС: *Т*-образная антенна, согласующее устройство и передатчик 10 кВт или больше пиковой мощности. Судовой приемник способен автоматически определять тип модуляции и включает три независимых приемника: 500 кГц, 4226 кГц и приемник для сканирования и обнаружения национальных вещаний NAVDAT. Судовой приемник NAVDAT оснащен экраном, клавиатурой и имеет возможность подключения к судовому навигационному оборудованию с цифровым входом.

На рис. 4 приведены изображения виды приемного устройства (рис. 4, *а*), передающей антенны (рис. 4, *б* и передающего устройства (рис. 4, *в*) системы NAVDAT. Одна из ключевых задач, стоящих перед разработчиками системы NAVDAT, заключается в необходимости обеспечить покрытие примерно такого же района, какой обеспечивают передатчики системы NAVTEX. Результаты экспериментов 2016 г. показали, что наихудшая ситуация наблюдается в экваториальных

[1] Test measurements of NAVDAT system under real conditions. Submitted by China and France NCSR7/INF.13.

районах [12]. Вместе с тем работы по повышению эффективности системы и устойчивой передаче данных на большие расстояния, идентичные существующим размерам районов приема ИБМ от станций системы NAVTEX, продолжаются.

а) б) в)



Рис. 4. Внешний вид приемного устройства (*а*),
передающей антенны (*б*) и передающего устройства (*в*) системы NAVDAT

На рис. 5 приведена необходимая величина отношения мощности сигнала к мощности шума (помехи) $P_с / P_ш$ в месте приема для получения заданной вероятности ошибочного приема бита $P_{Ош}$ в зависимости от используемого метода модуляции.

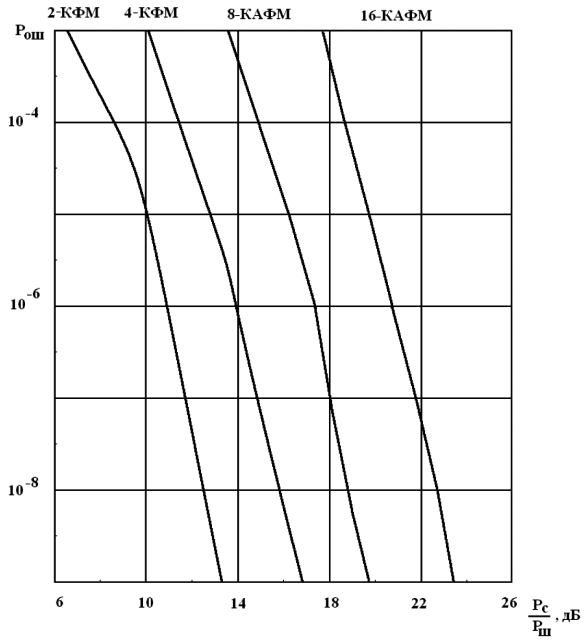


Рис. 5. Вероятность ошибочного приема кодовой посылки $P_{Ош}$
в зависимости от отношения сигнал / шум $P_с / P_ш$
при различных видах модуляции

Зависимость построена при мешающем действии флуктуационного шума. Чем больше данное отношение, тем меньшее влияние оказывает шум на устойчивый и безошибочный прием сигнала. В таблице в качестве возможного решения данной задачи приведены необходимые отношения $P_с / P_ш$ при $P_{Ош} = 10^{-5}$ для методов модуляции 4-КФМ, 16-КАФМ и 64 КАФМ, полученные на основе результатов экспериментальных испытаний системы NAVDAT в Китае [11].

Зависимость отношения сигнал/шум от метода модуляции сигнала

Метод модуляции	Необходимые отношения $P_с / P_ш$, дБ при $P_{Ош} = 10^{-5}$
4-КФМ	6,1
16-КАФМ	12,3
64-КАФМ	19,4

Приведенные в таблице данные меньше по величине на 6 … 8 дБ по сравнению с данными, приведенными на рис. 5. Это объясняется тем, что при проведении испытаний в Китае для повышения помехозащищенности применялось сверточное кодирование со скоростью кода 0,5 и 0,75. Кроме того, характер помех на частоте 100 кГц в значительной степени отличается от флуктуационного шума. В качестве возможного средства снижения требований к уровню помех в обслуживаемом районе предлагается рассмотреть другие виды модуляции (2-КФМ) и уменьшение ширины полосы частот [12].

Обсуждение (Discussion)

Береговые передатчики, созданные на основе технологии системы NAVDAT, при применении 8, 16, 32 и 64-кратной АФМ в перспективе могут заменить передатчики системы TELEX. Модернизируемая система TELEX на базе NAVDAT обеспечит передачу данных в шести частотных диапазонах: 4, 6, 8, 12, 16, 22 МГц. В каждом диапазоне передача данных предлагается производить на одной центральной частоте с полосой занимаемых частот 10 кГц. Центральными частотами рассматриваются следующие: 4226; 6337,5; 8443; 16663,5; 16909,5; 22450,5 кГц. Судовой приемник будет постоянно сканировать рабочие частоты. В зависимости от времени суток и географического района будет выбираться та или иная центральная частота. Рекомендуемая выходная мощность модернизируемых передатчиков будет зависеть от частоты:

– 4; 6 МГц — 5 кВт;

– 8; 12; 16; 18/19; 22; МГц — 10 кВт.

Руководство по эксплуатации системы разрабатывается в рамках рабочей группы 5B Международного союза электросвязи (ITU) [13].

Выводы (Conclusion)

В результате изучения особенностей модернизированной системы NAVDAT отмечается, что увеличение скорости передачи данных получено за счет использования:

– многочастотной передаче сигналов;

– многочастотной амплитудно-фазовой модуляции сигналов;

– избыточного сверточного кодирования.

Широкополосная передача данных в модернизированной системе NAVDAT позволяет в дальнейшем заменить узкополосную передачу данных в системе TELEX, передачу информации по безопасности на море, а также факсимильную передачу в диапазоне КВ. В системе NAVDAT, по сравнению с системой NAVTEX, передается не только текстовая, но и графическая информация, значительно расширяющая информационные возможности: корректура морских навигационных карт, метеорологические и ледовые карты, сообщения по поиску и спасанию и др. Показана зависимость видов многократной амплитудно-фазовой модуляции и скорости передачи данных.

Результаты двухлетних испытаний NAVDAT в ПВ диапазоне, проведенных в Китае, показывают, что в режиме 4 КФМ обеспечивается зона покрытия 290 морских миль, в режиме 16 КАФМ — 196 мор-

ских миль и в режиме 64 КАФМ – 103 морских мили. Результаты четырехмесячных испытаний NAVDAT в КВ диапазоне, проведенных во Франции, показывают, что в режиме 4 КФМ обеспечиваются сопоставимые результаты. Зона покрытия при этом составляет до 250 морских миль.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Устинов Ю. М.* Судовая радиосвязь. Справочник по организации и радиооборудованию ГМССБ / Ю. М. Устинов, А. А. Дуров, В. Ю. Резников; Под ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Судостроение, 2002. — 480 с.

2. *Dahlen A. P.* Navigational Telex (NAVTEX) Modeling / A. P. Dahlen. — Coast Guard New London Ct New London, 2017. — №. CG-D-04-18, R/DC-UDI-1715.

3. *Wang X.* Experimental Research on Marine Digital Navigation System / X. Wang, J. Liu, Z. Liu // The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2019. — ISOPE-I-19-630.

4. *Шигабутдинов А. Р.* Применение цифровых морских информационных систем для обеспечения безопасности мореплавания на Русском Севере / А. Шигабутдинов, И. Дулькейт. — СПб.: Спутниковые технологии и бизнес, 2014. — 30 с.

5. *Liu H.* Application of machine learning methods in maritime safety information classification / H. Liu, Z. Liu, D. Liu // 2018 Tenth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI). — IEEE, 2018. — Pp. 735–740. DOI: 10.1109/ICACI.2018.8377552.

6. *Šafář J.* Performance Bounds for VDES R-mode / J. Šafář, A. Grant, P. Williams, N. Ward // The Journal of Navigation. — 2020. — Vol. 73. — Is. 1. — Pp. 92–114. DOI: 10.1017/S0373463319000559.

7. Рекомендация МСЭ-R M.2058 (02/2014). Характеристики цифровой системы, называемой “Навигационые данные», которая предназначена для радиовещания информации, касающейся безопасности и охраны на море, в направлении берег-судно в диапазоне ВЧ морской службы. — Женева, Швейцария: ITU, 2014. — 20 с.

8. *Вернер М.* Основы кодирования. Учебник для ВУЗов / М. Вернер. — Москва: Техносфера, 2004. — 288 с.

9. *Борисов В. И.* Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов [и др.]; Под ред. В. И. Борисова. — М.: Радио и связь, 2003. — 640 с.

10. *Bauk S.* A Review of NAVDAT and VDES as Upgrades of Maritime Communication Systems / S. Bauk // Advances in Maritime Navigation and Safety of Sea Transportation. — London: CRC Press, 2019. — Pp. 81. DOI: 10.1201/9780429341939.

11. Prediction of NAVDAT coverage and related test (Submitted by China). NCSR 5/ INF.8. — IMODOCS, 2017. — 10 p.

12. Evaluation of the coverage of NAVDAT (Submited by Japan). NCSR 4/INF.11. — IMODOCS, 2016. — 7 p.

13. *Bogens K.* GMDSS modernisation and e-navigation: spectrum needs / K. Bogens // ETSI Workshop» Future Evolution of Marine Communication. — 2017. — Pp. 1–23.

REFERENCES

1. Ustinov, Yu. M., A. A. Durov, and V. Yu. Reznikov. *Sudovaya radiosvyaz'. Spravochnik po organizatsii i radiooborudovaniyu GMSSB*. Edited by Yu.M. Ustinov. SPb.: Sudostroenie, 2002.

2. Dahlen, A. P. *Navigational Telex (NAVTEX) Modeling.* Coast Guard New London Ct New London, 2017. №. CG-D-04-18, R/DC-UDI-1715.

3. Wang, Xiang, Jingxian Liu, and Zhao Liu. “Experimental Research on Marine Digital Navigation System.” *The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2019.

4. Shigabutdinov, A. R., and I. Dul’keit. *Primenenie tsifrovykh morskikh informatsionnykh sistem dlya obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya na Russkom Severe*. SPb.: Sputnikovye tekhnologii i biznes, 2014.

5. Liu, Hongze, Zhengjiang Liu, and Dexin Liu. “Application of machine learning methods in maritime safety information classification.” *2018 Tenth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)*. IEEE, 2018. 735–740. DOI: 10.1109/ICACI.2018.8377552.

6. Šafář, Jan, Alan Grant, Paul Williams, and Nick Ward. "Performance Bounds for VDES R-mode." *The Journal of Navigation* 73.1 (2020): 92–114. DOI: 10.1017/S0373463319000559.

7. *Recommendation ITU-R M.2058-0 (02/2014). Characteristics of a digital system, named navigational data for broadcasting maritime safety and security related information from shore-to-ship in the maritime HF frequency band*. Geneva: ITU 2014.

8. Verner, M. *Osnovy kodirovaniya. Uchebnik dlya VUZov*. M.: Tekhnosfera, 2004.

9. Borisov, V. I., V. M. Zinchuk, A. E. Limarev, N. P. Mukhin, and G. S. Nakhmanson. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov modulyatsiei nesushchei psevdosluchainoi posledovatel'nost'yu.* Edited by V. I. Borisov. M.: Radio i svyaz', 2003.

10. Bauk, S. I. "A Review of NAVDAT and VDES as Upgrades of Maritime Communication Systems." *Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. London: CRC Press, 2019. 81. DOI: 10.1201/9780429341939.

11. *Prediction of NAVDAT coverage and related test. Submitted by China*. NCSR 5/ INF.8. IMODOCS, 2017.

12. *Evaluation of the coverage of NAVDAT (Submited by Japan).* NCSR 4/INF.11. IMODOCS, 2016.

13. Bogens, Karlis. "GMDSS modernisation and e-navigation: spectrum needs." *ETSI Workshop» Future Evolution of Marine Communication*. 2017. 1–23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Припотнюк Андрей Владимирович —
радиоинженер
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *apripotnyuk@mtc.spb.su*

Горобцов Александр Петрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *gorobtsovap@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ustinov, Yury 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_tsn@gumrf.ru*

Pripotnyuk, Andrey V. —
Radio engineer
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: *apripotnyuk@mtc.spb.su*

Gorobtsov, Alexander P. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: *gorobtsovap@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 22 марта 2020 г.
Received: March 22, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-459-466

SYNTHESIS OF ADAPTIVE SHIP COURSE CONTROL SYSTEM BASED ON A LOCAL QUALITY CRITERION

A. A. Dyda, E. P. Chinchukova

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

The problem of adaptive control system synthesis using the local criterion is considered. The criterion selection allows you to take into account ship course errors and desired small deviations of rudder.

The theoretical basis for solving this problem is the velocity gradient method. To obtain laws (algorithms) for adjusting the regulator parameters, a local quadratic quality criterion that is oriented on ensuring small deviations from the set course and keeping the ship's heading has been chosen. Adaptive course control systems, obtained on the basis of theoretical research, are modeled in the MATLAB environment. It is shown that the originally obtained adaptation laws can be modified by coarsening due to introducing a negative feedback on the tunable parameter.

The results of modeling the ship course control system under the influence of an external disturbance are also presented in the paper. The algorithm developed in the paper for setting the regulator parameters allows controlling the ship movement along the course under wind-wave action with wave amplitude of 6 degrees and the constant wave component of 6 degrees.

The results of modeling the ship course control system without setting the regulator and with the setting enabled confirm the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: ship control, linear model, nonlinear model, first order Nomoto models, adaptation algorithms, ship model, gradient algorithm, ship course control, numerical simulation, quadratic quality criterion.

For citation:
Dyda, Alexander A., and Elena P. Chinchukova. "Synthesis of adaptive ship course control system based on a local quality criterion." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 459–466. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-459-466.

УДК 681.51

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА

А. А. Дыда, Е. П. Чинчукова

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

Рассмотрена задача синтеза адаптивной системы управления движением судна по курсу с использованием локального квадратичного критерия качества. Выбор критерия связан с необходимостью обеспечить незначительные отклонения курса судна от заданных значений курса при малых углах кладки пера руля. Отмечается, что теоретическую основу решения этой задачи составляет метод скоростного градиента. Для получения законов (алгоритмов) настройки параметров регулятора выбран локальный квадратичный критерий качества, ориентированный на обеспечение малых отклонений от заданного значения курса и сохранение курса судна. Адаптивные системы управления движением судна по курсу, полученные на основе предложенного теоретического исследования, промоделированы в среде MATLAB. Показано, что первоначально полученные законы адаптации могут быть модифицированы путем огрубления за счет введения отрицательной обратной связи по настраиваемому параметру регулятора. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного модифицированного алгоритма адаптивной настройки параметров регулятора системы управления движением судна по курсу с огрублением. В работе представлены результаты моделирования системы адаптивного управления движением судна по курсу под воздействием внешнего возмущения. Разработанный в статье алгоритм адаптивной настройки параметров регулятора позволяет управлять движением судна по курсу при ветро-волновом воздействии с амплитудой волны, равной 6° и постоянной волновой составляющей в 6°. Результаты моделирования

системы управления движением судна по курсу без настройки регулятора и с включенной адаптивной настройкой параметров регулятора подтверждают эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: управление судном, линейные модель судна, нелинейная модель судна, модель Номото 1-го порядка, метод скоростного градиента, алгоритмы адаптации, численный эксперимент, локальный квадратичный критерий качества, модель судна, управление судном по курсу.

Для цитирования:
Дыда А. А. Синтез адаптивной системы управления курсом судна на основе локального критерия качества / А. А. Дыда, Е. П. Чинчукова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 459–466. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-459-466.

Введение (Introduction)

Качество систем управления движением судна по курсу имеет большое значение для безопасности судовождения. В традиционных системах управления движением судна по курсу, как правило, судоводитель настраивает коэффициенты регулятора в зависимости от различных условий функционирования судна: его загруженности, глубины и т. д. [1].

Существуют различные виды систем управления движением судна по курсу: адаптивные с нелинейной моделью судна [2], адаптивные с линейной моделью судна, робастные, нейросетевые и др. Анализ особенностей судна и условий его эксплуатации показывает, что для этого объекта управления характерна неопределенность параметров [3]–[5]. Это объясняется изменением загрузки судна, ее распределением, варьирование его осадки, изменением качества поверхности судна и другими факторами. Известно, что изменение параметров управляемого объекта при фиксированных параметрах регулятора может приводить к ухудшению качества процессов в системе управления и даже к потере ее устойчивости, т. е. работоспособности [6]. В связи с этим применение классических методов линейной теории управления может не гарантировать высокое качество процессов в управляющей системе [7]. Методы построения систем с переменной структурой, представляющих класс нелинейных систем, ориентированы на применение сигналов релейного (разрывного) типа, они обеспечивают в определенной степени робастные и пассивные адаптивные свойства, однако представляются сложными для реализации в системах управления движением судна. Методы интеллектуального управления и, в частности, нейросетевые методы построения систем в настоящем время также нашли применение для управления морскими подвижными объектами, однако они не разработаны теоретически в достаточной мере и требуют дальнейшего развития.

Одним из наиболее перспективных среди указанных ранее методов построения системы управления представляется подход, основанный на принципе адаптации, т. е. приспособления параметров управления к изменению управляемого объекта. Известны работы, в которых рассмотрено адаптивное управление движением судна по курсу [8]–[10]. Таким образом, направление с использованием адаптивного управления движением судна по курсу является перспективным.

В настоящей статье представлен подход к разработке адаптивных систем управления движением судна по курсу, основанный на локальном квадратичном критерии качества [1], [11]. Система управления движением судна по курсу должна обеспечивать, с одной стороны, высокую точность движения вдоль траектории, или малую ошибку, а с другой — желательны малые отклонения пера руля для предотвращения потерь скорости судна. Таким образом, выбор критерия качества процессов управления движением судна определяется двумя указанными в работе [1] требованиями, а именно высокой точностью движения вдоль траектории и малыми отклонениями пера руля

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для представления динамики судна воспользуемся моделью Номото первого порядка [12]– [14]. Модель Номото 1-го порядка имеет простейший вид линейного дифференциального уравнения первого порядка [1]:

$$T_c\dot{\omega} + \omega = K_c\delta, \tag{1}$$

где ω — угловая скорость рысканья; δ — угол перекладки руля; T_c и K_c — параметры управляемости судна.

Для иллюстрации предлагаемого подхода к синтезу системы управления в качестве примера выберем ПИД-регулятор, параметры которого далее будут настраиваться. В этом случае передаточная функция регулятора $W(s)$ имеет следующий вид:

$$W(s) = K_п + K_и\frac{1}{s} + K_д s, \tag{2}$$

где $K_п$, $K_и$, $K_д$ — пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты ПИД-регулятора соответственно.

Предполагая, что динамикой рулевой машины можно пренебречь в сравнении с динамикой судна [1], общая математическая модель системы управления движением судна по курсу может быть записана в виде:

$$\begin{gathered}\varphi = \omega;\\ \dot{\omega} = \frac{K_c}{T_c}\delta - \frac{1}{T_c}\omega;\\ \delta = K_п\dot{\varepsilon} + K_и\varepsilon + K_д\ddot{\varepsilon},\end{gathered} \tag{3}$$

где φ — курс судна; ω — угловая скорость судна по курсу; δ — угол поворота пера руля; ε — ошибка по курсу.

Адаптивная настройка параметров регулятора выполнена на основе метода скоростного градиента. Применение данного метода предполагает выбор критерия в качестве процесса управления [1]. Зададимся локальным квадратичным критерием качества [5] в следующем виде:

$$Q = \frac{1}{2}\varepsilon^2 + \frac{c}{2}\delta^2, \tag{4}$$

где ε — отклонение курса судна от заданного значения; δ — отклонение пера руля; c — константа, весовой коэффициент критерия (выбирается либо натурными испытаниями конкретного судна [1], либо таким образом, чтобы получить наименьшее возможное значение квадрата отклонения курса судна при заданной величине угла перекладки руля [1]).

Очевидно, что минимизация выбранного локального квадратичного критерия обеспечивает одновременное уменьшение ошибки по курсу и отклонение пера руля, что способствует, как отмечалось ранее, сохранению продольной скорости хода судна) [1].

В соответствии с методом скоростного градиента необходимо вычислить производную критерия Q по времени вдоль траектории системы. Затем, следуя данным библиографического источника [5], следует записать законы настройки (алгоритмы) ПИД-регулятора:

$$\dot{K}_д = \gamma c\delta\ddot{\varepsilon};\ \dot{K}_п = \gamma c\delta\dot{\varepsilon};\ \dot{K}_и = \gamma c\delta\varepsilon, \tag{5}$$

где γ — константа, регулирующая скорость настройки параметров.

Результаты (Results)

Для проверки работоспособности системы управления с полученными законами адаптивной настройки параметров регулятора было проведено численное моделирование (рис. 1).

На рис. 2 показано изменение выходного сигнала системы управления движением судна по курсу с адаптивной настройкой параметров регулятора по локальному квадратичному критерию качества.

На рис. 3 показано улучшение локального критерия качества при включении адаптивной настройки в системе управления курсом судна.

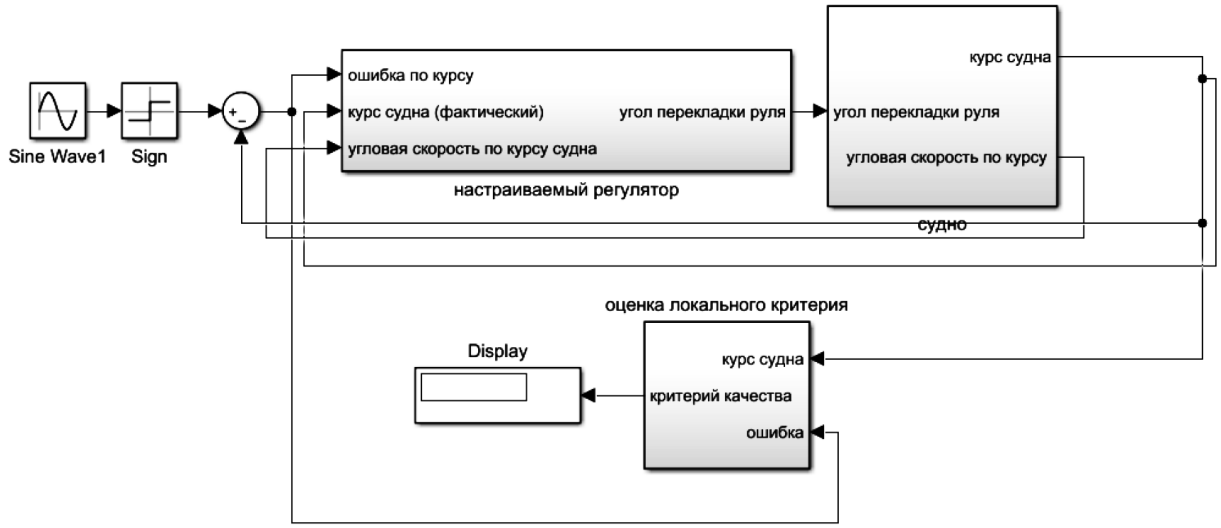


Рис. 1. Схема системы управление в Simulink Mathlab

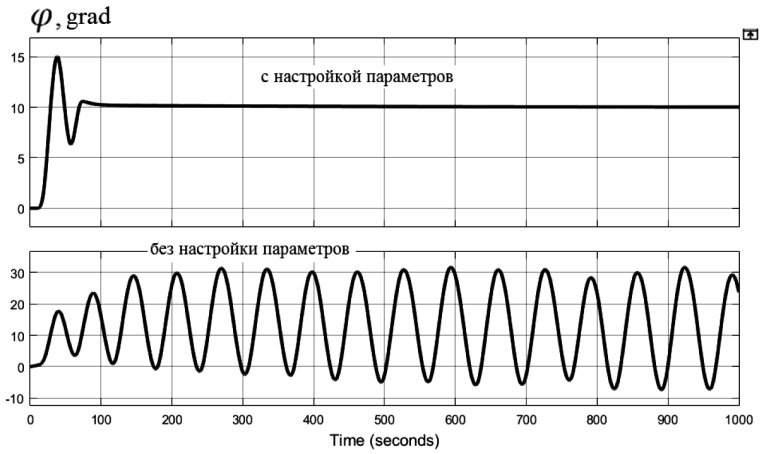


Рис. 2. Выходной сигнал

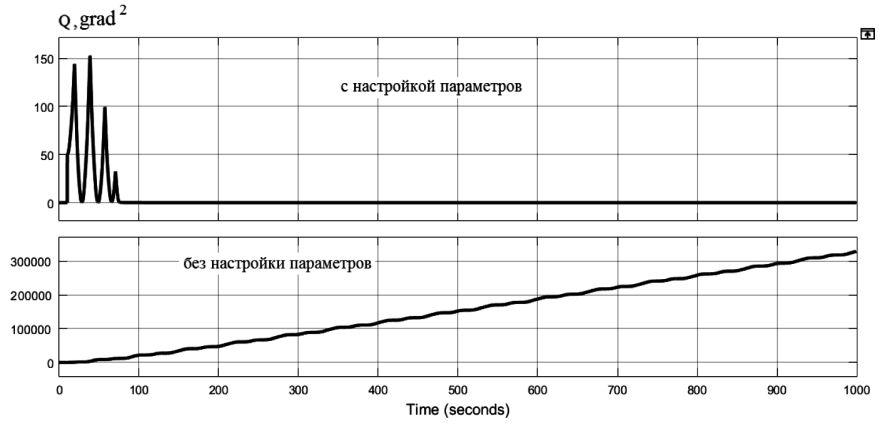


Рис. 3. Изменение локального критерия качества $Q(t)$

Полученный алгоритм наряду с полезными свойствами обладает одним существенным недостатком, отмечаемым в ряде работ по адаптивному управлению [14], в частности, возможным неограниченным ростом параметров регулятора. Это свойство препятствует практической реализации полученной системы управления. Одним из возможных способов преодоления отмеченного

недостатка является огрубление [11] алгоритма адаптивной настройки путем введения отрицательной обратной связи по настраиваемому параметру. В результате модифицированный закон настройки коэффициентов регулятора имеет вид:

$$\dot{K}_{\text{д}} = \gamma c \delta \ddot{\varepsilon} - K_{\text{д}}; \;\; \dot{K}_{\text{п}} = \gamma c \delta \dot{\varepsilon} - K_{\text{п}}; \; \dot{K}_{\text{и}} = \gamma c \delta \varepsilon - K_{\text{и}}. \qquad (6)$$

На рис. 4 показан процесс настройки параметров ПИД-регулятора при адаптивной настройке с огрублением.

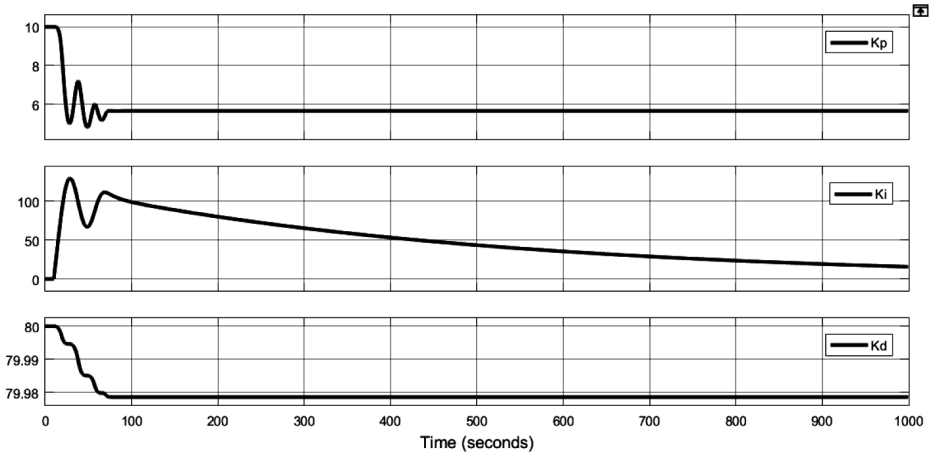


Рис. 4. Графики настройки параметров регулятора

На рис. 5 и 6 показаны, соответственно, процессы управления без адаптации и с адаптивной настройкой параметров регулятора (верхний график — заданный курс судна, нижний — фактический).

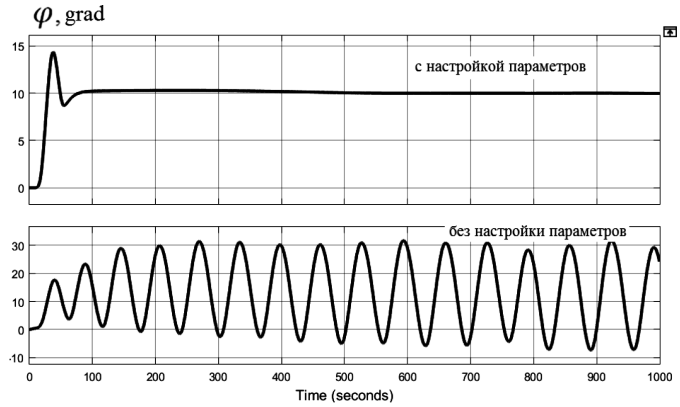


Рис. 5. Выходной сигнал

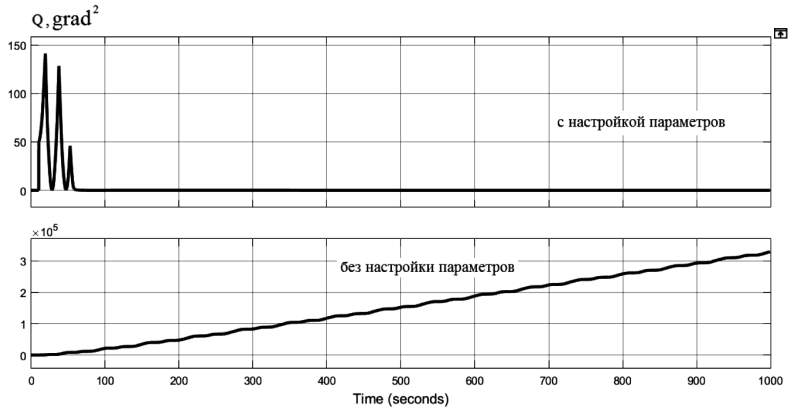


Рис. 6. Изменение локального критерия качества $Q(t)$

Были выполнены исследования точности удержания судна на курсе с разработанным регулятором при наличии внешних ветроволновых возмущений. Для их моделирования в среде Matlab был выбран генератор белого шума и формирующий фильтр [11] второго порядка, представляющий собой колебательное звено, синусоиду и постоянный сигнал (*step*).

Параметры фильтра выбирались таким образом, чтобы спектральная плотность его выходного сигнала соответствовала морскому волнению с амплитудой, равной 6 град., постоянному воздействию, равному 6 град. частотой 3 град./с [15], эквивалентному углу поворота пера руля.

Обсуждение (Discussion)

Вначале исследовались системы управления без настройки параметров ПИД-регулятора. На рис. 2 (нижний график) показано фактическое значение курса судна при заданном ступенчатом курсе (10 град.). При включении полученных ранее законов адаптивной настройки параметров ПИД-регулятора характер процессов изменяется (см. рис. 2 верхний график). Сравнение результатов моделирования показывает, что применение адаптивной настройки параметров регулятора позволило улучшить качество процессов управления курсом судна — уменьшить колебания переходного процесса (выход судна курс).

Как видно из сравнения графиков (см. рис. 5 и 6), введение огрубления позволило сохранить полезные свойства настройки, выраженные в улучшении переходных процессов управления курсом судна.

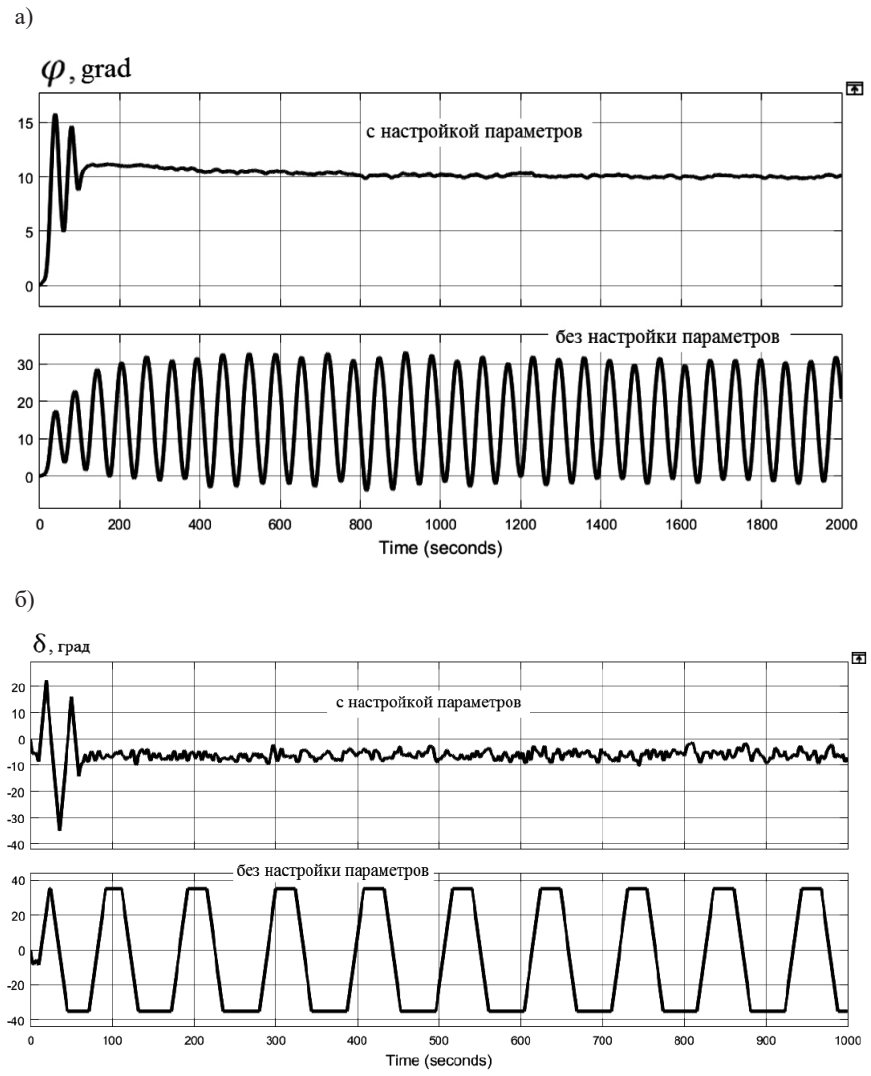


Рис. 7. Выходной сигнал (*а*) и угол перекладки руля (*б*) в адаптивной системе и системе с фиксированными параметрами регулятора при наличии возмущения

На рис. 7 показано, что при выполнении адаптивной настройки параметров ПИД-регулятора по локальному квадратичному критерию судно выходит на курс и удерживается на нем с отклонением ±2 град. и отклонением угла перекладки руля ±5 град.

Заключение (Conclusion)

Проведенные в работе исследования показывают, что предложенный подход адаптивной настройки параметров регулятора позволяет обеспечить высокое качество процессов системы управления движением судна по курсу. Применение адаптивной настройки параметров регулятора представляется целесообразным при наличии априорной неопределенности параметров управляемости судна, которые зависят от загрузки судна, скорости хода и других факторов.

Выбранный критерий, на основе которого выполнена система управления, представляет компромиссное решение между точностью движения судна по курсу и сохранением скорости движения судна по курсу. Для адаптивной настройки системы управления, кроме локального квадратичного критерия качества, применяется также интегральный критерий качества. Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть проведены с использованием более сложных нелинейных моделей судна и других типов регулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чинчукова Е. П.* Адаптивная система управления курсом судна с учетом динамики нелинейной рулевой машины на основе локального критерия качества / Е.П. Чинчукова // Морские исследования на Дальнем Востоке: сб. ст. Третьей всеросс. науч.-практ. конф. «Морские исследования на Дальнем Востоке». — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2019. — С. 76–81.

2. *Dyda A. A.* A nonlinear system with coupled switching surfaces for remotely operated vehicle control / A.A. Dyda, D. Oskin, S. Longhi, A. Monteriù // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49. — Is. 23. — Pp. 311–316. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.360.

3. *Van Amerongen J.* Adaptive Steering of Ship: A model-reference approach to improved manoeuvring and economical course keeping. Doctoral thesis / J. van Amerongen; Delft University of Technology. — Delft University Press, 1982. — 195 p.

4. *Андриевский Б. Р.* Избранные главы теории автоматического управления / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. — СПб: Наука, 2000. — 475 с.

5. *Дыда А. А.* Параметрическая идентификация модели судна на основе степенных рядов / А. А. Дыда, Е. Б. Осокина, Е. П. Чинчукова // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4–5 (42). — С. 125–130.

6. *Dyda A. A.* An adaptive VSS control for remotely operated vehicles / A. A. Dyda, D. A. Oskin, S. Longhi, A. Monteriù // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. — 2017. — Vol. 31. — Is 4. — Pp. 507–521. DOI: 10.1002/acs.2565.

7. *Бурылин Я. В.* Адаптивное управление угловой скоростью поворота судна / Я. В. Бурылин, А. С. Васьков // Эксплуатация морского транспорта. — 2016. — № 4 (81). — С. 37–42.

8. *Дыда А. А.* Адаптивная идентификация параметров моделей судов на основе алгоритма скоростного градиента / А. А. Дыда [и др.]. // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 3-1 (33). — С. 263–268.

9. *Дыда А. А.* Адаптивное и нейросетевое управления сложными динамическими объектами / А. А. Дыда. — Владивосток: Дальнаука, 2006. — 149 с.

10. *Осокина Е. Б.* Параметрическая идентификация системы управления судном на основе модели Номото 2-го порядка / Е. Б. Осокина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 2. — С. 120–123.

11. *Фрадков А. Л.* Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы / А. Л. Фрадков. — М.: Наука, 1990. — 296 с.

12. *Nomoto K.* A review of methods of defining and measuring the manoeuvrability of ships / K. Nomoto, N. Norrbin // 12th ITTC Conference, Report of Manoeuvrability Committee, Ap. I., Rome. — 1969.

13. *Nomoto K.* On the steering qualities of ship / K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, S. Hirano // Journal of Zosen Kiokai. — 1956. — Vol. 1956. — Is. 99. — Pp. 75–82. DOI: 10.2534/jjasnaoe1952.1956.99_75.

14. *Дыда А. А.* Задача идентификации в проблеме управления беспилотным судном / А. А. Дыда, Е. Б. Осокина, Е. П. Чинчукова // Перспективы беспилотных технологий на водном транспорте: Сборник докладов национальной научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2018. — С. 17–22.

15. *Суевалов Л. В.* Справочник по расчетам судовых автоматических систем / Л.В. Суевалов. — Л.: Судостроение, 1989. — 408 с.

REFERENCES

1. Chinchukova, E. P. “Adaptivnaya sistema upravleniya kursom sudna s uchetom dinamiki ne-lineinoi rule-voi mashiny na osnove lokal’nogo kriteriya kachestva.” *Morskie issledovaniya na Dal’nem Vostoke: Sbornik statei Tret’ei vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Morskie issledovaniya na Dal’nem Vostoke».* Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2019. 76–81.

2. Dyda, A. A., D. Oskin, S. Longhi, and A. Monteriù. “A nonlinear system with coupled switching surfaces for remotely operated vehicle control.” *IFAC-PapersOnLine* 49.23 (2016): 311–316. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.360.

3. Van Amerongen, J. Adaptive Steering of Ship: A model-reference approach to improved manoeuvring and economical course keeping. Doctoral thesis. Delft University of Technology. Delft University Press, 1982.

4. Andrievskii, B. R., and A. L. Fradkov. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya*. SPb: Nauka, 2000.

5. Dyda, Aleksandr A., Elena B. Osokina, and Elena P. Chinchukova. “Ship model parameter indentification based on power series.” *Marine Intelligent Technologies* 4-5(42) (2018): 125–130.

6. Dyda, Alexander A., Dmitry A. Oskin, Sauro Longhi, and Andrea Monteriù. “An adaptive VSS control for remotely operated vehicles.” *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 31.4 (2017): 507–521. DOI: 10.1002/acs.2565.

7. Burylin, Y. V., and A. S. Vaskov. “Adaptive regulation of vessel’s turn angular velocity.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(81) (2016): 37–42.

8. Dyda, A. A., P. A. Dyda, E. B. Osokina, and D. A. Os’kin. “Adaptivnaya identifikatsiya parametrov mod-elei sudov na osnove algoritma skorostnogo gradient.” *Marine Intelligent Technologies* 3-1(33) (2016): 263–268.

9. Dyda, A. A. *Adaptivnoe i neirosetevoe upravleniya slozhnymi dinamicheskimi ob»ektami*. Vladivostok: Dal’nauka, 2006.

10. Osokina, E. B. “Parametric identification system ship control based on the model of Nomoto 2-nd order.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal’nego Vostoka* 2 (2015): 120–123.

11. Fradkov, A. L. *Adaptivnoe upravlenie v slozhnykh sistemakh: bespoiskovye metody*. M.: Nauka, 1990.

12. Nomoto, K., and N. H. Norrbin. “A review of methods of defining and measuring the manoeuvrability of ships.” *12th ITTC Conference, Report of Manoeuvrability Committee, Ap. I., Rome*. 1969.

13. Nomoto, Kensaku, Kenshi Taguchi, Keinosuke Honda, and Susumu Hirano. “On the steering qualities of ships.” *Journal of Zosen Kiokai* 1956.99 (1956): 75–82. DOI: 10.2534/jjasnaoe1952.1956.99_75.

14. Dyda, A. A., E. B. Osokina, and E. P. Chinchukova. “A task of identification in pilotless ship control problem.” *Perspektivy bespilotnykh tekhnologii na vodnom transporte: Sbornik dokladov natsional’noi nauchno-prakticheskoi konferentsii.* SPb.: Izd-vo GUMRF, 2018. 17–22.

15. Suevalov, L. V. *Spravochnik po raschetam sudovykh avtomaticheskikh sistem*. L.: Sudostroenie, 1989.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дыда Александр Александрович —
доктор технических наук, профессор
Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: *adyda@mail.ru*

Чинчукова Елена Павловна —
Старший преподаватель
Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: *chinchukova_lena@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dyda, Alexander A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoi
50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: *adyda@mail.ru*

Chinchukova, Elena P. —
Senior Lecture
Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoi
50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: *chinchukova_lena@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2020 г.
Received: April 6, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-467-480

MATHEMATICAL MODEL FOR SOLVING THE PROBLEM OF CONTAINER SHIP STOWAGE PLANNING FOR ENSURING THE SAFETY OF TRANSPORTATION

R. S. Tsarik, D. A. Akmaykin

Maritime State University named after admiral G. A. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

The safety of ship operation is a priority for container shipping. Its provision is inseparably linked with proper container ship stowage planning. At the beginning of maritime container shipping evolution, container ship stowage planning was a fairly simple task, which could be solved without using complex computers and specialized software, in a relatively short time. With increasing ships container capacity, this task has become more complex and time-consuming. The complexity of container ship stowage planning is due to the fact that it is necessary to simultaneously take into account many factors that can have the opposite effect on the planning result. At the same time, normalization of one factor can lead to the fact that another factor will take an unacceptable value. The container capacity of the largest vessels today is 24,000 units in twenty-foot equivalent. Stowage planning of even an average feeder container ship with a capacity of 2000-3000 units in twenty-foot equivalent, in the modern conditions of container lines operation, requires the use of automated planning tools. Automation of this task solution has been attracting the researchers' attention for nearly forty years. However, there were no outstanding successes. At the same time, the existing technical and software tools for container ship stowage planning, although allow you to solve this problem, but not to a sufficient level. It is important that the solution of the problem aims to achieve the greatest economic effect from stowage planning. It is noted that despite the fact that transportation safety is taken into account in the proposed models, these solutions are not enough. A mathematical model for solving the container ship stowage planning, based on setting the objective function and corresponding restrictions is offered in the paper. The maximum priority in the model is given to the safety of transportation. The importance of the economic effect from the stowage planning is recognized, but is not considered in this paper.

Keywords: container ship, container, stowage planning, ship cargo plan, automation, mathematical modeling, safety assurance.

For citation:
Tsarik, Ruslan Stanislavovich, and Denis A. Akmaykin. "Mathematical model for solving the problem of container ship stowage planning for ensuring the safety of transportation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 467–480. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-467-480.

УДК 656.61.052

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ КОНТЕЙНЕРОВОЗА С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕВОЗОК

Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин

ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского», Владивосток,
Российская Федерация

Отмечается, что безопасность эксплуатации судна является приоритетной задачей морских контейнерных перевозок, обеспечение которой нераздельно связано с надлежащим планированием загрузки судов-контейнеровозов. В период становления морских контейнерных перевозок планирование загрузки контейнеровозов представляло собой достаточно простую задачу, решаемую без использования сложной электронно-вычислительной техники и специализированного программного обеспечения в течение относительно короткого периода времени. С ростом контейнеровместимости судов эта задача становилась

все более сложной и трудоемкой. Подчеркивается, что сложность планирования загрузки контейнеровозов обусловлена необходимостью одновременного учета множества факторов, которые могут оказывать противоположное влияние на результат планирования. При этом нормализация одного фактора может привести к тому, что другой фактор примет неприемлемое значение. Контейнеровместимость крупнейших судов на сегодняшний день составляет 24000 единиц в двадцатифутовом эквиваленте. Планирование загрузки даже среднего фидерного контейнеровоза вместимостью 2000–3000 единиц в современных условиях работы контейнерных линий требует применения автоматизированных средств планирования. Автоматизация решения данной задачи привлекает внимание исследователей в течение последних сорока лет. При этом существующие технические и программные средства планирования загрузки судов-контейнеровозов позволяют решать эту задачу, но не в достаточной степени. Важным является тот факт, что решение данной задачи сфокусировано на достижении наибольшего экономического эффекта от планирования загрузки. Отмечается, что несмотря на то, что безопасность перевозки учитывается в предлагаемых моделях, этих решений недостаточно. В статье предложена математическая модель решения задачи планирования загрузки судов-контейнеровозов, основанная на задании целевой функции и соответствующих ограничений. Данная модель учитывает вопросы, возникающие в процессе реальной эксплуатации контейнеровозов. Максимальный приоритет в модели отдается безопасной эксплуатации. Важность экономической составляющей планирования загрузки признается, но в данной работе не рассматривается.

Ключевые слова: судно-контейнеровоз, контейнер, планирование загрузки, грузовой план судна, автоматизация, математическое моделирование, обеспечение безопасности.

Для цитирования:
Царик Р. С. Математическая модель решения задачи планирования загрузки контейнеровоза с целью обеспечения безопасности перевозок / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 467–480. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-467-480.

Введение (Introduction)

Задача планирования размещения контейнеров (Container Stowage Problem (CSP)) является NP-полной задачей. Это свойство задачи, в частности, доказано в работе [1]. Выполненное доказательство заключалось в том, что была рассмотрена и доказана сводимость задачи CSP применительно к задаче раскраски графов, которая, в свою очередь, признана NP-полной задачей. Таким образом, было выполнено требование в части отнесения таких задач к классу NP-полных, при условии их сведения к одной из известных NP-полных задач.

Анализ наиболее характерных математических моделей и использованных математических методов для решения данной задачи показал следующее. В работе [2] авторы, используя методы линейного программирования и эвристические методы, предложили модель решения задачи общего планирования по бэям (Master Bay Planning Problem (MBPP), целью которой является минимизация времени стоянки судна в порту. Вопросы безопасности рассматриваются косвенно. В работе [3] авторы также используют методы линейного программирования и эвристики, предлагая двухэтапную модель планирования загрузки контейнеровоза. На первом этапе решается задача MBPP, на втором — более точная задача частного планирования по штабелям или ячейкам (Slot Planning Problem (SPP). Среди вопросов обеспечения безопасности рассматривается только остойчивость судна. В работе [4] авторы, используя методы генетических алгоритмов, предлагают модель, комбинирующую решение вопросов размещения контейнеров и оптимизации технологических операций на терминале. В работе [5] авторы используют эвристический алгоритм с локальным поиском. С помощью использования предложенной модели осуществляется планирование загрузки в два этапа: первый (общий) и второй (уточненный). Вопросы безопасности перевозки при этом не рассматриваются. В работе [6] авторы, используя программирование с ограничениями и эвристические методы, предлагают модель автоматизированной системы планирования загрузки контейнеровоза, состоящую из трех модулей: генератора грузового плана, модуля остойчивости, модуля оптимизации. В работах [7], [8] авторы используют методы целочисленного программирования, локальный поиск с ограничениями

и эвристические методы. Предложена двухэтапная модель, где на первом этапе контейнеры распределяются по секциям, а на втором — оптимизируется их размещения внутри секций. Учитываются вопросы остойчивости и прочности. В работе [9] авторы, используя эвристические методы и приемы решения задачи упаковки в контейнеры, предлагают модель размещения контейнеров на судне, поделенном на секции. В работе [10] авторы используют компьютерное программирование и методы генетических алгоритмов. Предложенная ими модель включает два этапа. На первом этапе методом ветвей и границ формируется контейнерный штабель, а на втором — методом поисков и запретов контейнеры распределяются по ячейкам. В работе [11] авторы используют эвристические методы для решения задачи MBPP путем введения допуска на количество перемещений кранов по причалу с точки зрения их эффективного использования. Вопросы безопасности, за исключением остойчивости, не учитываются.

На основе выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

– наиболее востребованным из применимых математических методов является целочисленное программирование;

– предпочтение отдается комбинированным методам решения задачи. (В этом случае используются различные подходы, наиболее часто это математическое программирование и эвристические методы);

– остойчивость и другие факторы безопасности если и учитываются, то косвенно. (Предложенные модели не дают четкого понимания того, какое влияние оказывает конкретный контейнер на остойчивость и другие факторы безопасности судна).

Важнейшим аспектом функционирования отрасли морского судоходства является обеспечение безопасности мореплавания для судов любых типов. Соответствующие требования указаны в международных конвенциях, кодексах и резолюциях ИМО. Приоритет безопасности перевозок над коммерческой выгодой является очевидным. Таким образом, при разработке моделей решения задачи CSP, необходимо прежде всего уделять внимание факторам безопасности, в том числе описанным в работе [12], а именно: остойчивости, местной и общей продольной прочности, а также видимости с ходового мостика и размещению контейнеров с опасными грузами.

Поскольку задача CSP является NP-полной, ее решение с помощью эффективных алгоритмов невозможно. Поэтому для решения такого рода задач прибегают, в частности, к методу декомпозиции, при котором задача разделяется на несколько простых подзадач. Задачу CSP можно разделить на два основных этапа: общее планирование по бэям (MBPP) и частное планирование по штабелям или ячейкам (SPP)). Это сложная комбинаторная задача, обусловленная множеством ограничений, связанных с характеристиками контейнеров и судна, которые должны быть учтены одновременно.

С учетом приоритета безопасности предлагаемый подход в решении задачи CSP заключается в следующем:

1. Размещение контейнеров прежде всего планируется с учетом ограничений, основанных на факторах безопасности.

2. Если для конкретного контейнера определяется несколько доступных вариантов размещения (несколько разрешенных ячеек), то из них выбирается ячейка, которая будет оптимальной с точки зрения экономического эффекта (минимизация движений крана, соблюдение очередности выгрузки и др.).

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве основных угроз безопасности в работе рассмотрены следующие факторы:

– конфликты с опасными грузами, которые могут привести к пожарам, взрывам, негативному химическому воздействию и загрязнению окружающей среды;

– нарушение норм весовых нагрузок на корпус судна и его конструкции;

– нарушение требований к остойчивости;

– нарушение требований к посадке судна;

– нарушение требований к видимости с навигационного мостика.

Целевая функция. Целевую функцию в предлагаемой математической модели можно записать в следующем виде:

$$\sigma^S \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\left(P_{IJK}^{DG}+P_{IJK}^{WT}+P_{IJK}^{ST}+P_{IJK}^{HD}+P_{IJK}^{NV}+P_{IJK}^{20/40}\right)\to \min.$$

Принятые в работе обозначения приведены в следующей таблице.

Принятые обозначения

Обозначение	Значение
Основные переменные	
P_{ijk} / $P_{IJK}^{DG,WT,ST,HD,NV,20/40}$	Запрещенная ячейка / количество всех запрещенных ячеек из-за конфликта: *DG* — с опасными грузами; *WT* — по нормированию весовой нагрузки (включая *LS* — местную прочность, *BM* — изгибающий момент, *SF* — перерезывающие силы, *TM* — скручивающий момент); *ST* — по нормированию остойчивости; *HD* — по нормированию посадки, включая *DR* — осадку, *HL* — крен, *TR* — дифферент; *NV* — по нормированию видимости с ходового мостика; 20/40 — по типоразмеру (20 или 40 футов).
Вспомогательные переменные	
BF_b^{b+1}	Плавучесть секции корпуса судна, расположенной между станциями Бонжана *b* и *b*+1.
$M_{VCG_i}^C$	Вертикальный метацентр штабеля контейнеров в бэе *i*.
$F_{ijk}, O_{ijk}, A_{ijk}$	Контейнерная ячейка: свободная (*F*), занятая (*O*), разрешенная (*A*).
ijk_c^{DG}	Контейнерная ячейка *ijk* с контейнером с опасными грузами.
IJK_c^{DG}	Количество всех контейнерных ячеек с опасными грузами.
c_{ijk}^{DG}	Контейнер с опасным грузом в ячейке *ijk*.
$c_i^{20/40}$; $C^{20/40}$	20- / 40-футовые контейнеры в бэе *i*; все 20- / 40-футовые контейнеры на судне.
КМ	Метацентрический радиус.
$ijk_{w_{\max}}^{LS,BM,SF,TM}$; ijk_w^{ST}	Весовой лимит контейнерной ячейки *ijk* по *LS* — местной прочности, *BM* — изгибающему моменту, *SF* — перерезывающим силам, *TM* — скручивающему моменту и метацентрической высоте соответственно.
d_f, d_a, d_m	Осадка носом, кормой, на миделе (средняя).
Δd_{af}, $\Delta d_{af\min}$, $\Delta d_{af\max}$	Дифферент, минимальный / максимальный допустимый дифферент.
Δd_m	Изменение осадки на миделе (средней).
$w_{ijk}^c, w_i^c w_{ij}^c$	Вес контейнера в ячейке *ijk,* вес контейнерного штабеля в бэе *i*, вес контейнерного штабеля в бэе *i* и ряде *j*.
BM_f, SF_f, TM_f, BM_{f-1}^{f+1}, SF_{f-1}^{f+1}, TM_{f-1}^{f+1}	Изгибающий момент, перерезывающие силы, скручивающий момент, действующие на расчетном шпангоуте *f*, в нос от него *f* + 1, в корму от него *f* – 1.
$x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk}$	Отстояние ячейки *ijk* от контрольной ячейки: продольное, поперечное, вертикальное соответственно. Знаки: «–» — на левый борт; «+» — на правый борт.

Продолжение табл.

y_i^c	Поперечное расстояние (плечо момента) от контейнера / контейнерного штабеля в ряду *j* до ДП судна. Знаки «–» — на левый борт, «+» — на правый борт.
x_i^c	Продольное расстояние (плечо момента) от контейнера / контейнерного штабеля в бэе *i* до центра плавучести судна. Знаки «–» — в корму, «+» — в нос.
G_0M	Метацентрическая высота исправленная.
C_{TG}	Ордината поперечного центра тяжести — от диаметральной плоскости до центра штабеля контейнеров или балластного танка.
MD_{cm}	Момент дифферентующий на 1 см.
w_{cm}	Количество тонн, изменяющих осадку на 1 см.
h°	Крен в градусах.
h_1°	Момент, кренящий судно на 1 град., $h_1^\circ = W \cdot G_0M \cdot \tan 1^\circ$.
Константы	
σ^S	Штрафная санкция за нарушение в размещении контейнеров с точки зрения требований безопасности.
$\mathrm{BM}_{\max}$, $SF_{\max}$, $\mathrm{TM}_{\max}$	Максимально допустимые значения изгибающего момента, перерезывающих сил, скручивающего момента.
w_i^t, w_j^t	Вес жидких запасов в танке(ах) *t*, расположенных в бэе *i*; расположенных в проекции ряда *j*.
$\mathrm{Max}W_{ij}$	Максимальный (допустимый) вес контейнерного штабеля в бэе *i* и ряде *j*.
G_0M^R	Метацентрическая высота требуемая.
$\sum k_\rho$	Суммарная поправка за свободную поверхность всех жидких запасов судна.
$k_{w_i}^T$	Компонент суммарного вертикального момента центра тяжести, включающий момент судна порожнем и момент от жидких запасов.
$h_{\max}^\circ$	Крен максимально допустимый в градусах.
$\sum M^H$	Итоговый кренящий момент, отсчитываемый от кормы судна.
h_{ijk}^c; $h_{ijk}^{c'}$	Высота контейнера: стандартный контейнеры; контейнер повышенной вместимости ($h^{c'}$ = хайкьюб).
MH_{ic}	Максимально допустимая высота штабеля контейнеров в бэе *i*.
f_f	Передняя часть расчетного шпангоута *f*. $f_f = 1$, когда *f* — первый шпангоут с носа, $f_f = 0$, когда *f* — первый шпангоут с кормы.
k_{wf-1}^{f+1}	Весовая константа судна в нос или в корму от шпангоута *f*: *f* + *1* — в нос, *f* – *1* — в корму.
k_{Bf-1}^{f+1}	Весовая константа изгибающего момента в нос или в корму от шпангоута *f*: *f* + 1 — в нос, *f* – 1 — в корму.
d_f^F	Расстояние от носовой оконечности судна до расчетного шпангоута *f*.
$d_{ij}{}_{f-1}^{f+1}$	Дистанция в нос или в корму от шпангоута *f* до продольного центра тяжести штабеля *ij*: *f* + 1 — в нос, *f* – 1 — в корму.

Окончание табл.

$d_{t\,f-1}^{\,f+1}$	Дистанция в нос или в корму от шпангоута f до продольного центра тяжести балластного танка t: $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
$d_{b\,f-1}^{\,f+1}$	Дистанция в нос или в корму от шпангоута f до продольного центра тяжести секции плавучести между контрольными точками b и b+1: $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
$c_{ij\,f-1}^{\,f+1}$	Часть штабеля контейнеров, которая расположена в нос или в корму от шпангоута f: $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
t_{f-1}^{f+1}	Часть балластного танка t, которая расположена в нос или в корму от шпангоута f: $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
$S_{f\,f-1}^{\,f+1}$	Часть секции корпуса между контрольными секциями плавучести b и b+1, которая расположена в нос или в корму от шпангоута f: $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
Наборы данных	
f, b, t	Расчетный шпангоут судна $f \in F$; секция плавучести корпуса судна, заключенная между двумя контрольными шпангоутами, $b \in B$; балластный танк судна, $t \in T$.
ijk; IJK	Контейнерная ячейка ijk: бэй i, ряд j, ярус k; все контейнерные ячейки.
A_{ijk}; C	Контейнер в ячейке ijk; все контейнеры.

Взвешенная (штрафная) сумма от количества запрещенных ячеек, в которые не могут быть погружены контейнеры, ввиду возникновения конфликтов с требованиями безопасности, должна быть минимальной. Эффективное планирование загрузки предполагает, что количество таких ячеек будет минимальным. По смыслу данной целевой функции количество ячеек соответствует количеству контейнеров, которые могут быть погружены в эти ячейки: $\left|\{C_{IJK}\}\right| :\Leftrightarrow \left|\{IJK_C\}\right|$, в том числе количество запрещенных к погрузке ячеек эквивалентно количеству не погруженных на судно контейнеров.

Ограничения. Существенным фактором является то, что ограничения должны быть сформулированы таким образом, чтобы была показана зависимость каждого из факторов безопасности от планируемого к погрузке контейнера и / или ячейки, в которую его планируют погрузить. Например, должна быть показана зависимость метацентрической высоты от погрузки данного контейнера в данную ячейку. Судовой балласт и топливо или не рассматриваются, или в случае целесообразности рассматриваются в общем виде, поскольку предполагается, что операции с ними выполняются экипажем в соответствии с установленными процедурами, а для конкретной ситуации жидкие запасы являются константой.

Важным обстоятельством также является то, что сформулированные ограничения содержат компоненты, непосредственно зависящие от характеристик контейнера: веса, размера, типа и др. и ячейки: координат, размера. Это позволяет контролировать изменения параметров загрузки судна-контейнеровоза в зависимости от характеристик каждого контейнера и ячейки, в которую он грузится. Для определения совокупности контейнеров или ячеек используется понятие *множества*. Для определения количества контейнеров или ячеек используется понятие *мощности множества*, отражающего количество элементов, входящих в это множество.

Ячейка, запрещенная к погрузке по одному из факторов безопасности, не учитывается повторно, если она также является запрещенной и по другим факторам безопасности в данных условиях. Например, ячейки, запрещенные к погрузке контейнеров с опасными грузами, не входят в число ячеек, запрещенных к погрузке контейнеров, нарушающих требование к весовой нагрузке:

$$\left\{P_{ijk}^{DG}\right\} \setminus \left\{P_{ijk}^{WT}\right\};\ \ \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K.$$

Сформулируем следующие виды ограничений для целевой функции:

1. *Ограничения по размещению контейнеров с опасными грузами*

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнеров с ОГ:

$$P_{IJK}^{DG} \in \{0,\ldots,F_{ijk}\}; \tag{1}$$

$$P_{IJK}^{DG} = \left|\left\{P_i^{DG}\right\}\right| \cdot \left|\left\{P_j^{DG}\right\}\right| \cdot \left|\left\{P_k^{DG}\right\}\right| - \left|\left\{O_{ijk}^{DG}\right\}\right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{2}$$

С учетом предложенного в работе [13] метода размещения контейнеров с опасными грузами через формирование буферных зон, ограничение (2) можно записать через отстояния (x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk}) по каждой из трех координат (бэй, ряд, ярус):

$$\left|\left\{P_i^{DG}\right\}\right| = \left|\left\{O_i^{DG} \in I \,|\, O_i^{DG} - y_{ijk} \le O_i^{DG} \le O_i^{DG} + y_{ijk}\right\}\right| \qquad \forall i \in I; \tag{3}$$

$$\left|\left\{P_j^{DG}\right\}\right| = \left|\left\{O_j^{DG} \in J \,|\, O_i^{DG} - x_{ijk} \le O_j^{DG} \le O_j^{DG} + x_{ijk}\right\}\right| \qquad \forall j \in J; \tag{4}$$

$$\left|\left\{P_k^{DG}\right\}\right| = \left|\left\{O_k^{DG} \in K \,|\, O_k^{DG} - z_{ijk} \le O_k^{DG} \le O_k^{DG} + z_{ijk}\right\}\right| \qquad \forall k \in K; \tag{5}$$

$$\left|\left\{O_{ijk}^{DG}\right\}\right| = \left|\left\{ijk_c^{DG} \in IJK_c^{DG} \,|\, \left|\left\{ijk_c^{DG}\right\}\right| \ge 1\right\}\right| \qquad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{6}$$

2. *Ограничения по весу*

Ограничения по весу подразумевают ограничения по весовой нагрузке на конструкции судна и контейнеры в штабеле, расположенные в нижних ярусах. При этом максимальный вес самого контейнера считается соответствующим норме, поскольку он контролируется на этапе упаковки груза в контейнер.

Весовая нагрузка контейнеров обуславливает местную и общую продольную прочность и деформацию корпуса судна.

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнеров по их весовым характеристикам:

$$P_{IJK}^{WT} = \left|\left\{P_{ijk}^{LS}\right\}\right| + \left|\left\{P_{ijk}^{BM}\right\}\right| + \left|\left\{P_{ijk}^{SF}\right\}\right| + \left|\left\{P_{ijk}^{TM}\right\}\right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{7}$$

Для удовлетворения требований к местной прочности вес контейнерного штабеля не должен превышать допустимых значений:

$$\sum_{k=1}^{K} w_{ij_k}^c \le \max W_{ij}; \quad \forall i \in I,\ j \in J. \tag{8}$$

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}}^{LS}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \le \max\ W_{ij} - \sum_{k=1}^{K} w_{ij_k}^c; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K \in J. \tag{9}$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по местной прочности:

$$\left|\left\{P_{ijk}^{LS}\right\}\right| = \left|\left\{w_{ijk}^c \in W_{ij} \,\middle|\, w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{LS}\right\}\right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{10}$$

Для удовлетворения требований по общей продольной прочности и ограничению деформаций корпуса судна вес контейнерного штабеля не должен превышать допустимых значений. При проектировании судна определяются расчетные шпангоуты, относительно которых нормируется допустимая весовая нагрузка на корпус.

Изгиб корпуса судна обусловлен неравномерным распределением груза в его оконечностях и на миделе. Если осадки на оконечностях больше осадки на миделе, то это перегиб, если осадка на миделе больше осадок на оконечностях, то это прогиб. На практике в подавляющем большинстве случаев встречается перегиб судна.

Изгибающий момент на расчетном шпангоуте f не должен превышать допустимых значений:

$$BM_f \le \max BM_f; \quad \forall f \in F. \tag{11}$$

Изгибающий момент в нос и в корму от расчетного шпангоута f рассчитывается следующим образом:

$$BM_{f-1}^{f+1} = k_{B\,f-1}^{f+1} + \sum_{i\in I, j\in J} d_{ij\,f-1}^{f+1} c_{ij\,f-1}^{f+1} w_{ij}^{c} + \sum_{t\in T} d_{t\,f-1}^{f+1} t_{f-1}^{f+1} w_t - \sum_{b\in B} d_{b\,f-1}^{f+1} S_{f\,f-1}^{f+1} BF_b^{b+1}; \qquad \forall f \in F, \tag{12}$$

где $\sum_{i\in I, j\in J} d_{ij\,f-1}^{f+1} c_{ij\,f-1}^{f+1} w_{ij}^{c}$ — слагаемое, включающее весовую нагрузку от контейнеров.

Итоговый изгибающий момент на расчетном шпангоуте f рассчитывается следующим образом:

$$BM_f = f_f BM^{f+1} + \left(1 - f_f\right) BM^{f-1}. \tag{13}$$

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w\max}^{BM}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^{c} \le \text{Max}\, W_{ij} - \sum_{k=1}^{K} w_{ij_k}^{c}; \qquad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{14}$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по изгибающему моменту:

$$\left|\left\{P_{ijk}^{BM}\right\}\right| = \left|\left\{w_{ijk}^{c} \in W_{ij} \middle| w_{ijk}^{c} > ijk_{w_{\max}}^{BM}\right\}\right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{15}$$

Перерезывающие силы обусловлены неравномерным распределением веса груза между двумя смежными секциями судна (грузовыми трюмами, контрольными шпангоутами, бэями и т. п.).

Перерезывающие силы на расчетном шпангоуте f не должны превышать допустимых значений:

$$SF_f \le \max SF_f; \qquad \forall f \in F. \tag{16}$$

Перерезывающие силы на расчетном шпангоуте f рассчитываются следующим образом:

$$SF_f = k_{w\,f-1}^{f+1} + \sum_{i\in I, j\in J} c_{ij\,f-1}^{f+1} w_{ij}^{c} + \sum_{t\in T} t_{f-1}^{f+1} w_t - \sum_{b\in B} S_{f\,f-1}^{f+1} BF_b^{b+1}; \qquad \forall f \in F, \tag{17}$$

где $\sum_{i\in I, j\in J} c_{ij\,f-1}^{f+1} w_{ij}^{c}$ — слагаемое, включающее весовую нагрузку от контейнеров.

Итоговая перерезывающая сила на расчетном шпангоуте f рассчитывается следующим образом:

$$SF_f = f_f SF^{f+1} + \left(1 - f_f\right) SF^{f-1}. \tag{18}$$

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{Max}}^{SF}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^{c} \le \max W_{ij} - \sum_{k=1}^{K} w_{ij_k}^{c}; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{19}$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по перерезывающим силам:

$$\left|\left\{P_{ijk}^{SF}\right\}\right| = \left|\left\{w_{ijk}^{c} \in W_{ij} \middle| w_{ijk}^{c} > ijk_{w_{Max}}^{SF}\right\}\right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{20}$$

Скручивающий момент обусловлен неравномерным распределением кренящих моментов, вдоль корпуса судна и на расчетном шпангоуте f не должен превышать допустимых значений:

$$TM_f \le \max TM_f. \tag{21}$$

Скручивающий момент на расчетном шпангоуте f рассчитывается следующим образом:

$$TM_f = 9{,}81\left(\sum_{i\in I,\, j\in J} C_{TGC_{ij}} w_{ij}^c + \sum_{t\in T, i\in I} C_{TGt} w_i^t\right) - \sum M^{\text{н}} \frac{d_f^F}{L_{oa}}; \quad \forall f \in F, \tag{22}$$

где $\sum_{i\in I,\, j\in J} C_{TGC_{ij}} w_{ij}^c$ — слагаемое, включающее весовую нагрузку от контейнеров.

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}}^{TM}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \le \max W_{ij} - \sum_{k=1}^{K} w_{ij_k}^c; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{23}$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по скручивающему моменту:

$$\left|\left\{P_{ijk}^{TM}\right\}\right| = \left|\left\{w_{ijk}^c \in W_{ij} \middle| w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{TM}\right\}\right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{24}$$

3. *Ограничения по остойчивости*

В качестве основного критерия остойчивости рассмотрена исправленная на свободную поверхность метацентрическая высота (G_0M).

Исправленная метацентрическая высота должна быть не менее требуемой:

$$G_0M \ge G_0M^R. \tag{25}$$

Исправленная метацентрическая высота рассчитывается следующим образом:

$$G_0M = KM - \left(\frac{\sum_{ijk}^{IJK} w_{ijk}^c M_{VCG_i}^C}{W} + k_{w_i}^T\right) - \sum k_{\rho}, \tag{26}$$

где $\sum_{ij}^{IJ} w_{ijk}^c M_{VCG_i}^C$ — слагаемое, включающее весовую нагрузку от контейнеров.

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}}^{ST}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \le \frac{\sum_{ij}^{IJ} w_{ijk}^c M_{VCG_i}^C{}^R - \sum_{ijk}^{IJK} w_{ijk}^c M_{VCG_i}^C}{M_{VCG_i}^C}; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{27}$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по метацентрической высоте:

$$\left|\left\{P_{ijk}^{ST}\right\}\right| = \left|\left\{w_{ijk}^c \in W_{ij} \middle| w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{ST}\right\}\right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{28}$$

4. *Ограничения по посадке*

Ограничения по посадке включают ограничения по осадке, крену и дифференту и могут быть обусловлены как физическими характеристиками акватории, так и особенностями эффективной эксплуатации судна. Рассматривается средняя осадка или осадка на миделе, равная среднему от осадок носом и кормой. Переход от одной осадки к другой осуществляется через дифферент.

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнеров из-за нарушения требований к посадке судна:

$$P_{IJK}^{TD} = \left|\left\{P_{ijk}^{DR}\right\}\right| + \left|\left\{P_{ijk}^{HL}\right\}\right| + \left|\left\{P_{ijk}^{TR}\right\}\right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{29}$$

Осадка судна должна оставаться в допустимых пределах:

$$d_{m\,\min} \le d_m \le d_{m\,\max}. \tag{30}$$

В контексте рассматриваемого вопроса достаточно контролировать изменение осадки от увеличения водоизмещения за счет погруженных контейнеров:

$$\Delta d_m = \frac{\sum w_{ijk}^c}{w_{cm}}, \tag{31}$$

где $\sum w_{ijk}^c$ — компонент, включающий весовую нагрузку от контейнеров.

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки ijk_w^{DR}, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \le \Delta d_m{}^R w_{cm}; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{32}$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по осадке:

$$\left|\left\{P_{ijk}^{DR}\right\}\right| = \left|\left\{w_{ijk}^c \in W_{ij} \middle| w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{DR}\right\}\right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{33}$$

Рассматривается крен судна от перемещения груза, а крен от перемещения жидких запасов не рассматривается.

Крен судна должен быть не более допустимого значения:

$$h^\circ \le h_{\max}^\circ; \tag{34}$$

$$h^\circ = \frac{\sum w_j^c y_j^c}{0{,}017455 W G_0 M}, \tag{35}$$

где $\sum w_j^c y_j^c$ — компонент, включающий весовую нагрузку от контейнеров и учитывающий их размещение.

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}}^{HL}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \le \frac{h^\circ{}_{\max} h_1^\circ}{y_j^c}; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{36}$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по осадке:

$$\left|\left\{P_{ijk}^{HL}\right\}\right| = \left|\left\{w_{ijk}^c \in W_{ij} \middle| w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{HL}\right\}\right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{37}$$

Рассматривается дифферент судна от перемещения груза, а дифферент от перемещения жидких запасов не рассматривается.

Дифферент судна должен оставаться в допустимых пределах:

$$\Delta d_{af\min} \le \Delta d_{af} \le \Delta d_{af\max}; \tag{38}$$

$$\Delta d_{af} = \frac{\sum w_i^c x_i^c}{MD_{cm}}, \tag{39}$$

где $\sum w_i^c$ — компонент, включающий весовую нагрузку от контейнеров.

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}}^{TM}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \le \frac{\Delta d_{af}{}^R MD_{cm}}{x_i^c}; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K \in J. \tag{40}$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по осадке:

$$\left|\left\{P_{ijk}^{TM}\right\}\right| = \left|\left\{w_{ijk}^c \in W_{ij} \middle| w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{TM}\right\}\right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{41}$$

5. *Ограничения по видимости с ходового мостика*

Ограничения видимости с ходового мостика обусловлены высотой палубных контейнерных штабелей и посадкой судна, как это описано в работе [14]. Для удовлетворения требований к види-

мости с ходового мостика, высота контейнерного штабеля в данном бэе и ряде не должна превышать максимально допустимую высоту штабеля для данного бэя и ряда в данных условиях:

$$\sum_{ijk}^{IJK} h_{ijk}^{c} + \sum_{ijk}^{IJK} h_{ijk}^{c'} \le MH_{ic}, \tag{42}$$

где $\sum_{ijk}^{IJK} h_{ijk}^{c} + \sum_{ijk}^{IJK} h_{ijk}^{c'}$ — слагаемые, включающие высоту контейнеров.

Высота контейнера не должна превышать лимита по высоте $ijk_{h_{Max}}^{NV}$ ячейки, в которую он планируется к погрузке:

$$h_{ijk}^{c} \le MH_{ic} - \left(\sum_{ijk,k=1}^{IJK} h_{ijk}^{c} + \sum_{ijk,k=1}^{IJK} h_{ijk}^{c'} \right); \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{43}$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по осадке:

$$\left| \left\{ P_{ijk}^{NV} \right\} \right| = \left| \left\{ h_{ijk}^{c} \in MH_{ic} \middle| w_{ijk}^{c} > ijk_{h_{Max}}^{NV} \right\} \right|; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{44}$$

6. *Ограничения по типоразмерам контейнеров*

Рассматриваются два основных стандартных размера контейнеров: 20 и 40 футов. Некоторые контейнерные ячейки могут быть предназначены только для контейнеров одного размера, соответственно в них нельзя погрузить контейнер другого размера. Так, 20-футовый контейнер рассматривается как половина (0,5) 40-футового контейнера.

20-футовый контейнер может быть погружен в данную ячейку только при условии, что ячейка ярусом ниже загружена 20-футовым контейнером:

$$\sum_{c_i^{20}}^{C^{20}} c_{ijk}^{20} - \sum_{c_i^{20}}^{C^{20}} c_{ij(k-1)}^{20} \le 0; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{45}$$

40-футовый контейнер может быть погружен в данную ячейку только при условии, что ячейка ярусом ниже не пустая (в нее загружен один 40-футовый контейнер, или два 20-футовых контейнера):

$$0{,}5\sum_{c_i^{20}}^{C^{20}} c_{ij(k+1)}^{20} + \sum_{c_i^{40}}^{C^{40}} c_{ij(k-1)}^{40} - \sum_{c_i^{40}}^{C^{40}} c_{ijk}^{40} \ge 0; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{46}$$

В одну ячейку может быть погружены максимум два 20-футовых или один 40-футовый контейнер:

$$0{,}5\sum_{c_i^{20}}^{C^{20}} c_{ijk}^{20} + \sum_{c_i^{40}}^{C^{40}} c_{ijk}^{40} \le 1; \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ k \in K. \tag{47}$$

Обсуждение (Discussion)

В отличие от математических моделей, разработанных другими авторами, в предложенной в настоящем исследовании математической модели внимание акцентировано именно на вопросах безопасности с учетом основных факторов безопасности, относящихся к планированию загрузки судна-контейнеровоза и его последующей эксплуатации, зависящей от качества этой загрузки. При этом модель позволяет включать в нее дополнительные факторы и учитывать их аналогично учтенным ранее факторам.

Применение этой модели позволит осуществлять планирование загрузки судов-контейнеровозов по принципу «разрешено-запрещено» на основе ограничений ячеек (лимитах) по весу и размерам контейнеров, запланированных к погрузке. Данный принцип подразумевает определение разрешенных и запрещенных ячеек к погрузке каждого конкретного контейнера. Таким образом, будут определяться и предлагаться к размещению контейнера только те ячейки, которые во всех отношениях соответствуют требованиям безопасности. Если таких ячеек не будет обнаружено,

то придется или отказаться от погрузки данного контейнера, или внести допустимые изменения в план загрузки.

Предложенная модель позволяет минимизировать или полностью избежать ситуаций в случае, когда возникает необходимость изменения размещения некоторых контейнеров, не соответствующих требованиям безопасности, уже после составления грузового плана и даже после погрузки на судно.

Выводы (Summary)

На основе выполненных в работе исследований можно сделать следующие выводы:

1. Несмотря на определенные положительные результаты в решении данного вопроса, аварии с судами-контейнеровозами, вызванные нарушением технологии перевозок, происходят. Некоторые из наиболее характерных аварий описаны в работе [15].

2. Вопросы экономической эффективности при планировании загрузки судов-контейнеровозов, в частности снижения расхода топлива, согласно данным, приведенным в работе [16], и логистическая оптимизация, безусловно, необходимо учитывать, но приоритет при этом должен отдаваться вопросам обеспечения безопасности.

3. Обеспечение безопасности морских контейнерных перевозок невозможно без надлежащего планирования загрузки судов-контейнеровозов, которое учитывает все основные факторы безопасности.

4. Планирование загрузки должно учитывать характеристики каждого конкретного контейнера и особенности судна-контейнеровоза. Размещение контейнеров должно планироваться так, чтобы избежать нарушения требований безопасности.

5. Дальнейшие исследования планируется направить на улучшение предложенной математической модели, включая формулирование целевой функции и ограничений. Планируется составить алгоритм, на основе которого можно разработать специальное программное обеспечение, способное с высокой степенью автоматизации составлять грузовые планы для судов-контейнеровозов с учетом требований безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Avriel M.* Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs / M. Avriel, M. Penn, N. Shpirer // Discrete Applied Mathematics. – 2000. – Т. 103. – №. 1-3. – С. 271-279. DOI: 10.1016/S0166-218X(99)00245-0.

2. *Ambrosino D.* Stowing a containership: the master bay plan problem / D. Ambrosino, A. Sciomachen, E. Tanfani // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2004. — Vol. 38. — Is. 2. — Pp. 81–99. DOI: 10.1016/j.tra.2003.09.002.

3. *Delgado A.* A constraint programming model for fast optimal stowage of container vessel bays / A. Delgado, R. M. Jensen, K. Janstrup, T. H. Rose, K. H. Andersen // European Journal of Operational Research. — 2012. — Vol. 220. — Is. 1. — Pp. 251–261. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.01.028.

4. *Imai A.* Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks / A. Imai, K. Sasaki, E. Nishimura, S. Papadimitriou // European Journal of Operational Research. — 2006. — Vol. 171. — Is. 2. — Pp. 373–389. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.07.066.

5. *Liu F.* Randomized algorithm with tabu search for multi-objective optimization of large containership stowage plans / F. Liu, M. Y. H. Low, W. J. Hsu, S. Y. Huang, M. Zeng, C. A. Win // International Conference on Computational Logistics. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. — С. 256–272. DOI: 10.1007/978-3-642-24264-9_20.

6. *Low M. Y. H.* Improving safety and stability of large containerships in automated stowage planning / M. Y. H. Low, M. Zeng, W. J. Hsu, S. Y. Huang, F. Liu, C. A. Win // IEEE Systems Journal. — 2011. —Vol. 5. — Is. 1. — Pp. 50–60. DOI: 10.1109/JSYST.2010.2100198.

7. *Pacino D.* Fast generation of container vessel stowage plans: PhD Thesis / D. Pacino; IT University of Copenhagen. — Denmark, 2012. — 109 p.

8. *Pacino D.* An accurate model for seaworthy container vessel stowage planning with ballast tanks / D. Pacino, A. Delgado, R. M. Jensen, T. Bebbington // International Conference on Computational Logistics. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. — Pp. 17–32. DOI: 10.1007/978-3-642-33587-7_2.

9. *Sciomachen A.* The master bay plan problem: a solution method based on its connection to the three-dimensional bin packing problem / A. Sciomachen, E. Tanfani // IMA Journal of Management Mathematics. — 2003. — Vol. 14. — Is. 3. — Pp. 251–269. DOI: 10.1093/imaman/14.3.251.

10. *Wilson I. D.* Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study / I. D. Wilson, P. A. Roach, J. A. Ware // Research and Development in Intelligent Systems XVII. — Springer, London, 2001. — С. 349–362. DOI: 10.1007/978-1-4471-0269-4_25.

11. *Min Z.* Improving ship stability in automated stowage planning for large containerships / Z. Min, M. Y. H. Low, H. W. Jing, H. S. Ying, L. Fan, W. C. Aye // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists – IMECS 2010. — 2010. — Vol. III.

12. *Акмайкин Д. А.* Анализ факторов, влияющих на безопасность морских контейнерных перевозок / Д. А. Акмайкин [и др.] // Транспортное дело России. — 2015. — № 6. — С. 207–211.

13. *Царик Р. С.* Оптимизация размещения контейнеров с опасными грузами на борту контейнеровоза / Р. С. Царик // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России. 17 мая 2017 года. Материалы VIII межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 31–38.

14. *Царик Р. С.* Разработка алгоритма формирования контейнерного штабеля для обеспечения требуемой видимости с ходового мостика контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 29–43. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-29-43.

15. *Царик Р. С.* Управление рисками и снижение аварийности в морских контейнерных перевозках / Р. С. Царик [и др.] // Транспорт: наука, техника, управление. : науч. информ. сб. — 2015. — № 2. — С. 37–42.

16. *Царик Р. С.* Оценка влияния дифферента контейнеровоза на расход топлива / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Проблемы транспорта Дальнего Востока: сб. науч. тр. — Владивосток: ДВО Российской академии транспорта, 2017. — С. 69–73.

REFERENCES

1. Avriel, Mordecai, Michal Penn, and Naomi Shpirer. “Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs.” *Discrete Applied Mathematics* 103.1-3 (2000): 271–279. DOI: 10.1016/S0166-218X(99)00245-0.

2. Ambrosino, Daniela, Anna Sciomachen, and Elena Tanfani. “Stowing a containership: the master bay plan problem.” *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 38.2 (2004): 81–99. DOI: 10.1016/j.tra.2003.09.002.

3. Delgado, Alberto, Rune Møller Jensen, Kira Janstrup, Trine Høyer Rose, and Kent Høj Andersen. “A constraint programming model for fast optimal stowage of container vessel bays.” *European Journal of Operational Research* 220.1 (2012): 251–261. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.01.028.

4. Imai, Akio, Kazuya Sasaki, Etsuko Nishimura, and Stratos Papadimitriou. “Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks.” *European Journal of Operational Research* 171.2 (2006): 373–389. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.07.066.

5. Liu, Fan, Malcolm Yoke Hean Low, Wen Jing Hsu, Shell Ying Huang, Min Zeng, and Cho Aye Win. “Randomized algorithm with tabu search for multi-objective optimization of large containership stowage plans.” *International Conference on Computational Logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. 256–272. DOI: 10.1007/978-3-642-24264-9_20.

6. Low, Malcolm Yoke Hean, Min Zeng, Wen Jing Hsu, Shell Ying Huang, Fan Liu, and Cho Aye Win. “Improving safety and stability of large containerships in automated stowage planning.” *IEEE Systems Journal* 5.1 (2011): 50–60. DOI: 10.1109/JSYST.2010.2100198.

7. Pacino, Dario. Fast Generation of Container Vessel Stowage Plans. PhD Thesis. IT University of Copenhagen. Denmark, 2012.

8. Pacino, Dario, Alberto Delgado, Rune Møller Jensen, and Tom Bebbington. “An accurate model for seaworthy container vessel stowage planning with ballast tanks.” *International Conference on Computational Logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. 17–32. DOI: 10.1007/978-3-642-33587-7_2.

9. Sciomachen, Anna, and Elena Tanfani. “The master bay plan problem: a solution method based on its connection to the three-dimensional bin packing problem.” *IMA Journal of Management Mathematics* 14.3 (2003): 251–269.

10. Wilson, Ian D., Paul A. Roach, and J. Andrew Ware. “Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study.” *Research and Development in Intelligent Systems XVII.* Springer, London, 2001. 349–362. DOI: 10.1007/978-1-4471-0269-4_25.

11. Min, Zeng, Malcolm Yoke Hean Low, Hsu Wen Jing, Huang Shell Ying, Liu Fan, and Win Cho Aye. “Improving ship stability in automated stowage planning for large containerships.” *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists – IMECS 2010.* Vol. III. 2010.

12. Akmaykin, D., R.Tsarik, A. Moskalenko, M. Moskalenko, and S. Klyueva. “Analysis of factors affecting the safety of container shipping.” *Transport business of Russia* 6 (2015): 207–210.

13. Tsarik, R.S. “Optimizatsiya razmeshcheniya konteinerov s opasnymi gruzami na bortu kontei-nero-voza.” *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii. 17 maya 2017 goda. Materialy VIII mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017. 31–38.

14. Tsarik, Ruslan Stanislavovich, and Denis Aleksandrovich Akmaykin. “Development of container stack forming algorithm for ensuring of required visibility from navigation bridge of container ship.” *Vestnik go-sudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 4(38) (2016): 29–43. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-29-43.

15. Tsarik, R.S., D.A. Akmaykin, M.A. Moskalenko, and S.V. Losev. “Risk management and reduction of accident rate in container shipping.” *Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection)* 2 (2015): 37–42.

16. Tsarik, R.S., and D.A. Akmaikin. “Otsenka vliyaniya differenta konteinerovoza na raskhod topliva.” *Problemy transporta Dal’nego Vostoka. Sbornik nauchnykh trudov.* Vladivostok: DVO Rossiiskoi Akademii trans-porta, 2017. 69–73.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Царик Руслан Станиславович —
капитан, аспирант
Научный руководитель:
Акмайкин Денис Александрович
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация,
Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: *rex-infinity@yandex.ru*
Акмайкин Денис Александрович —
кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация,
Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: *akmaykin@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsarik, Ruslan Stanislavovich —
Master mariner, postgraduate
Supervisor:
Akmaykin, Denis A.
Maritime State University named
after admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str.,
Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: *rex-infinity@yandex.ru*
Akmaykin, Denis A. —
PhD, associate professor
Maritime State University named
after admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str.,
Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: *akmaykin@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2020 г.
Received: April 23, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-481-491

SEARCH FOR ERRORS IN THE BASE OF NAVIGATION DATA BY THE METHOD OF SPLINE ISOSURFACE VISUALIZATION

I. V. Yuyukin

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

It is proposed to optimize a posterior accuracy estimation of the navigation parameters cluster by spline synthesis of the isosurface of the digital array in order to search for errors in the measurement database. Structured numerical information is visualized by means of computer graphics in an evident geometric form. Reliable error detection from the base of navigation data based on the wavelet fluctuation of an erroneous geometric image is provided. Axonometric visualization of the navigation isosurface on a computer screen is based on the parallel projection method. A gallery of six display copies demonstrates the productivity of the numerical experiment. In parallel, two tables present fragments of a hypothetical base of accurate and erroneous data. The essence of the performed test is to artificially initiate two errors simulated by manual correction of the digital data file. Detected graphical improvisations of errors can be operatively corrected in the numeric data file, since the approximate segment of the tabular errors presence sets their geometric image. The absence of peaks on the computer display guarantees synchronous absence of errors in the database and in this case there is no need to carry out search activities. In order to implement the practical possibility of manipulating the synthesized isosurface, four coefficients for controlling the shape of the geometry of the engineered electronic perspective are introduced into the software module. Variation of one of the four coefficients assists to conduct the further analyzing the measurement data in order to distinguish the heterogeneity of digital values from their error. The proposed approach allows you to obtain a compromise solution if it is impossible to formulate formal criteria for fuzzy logic of searching for errors in the database. Based on empirical analysis, an expert assessment of the accuracy of any base of navigation data is performed.

Keywords: base of navigation data, visualized isosurface, geometric image of error, parallel projection, wavelet fluctuation of error, fuzzy search for error.

For citation:
Yuyukin, Igor V. "Search for errors in the base of navigation data by the method of spline isosurface visualization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 481–491. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-481-491.

УДК 656.61.052 656

ПОИСК ОШИБОК В БАЗЕ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ МЕТОДОМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СПЛАЙНОВОЙ ИЗОПОВЕРХНОСТИ

И. В. Ююкин

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

Предлагается оптимизация апостериорной оценки точности кластера навигационных параметров методом сплайнового синтезирования изоповерхности цифрового массива с целью поиска ошибок в базе измерительных данных. Структурированная числовая информация визуализируется средствами компьютерной графики в наглядной геометрической форме. Обеспечивается достоверное обнаружение промаха из базы навигационных данных по вейвлетовой флуктуации ошибочного геометрического образа. Аксонометрическая визуализация навигационной изоповерхности на компьютерном экране основана на методе параллельного проецирования. Галерея из шести дисплейных копий демонстрирует результативность проведенного вычислительного эксперимента. Параллельно в двух таблицах представлены фрагменты гипотетической базы точных и ошибочных данных. Суть выполненного теста заключается в искусственном инициировании двух ошибок, имитированных ручной корректурой файла цифровых данных. Обнаруженные графические импровизации ошибок оперативно могут быть исправлены в файле числовых данных,

так как ориентировочный сегмент присутствия табличных ошибок задает их геометрический образ. Отсутствие всплесков гарантирует синхронное отсутствие ошибок в базе данных и в этом случае нет необходимости осуществлять розыскные мероприятия. С целью реализации практической возможности манипулирования синтезируемой изоповерхностью в программный модуль введены четыре коэффициента управления формой геометрии спроектированной электронной перспективы. Варьирование одним из четырех коэффициентов помогает проведению дополнительного анализа измерительных данных с целью отличия неоднородности цифровых значений от их ошибочности. Предлагаемый подход позволяет получить компромиссное решение при невозможности формулирования формальных критериев нечеткой логики поиска ошибочности по базе данных. На основе эмпирического анализа выполняется экспертная оценка точности любой базы навигационных данных.

Ключевые слова: база навигационных данных, визуализацированная изоповерхность, геометрический образ ошибки, параллельное проецирование, вейвлетовая флуктуация ошибки, нечеткий поиск ошибочности.

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

Введение (Introduction)

Графическая интерпретация цифровых массивов посредством компьютерной визуализации их геометрических образов является актуальной задачей представления результатов вычислительного эксперимента в наглядной форме. Оперативность обработки баз данных математическими средствами находит широкое применение в различных современных прикладных исследованиях [1]–[3]. Оптимизировать научные методы апостериорной оценки точности цифровых многомерных массивов может позволить компьютерная визуализация баз данных [4], [5]. Целесообразность представления аккумулированного в базах данных числового поля в виде визуализированной графики 3D формата актуализируется с развитием инновационных компьютерных технологий и мобильных приложений при игнорировании трудоемкости исследовательского процесса [6]–[8].

Применимость предлагаемого подхода может быть использована в задаче аппроксимации геоида методами сплайн-функций [9] при предварительном визуальном анализе сверхбольшой базы данных значений узловых реперных точек, формирующих гравитационный облик планеты Земля, так как любая ошибка в массиве альтиметрических измерений вызовет искажения в синтезировании сплайновой модели геоида. Представляется важным до момента реконструкции жидкого состояния планеты проверять матрицу измерений на наличие технических ошибок методом компьютерной визуализации сплайновой изоповерхности числового поля контрольных гравиметрических замеров, что позволяет заблаговременно исключить искаженное конструирование «морского геоида». До решения трудоемкой в математическом смысле задачи логически оправданно проводить предварительное качественное исследование адекватности исходной базы спутниковых данных.

Перспективность задачи синтезирования сплайнового геоида представляет самостоятельный научный интерес. Помимо парадигмы абсолютной точности навигации появляется реальная возможность упразднить выбор для вахтенного помощника из 170 различных вариантов геодезических систем для определения места судна [10], что автоматически повышает приоритет применения прогрессивной математики в практике судовождения.

Предлагаемый подход предварительного поиска ошибок в базе навигационных данных автоматически задает инновационный стимул повышения стандартов безопасности мореплавания.

Для практического применения метода сплайн-функций сформулированы следующие задачи:

1. Сплайновое синтезирование изоповерхности оцифрованного массива навигационных параметров с целью поиска ошибок в базе измерительных данных.

2. Компьютерная визуализация моделированной сплайн-функциями изоповерхности навигационного поля данных.

3. Разработка программного унифицированного комплекса клиповой демонстрации любой базы данных.

4. Достоверное обнаружение и исключение технической ошибки по вейвлетовой флуктуации ее геометрического образа.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Сплайновое синтезирование навигационной изоповерхности реализуется на основе гибридной модели [11], [12]:

$$\begin{cases} \sum\limits_{i=-k}^{g+k+1}\sum\limits_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q)B_{j,m}(\lambda_r)C_{i,j} = F_{q,r} \quad q=1,\dots z_1;\ r=1,\dots z_2; \\ \frac{1}{\sqrt{p}}\sum\limits_{i=-k}^{g+k+1}\sum\limits_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q)L_{j,r}(\lambda_r)C_{i,j} = 0 \qquad q=1,\dots z_1;\ r=1,\dots h; \\ \frac{1}{\sqrt{p}}\sum\limits_{i=-k}^{g+k+1}\sum\limits_{j=-m}^{h+m+1} B_{j,m}(\lambda_r)L_{i,q}(\varphi_q)C_{i,j} = 0 \qquad q=1,\dots g;\ r=1,\dots z_2; \\ \frac{1}{p}\sum\limits_{i=-k}^{g+k+1}\sum\limits_{j=-m}^{h+m+1} L_{i,q}(\varphi_q)L_{j,r}(\lambda_r)C_{i,j} = 0 \qquad q=1,\dots g;\ r=1,\dots h, \end{cases}$$

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

g, h — максимальное количество узлов на сеточных интервалах φ и λ соответственно;

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

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

p — сглаживающий весовой коэффициент;

z_1, z_2 — максимальное число дискретных измерений навигационных параметров по координатным осям φ и λ соответственно;

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

Решение математической оптимизированной системы выполняется модифицированным методом наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности [13]. Аксонометрическая визуализация изоповерхности на компьютерном экране в предлагаемом подходе основана на использовании целенаправленного метода *параллельного проецирования* [14]–[16].

Результаты (Results)

С целью апробации предлагаемого подхода разработан интерфейс визуализации навигационного поля измерительных данных с позиций теории приближения сплайн-функциями. Работа алгоритмического модуля реализуется за счет обращения из оболочки программной среды турбопаскаль к отдельному файлу с табличным представлением цифровых данных при помощи специального операнда. Таким образом обеспечивается стратегическая унификация решения поставленных задач, поскольку можно менять файлы со структурированными базами данных с синхронной заменой имени команды обращения к файлу цифровых данных, а все расчеты будет реализовывать один программный модуль на основе одного алгоритма. Корректура реляционной базы навигационных данных выполняется стандартными средствами операционной системы Windows. Концепция оценки точности измерений навигационных параметров методом визуализации средствами компьютерной графики навигационной изоповерхности позволяет реализовать гибкую систему управления базой навигационных данных.

Для двумерного массива навигационных параметров выполняется математическая нормировка. Осуществляется центровка компьютерного изображения за счет ориентации *параллельного проецирования* электронной перспективы на дисплей из центральной точки изоповерхности.

Оптимальное нахождение центра проецирования обеспечивается процедурой нормировки при определении геометрического центра многомерного облака данных.

Разработанный программный модуль осуществляет визуализацию поверхности оцифрованного массива на основе гибридного сплайнового алгоритма. С целью демонстрации работоспособности разработанного интерфейса смоделирована визуализация гипотетической матрицы 21 × 23 условных значений. Приводится графическая копия с компьютерного дисплея условной синтезированной сплайновой изоповерхности (рис. 1).

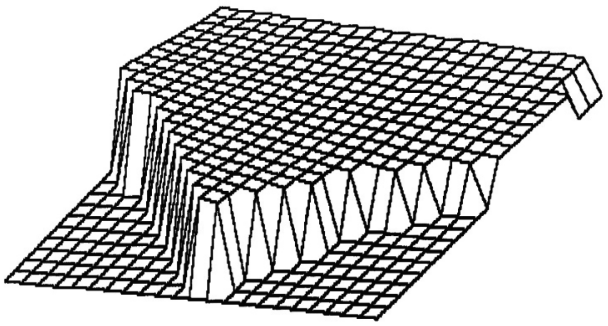


Рис. 1. Скриншот абстрактной сплайновой изоповерхности точных измерительных данных

Скриншот является демонстрацией результата компьютерной визуализации методом синтезирования сплайновой гипотетической изоповерхности поля навигационных данных, кластерный фрагмент которых представлен в табл. 1. Ступенчатый излом изоповерхности обусловлен неоднородностью навигационных параметров.

Таблица 1

Кластер гипотетической базы точных навигационных параметров

2,350	2,548	2,745	2,940	3,136	3,333	3,530	3728	3,928	4,127	4,328
3,034	3,287	3,539	3,792	4,045	4,300	4,556	4,813	5,072	5,333	5,596
3,717	4,026	4,337	4,648	4,962	5,277	5,594	5,913	6,236	6,561	6,891
4,402	4,771	5,142	5,516	5,891	6,270	6,651	7,037	7,426	7,823	8,223
5,097	5,526	5,958	6,396	6,837	7,284	7,735	8,191	8,652	9,120	9,593
5,809	6,297	6,791	7,296	7,807	8,323	8,846	9,374	9,909	10,450	10,997
6,547	7,092	7,650	8,220	8,799	9,389	9,985	10,587	11,194	11,807	12,427
7,314	7,914	8,533	9,168	9,816	10,476	11,145	11,820	12,498	13,178	13,863
8,113	8,768	9,446	10,141	10,857	11,583	12,321	13,064	13,806	14,544	15,278
8,946	9,654	10,386	11,141	11,916	12,705	13,502	14,302	15,095	15,878	16,649
9,810	10568	11,352	12,158	12,986	13,829	14,676	15,518	16,350	17,165	–9,970
10,696	11.504	12,334	13,187	14,057	14,941	15,824	16,698	17,556	–9,970	–9,970
11,603	12,457	13,331	14,220	15,122	16,031	16,936	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970
12,523	13,420	14,327	15,243	16,165	17,090	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970
13,448	14,378	15,312	16,248	17,183	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970
14,371	15,325	16,279	17,230	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970
15,280	16,256	17,224	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970
16,170	17,166	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970
17,044	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970
–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970
–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970

Для сравнительной оценки на рис. 2, *а* приведено повторное изображение изоповерхности с инициированной ошибкой в базе данных. Топографическая ошибка аппроксимированной изоповерхности имитировалась с помощью ручной корректуры файла цифровых данных.

а) б)

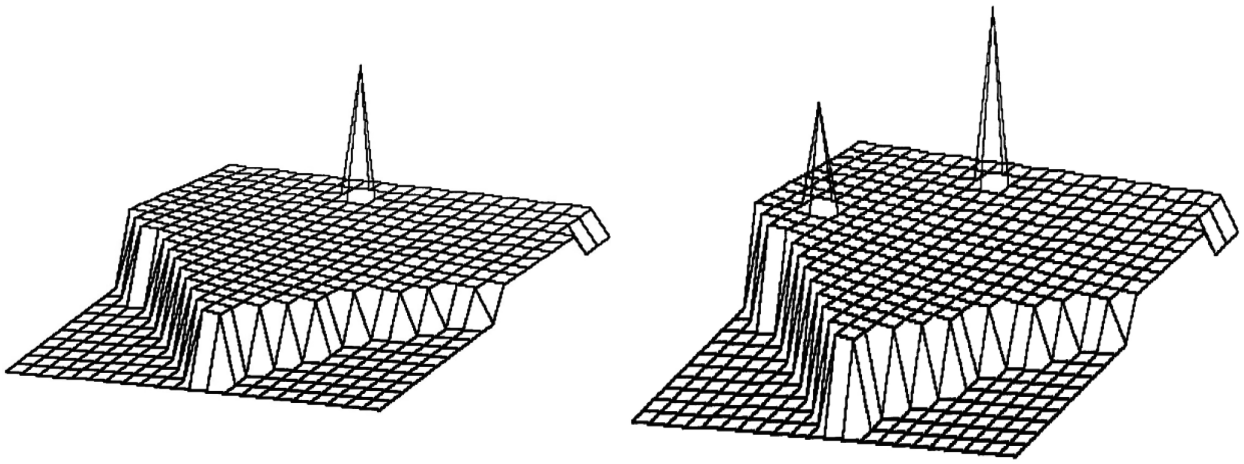


Рис. 2. Скриншот абстрактной сплайновой изоповерхности данных:
а — с одной имитационной ошибкой; *б* — с двумя имитационными ошибками

На втором скриншоте наглядно прослеживается вейвлетовая флуктуация (рис. 2, *а*), возникающая вследствие нарушения гладкости восстановленной сплайновой изоповерхности. На рис. 2, *б* обнаруживаются сразу два шумовых всплеска при искусственной имитации двух промахов измерений. Третий скриншот (см. рис. 2, *б*) является демонстрацией результата компьютерной визуализации методом синтезирования сплайновой гипотетической изоповерхности поля навигационных данных, кластерный фрагмент которых представлен в табл. 2, где две импровизированные ошибки выделены маркером серого цвета с целью однозначной идентификации.

Таблица 2

Кластер гипотетической базы навигационных параметров с двумя имитационными ошибками

2,350	2,548	2,745	2,940	3,136	3,333	3,530	3,728	3,928	4,127	4,328
3,034	3,287	3,539	3,792	4,045	4,300	4,556	4,813	5,072	5,333	5,596
3,717	54,026	4,337	4,648	4,962	5,277	5,594	5,913	6,236	6,561	6,891
4,402	4,771	5,142	5,516	5,891	6,270	6,651	7,037	7,426	7,823	8,223
5,097	5,526	5,958	6,396	6,837	7,284	7,735	8,191	8,652	9,120	9,593
5,809	6,297	6,791	7,296	7,807	8,323	8,846	9,374	9,909	10,450	10,997
6,547	7,092	7,650	8,220	8,799	9,389	9,985	10,587	11,194	11,807	12,427
7,314	7,914	8,533	9,168	9,816	10,476	11,145	11,820	12,498	13,178	13,863
8,113	8,768	9,446	10,141	10,857	11,583	12,321	43,064	13,806	14,544	15,278
8,946	9,654	10,386	11,141	11,916	12,705	13,502	14,302	15,095	15,878	16,649
9,810	10,568	11,352	12,158	12,986	13,829	14,676	15,518	16,350	17,165	–9,970
10,696	11,504	12,334	13,187	14,057	14,941	15,824	16,698	17,556	–9,970	–9,970
11,603	12,457	13,331	14,220	15,122	16,031	16,936	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970
12,523	13,420	14,327	15,243	16,165	17,090	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970
13,448	14,378	15,312	16,248	17,183	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970
14,371	15,325	16,279	17,230	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9.970	–9,970
15,280	16,256	17,224	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9.970	–9,970
16,170	17,166	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9.970	–9,970
17,044	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9.970	–9,970
–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9.970	–9,970
–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9,970	–9.970	–9,970

Визуально обнаруженные графические импровизации ошибок оперативно могут быть обнаружены и исправлены в файле числовых данных, так как примерный сегмент обнаружения ошибок в таблице навигационных параметров определяет геометрический образ. Прерогативу поиска

ошибок задает феномен изогеометрической флуктуации ошибочности на ракурсном скриншоте [17]. Решение о наличии ошибки в массиве данных принимается по факту возникновения виртуального всплеска на синтезированной сплайновой изоповерхности как геометрической визуализации цифрового множества.

Фактическое отсутствие всплесков на компьютерном дисплее гарантирует отсутствие ошибок в базе данных, и в этом случае нет необходимости проводить розыскные мероприятия. Обеспечивается сохранение в отдельных файлах каждого электронного клипа навигационной изоповерхности. Предусматривается интерактивный режим работы пользователя с паскаль-программой путем задания коэффициентов управления формой аппроксимированной изоповерхности и представления лучшего ракурса электронного изображения.

С целью реализации практической возможности манипулирования формой синтезируемой изоповерхности в программный модуль были введены следующие четыре коэффициента модификации визуализированной изоповерхности:

1. *Коэффициент вертикального масштабирования электронного изображения*. Для увеличения изображения коэффициент необходимо в обратной пропорции уменьшать. В противном случае минимизации коэффициент предлагается увеличивать. Допустимый диапазон значений коэффициента выявлен в тестовом исследовании от 0 до 1. Оптимальное значение данного коэффициента для большинства практических применений по данным экспериментов составляет 0,5. Коэффициент вертикального масштабирования в конкретном вычислительном эксперименте задан равным 0,9 (см. рис. 1 и 2).

2. *Коэффициент горизонтального масштабирования электронного изображения*. Для увеличения изображения коэффициент необходимо в обратной пропорции уменьшать. В противном случае минимизации коэффициент также предлагается увеличивать. Допустимый диапазон значений коэффициента выявлен в тестовом исследовании от 0 до 1. Оптимальное значение данного коэффициента для большинства практических применений, по данным экспериментов, составляет 0,5. Коэффициент горизонтального масштабирования в конкретном вычислительном эксперименте задан равным 0,9 (см. рис. 1 и 2).

3. *Геометрический фактор синтезированной изоповерхности*. Данный параметр позволяет осуществить дополнительную центровку компьютерного изображения в случае смещения окраинных участков изоповерхности за фактические размеры экрана. В такой ситуации возможно наблюдение фиктивного излома края изоповерхности. Интерактивное управление геометрическим фактором позволяет устранять графические дефекты путем уменьшения геометрических размеров изоповерхности, что фактически достигается увеличением данного параметра по числовому значению. Для увеличения масштаба компьютерного изображения коэффициент необходимо уменьшать. Оптимальное значение данного коэффициента для большинства практических применений, по данным экспериментов, составляет число в промежутке 50–90. Допустимый диапазон значений коэффициента выявлен в тестовом исследовании от 0 до 130. Геометрический фактор в данном вычислительном эксперименте задан равным 80 (см. рис. 1 и 2).

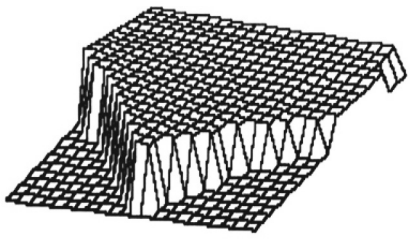


Рис. 3. Уменьшенная масштабированием копия абстрактной сплайновой изоповерхности точных измерительных данных

На рис. 3 представлен ракурс электронной перспективы при значении геометрического фактора, равном предельному значению 150. Из анализа скриншота следует, что задавать коэффициент больше 130 нерационально, так как возникает неразличимость отдельных деталей сплайновой изоповерхности.

По физической сути, данный коэффициент выполняет функцию виртуального увеличительного стекла [18]. При задании масштабирования по геометрическому фактору у пользователя появляется дополнительная возможность приближения изоповерхности или рассмотрении компью-

терной перспективы на удалении. Варьирование масштабированием обеспечивает оптимальную детализацию визуализации данных навигационных измерений в 3D-формате.

4. *Нормированный коэффициент варьирования неоднородностью измерительных данных.* В случае наличия резкой неоднородности цифрового массива и, соответственно, проявления демонстрационного ступенчатого излома изоповерхности предусмотрен параметр манипулирования размером виртуальной ступени визуализированной числовой матрицы в виде нормированного коэффициента.

На базовом скриншоте (см. рис. 1) нормированный коэффициент задавался равным единице. Для сравнительной оценки выполнена визуализация изоповерхности при варьировании данного коэффициента в большую и меньшую стороны. На рис. 4, *а* представлена модификация базового скриншота при задании нормированного коэффициента, равным значению 400, с искусственно увеличенной ступенью излома неоднородности данных.

а) б)

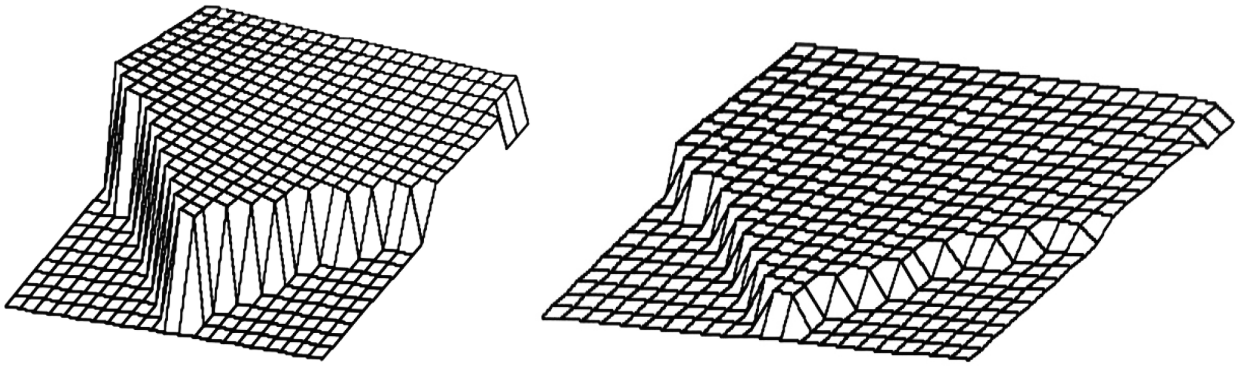


Рис. 4. Модификация базового скриншота абстрактной сплайновой изоповерхности точных измерительных данных:
а — при увеличении нормированного коэффициента;
б — при уменьшении нормированного коэффициента

На рис. 4, *б* представлена модификация базового скриншота при задании нормированного коэффициента, равным 0,4, с искусственно уменьшенной ступенью излома неоднородности данных. Варьирование нормированным коэффициентом помогает дополнительному анализу измерительных данных с целью отличия неоднородности цифровых значений от их ошибочности. При изменении нормированного коэффициента с синхронным изменением ступенчатой геометрии изоповерхности масштабируется целая группа соответственных значений чисел в базе данных в отличие от единичной фатальности допущенной ошибки.

Числовые значения всех четырех коэффициентов в проведенном эксперименте выбраны на основе эмпирического анализа. Выполнена программная реализация ускоренного перехода к каждому последующему ракурсу изображения, мгновенная фиксация фрагмента воспроизведения электронной перспективы и продолжение компьютерной прорисовки восстанавливаемой изоповерхности. Быстрый переход к следующему ракурсу компьютерного изображения выполняется при нажатии запрограммированной горячей клавиши. Фиксация фрагмента изображения осуществляется при использовании клавиши пробела. Продолжение визуализации изоповерхности выполняется одним кликом. Для выхода из программной оболочки среды турбо паскаля традиционно используется ESC. Каждый ракурс реализованного изображения сохраняется на дисплее до момента активизации клавиатуры.

Галерея скриншотов (см. рис. 1–4) является подтверждением актуальности и практической применимости предлагаемого метода синтезирования сплайновой изоповерхности для поиска ошибок в базе навигационных данных с возможностью дополнительного манипулирования каждым электронным ракурсом. Сопоставимый результат в современных научных публикациях отсутствует.

Обсуждение (Discussion)

В настоящем исследовании рассмотрена проблема поиска ошибок методом визуализации синтезированной изоповерхности как геометрического образа поля навигационных параметров. С целью оперативного выявления проблематики базы данных на основе средств прогрессивной математики необходимо конкретное понимание сущности атрибута ошибки. Только в этом случае возможно формирование правильного представления о том, какие розыскные мероприятия стратегически предлагается производить в оцифрованной базе данных.

В рамках разработанной сплайновой методики предполагается организовать поиск так называемой *полной ошибки*, согласно исследованиям д-ра техн. наук В. Т. Кондрашихина, в смысле совместного учета действия систематической и случайной ошибок [19]. Концептуализация *полной ошибки* логически оправдана как взаимообусловленность явлений реального мира в соотношении между случайным и необходимым, в отличие от классической классификации погрешностей навигационных измерений с фиксированным разделением на *случайность* и *систематичность*, для выявления которых традиционно применяются различные математические методы при обработке навигационной информации.

Полная ошибка гарантированно будет обнаружена в виде вейвлетовой флуктуации как объединенного сочетания систематики и случайности при компьютерной визуализации навигационной изоповерхности за счет нарушения сплайновой «гладкости» C^2 каждой синтезированной изолинии как частного случая изоповерхности ввиду нарушения условий «склейки» при конструировании кубических многозвенников [20].

Авторская идея заключается в представлении базы цифровых данных в виде визуализированной компьютерной модели с реализацией возможности выявления *неформализованного признака* между навигационными параметрами и синтезированного на их матричной основе объемного геометрического образа [21]. Данный подход позволяет получить компромиссное решение при невозможности формулирования формальных критериев *нечеткого поиска* ошибочности [22], [23].

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработанный изогеометрический поиск ошибок в базе многопараметрических данных позволяет существенно упростить анализ результатов эксперимента и обеспечить достоверность использования цифровой информации для любых практических приложений.

2. Достигнуто свойство унифицированности сплайнового алгоритма за счет его многократного использования при реализованной программной возможности синтезировать любые изоповерхности при подключении в расчетный цикл различных исходных цифровых файлов данных.

3. Гарантируется обнаружение *полной ошибки* в виде графического всплеска при компьютерной визуализации навигационной изоповерхности.

4. Форма синтезируемой изоповерхности эффективно модифицируется с помощью четырех управляющих коэффициентов для наглядного представления результатов эксперимента.

5. Предусмотрена обратная связь путем задания пользователем в интерактивном режиме управляющих коэффициентов манипулирования сплайновой изоповерхностью для получения максимальной наглядности 3D-графики.

6. Дана экспертная апостериорная оценка точности любой базы данных навигационных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Palominos F. E.* Improve efficiency in multidimensional database queries through the use of additives aggregation functions / F. E. Palominos, C. Duran, F. M. Cordova // Procedia Computer Science. — 2019. — Vol. 162. — Pp. 754–761. DOI: 10.1016/j.procs.2019.12.047.

2. *Davis A. L.* Modern Programming Made Easy: Using Java, Scala, Groovy, and JavaScript / A. L. Davis. — Second edition. — Berkeley: Apress, 2020. — 193 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-5569-8.

3. *Sciore E.* Database Design and Implementation / E. Sciore. — Second Edition. — Cham: Springer International Publishing, 2020. — 458 p. DOI: 10.1007/978-3-030-33836-7.

4. *Романова И. К.* Сравнительный анализ и модификации методов визуализации в параметрических исследованиях систем управления / И.К. Романова // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2017. — № 1. — С. 50–76. DOI: 10.7463/0117.0000926.

5. *Dawson C.* A-Z of Digital Research Methods / C. Dawson. — London: Routledge, 2019. — 414 p. DOI: 10.4324/9781351044677.

6. *Dahiya N.* Efficient Materialized View Selection for Multi-Dimensional Data Cube Models / N. Dahiya, V. Bhatnagar, M. Singh // International Journal of Information Retrieval Research. — 2016. — Vol. 6. — Is. 3. — Pp. 52–74. DOI: 10.4018/IJIRR.2016070104.

7. *Bylysheva L.* A new approach for image database design / L. Bylysheva, J. Jones, Z. Bi // Information Technology and Management. — 2017. — Vol. 18. — Pp. 97–105. DOI: 10.1007/s10799-015-0224-6.

8. *Unwin A.* Why is Data Visualization important? What is Important in Data Visualization? / A. Unwin // Harvard Data Science Review. — 2020. —Vol. 2. —№ 1. — Pp. 1–7. DOI: 10.1162/99608f92.8ae4d525.

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

10. *Песков Ю. А.* Морская навигация с ГЛОНАСС/GPS / Ю. А. Песков. — М.: Моркнига, 2010. — 148 с.

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

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

13. *Ююкин И. В.* Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.

14. *Johansson J.* Evaluation of Parallel Coordinates: Overview, Categorization and Guidelines for Future Research / J. Johansson, C. Forsell // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. — 2015. — Vol. 22. — Is. 1. — Pp. 579–588. DOI: 10.1109/TVSG.2015.2466992.

15. *Raidou R. G.* Orientation-Enhanced Parallel Coordinate Plots / R.G. Raidou, M. Eisemann, M. Breeuwer, E. Eisemann, A. Vilanova // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. — 2015. — Vol. 22. — Is. 1. — Pp. 589–598. DOI: 10.1109/TVSG.2015.2467872.

16. *Tuor R.* Parallel Bubbles - Evaluation of Three Techniques for Representing Mixed Categorical and Continuous Data in Parallel Coordinates / R. Tuor, F. Evequoz, D. Lalanne // Proceedings of the 13th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications. — Portugal, 2018. — Vol. 2. — Pp. 252–263. DOI: 10.5220/0006615602520263.

17. *Isayeva E. A.* The role of fluctuations in artificial intelligence from Zadeh's fuzzy sets point of view / E.A. Isayeva // IFAC-PapersOnLine. — 2018. — Vol. 51. — Is. 30. — Pp. 812–815. DOI: 10.1016/j.ifacal.2018.11.189.

18. *Chang R.* Usability Guidelines for an Online Image Database / R. Chang, D.F. Bliss II, A.R. Altemus // Journal of Biocommunication. — 2019. — Vol. 43. — № 1. — Pp. 14–23. DOI: 10.5210/jbc.v43i1.7874.

19. *Кондрашихин В. Т.* Теория ошибок и ее применение к задачам судовождения. — М.: Транспорт, 1969. — 256 с.

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

21. *Yager R. R.* Decision-making with measure modeled uncertain payoffs and multiple goals / R.R. Yager // Granular Computing. — 2020. — Vol. 5. — Pp. 149–154. DOI: 10.1007/s41066-019-00203-4.

22. *Gorban A. N.* Piece-wise quadratic approximations of arbitrary error functions for fast and robust machine learning / A. N. Gorban, E. M. Mirkes, A. Zinovyev // Neural Networks. — 2016. —Vol. 84.—Pp. 28–38. DOI: 10.1016/j.neunet.2016.08.007.

23. *Hand D.* What is the Purpose of Statistical Modeling? / D. Hand // Harvard Data Science Review. — 2019. — Vol. 1. — Is 1. —Pp. 1–6. DOI: 10.1162/99608f92.4a85af74.

REFERENCES

1. Palominos, Fredi E., Claudia Duran, and Felisa M. Cordova. "Improve efficiency in multidimensional database queries through the use of additives aggregation functions." *Procedia Computer Science* 162 (2019): 754–761. DOI: 10. 1016/j.procs.2019.12.047.

2. Davis, Adam L. *Modern Programming Made Easy: Using Java, Scala, Groovy, and JavaScript*. Second ed. Berkeley: Apress, 2020. DOI: 10.1007/978-1-4842-5569-8.

3. Sciore, Edward. *Database Design and Implementation*. Cham: Springer International Publishing, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-33836-7.

4. Romanova, Irina K. "Comparative Analysis and Modification of Imaging Techniques in the Parametric Studies of Control Systems." *Science and Education of the Bauman MSTU* 1 (2017): 50–76. DOI: 10.7463/0117.0000926.

5. Dawson, Catherine. *A-Z of Digital Research Methods*. London: Routledge, 2019. DOI: 10.4324/9781351044677.

6. Dahiya, Naveen, Bhatnagar Vishal, and Singh Manjeet. "Efficient Materialized View Selection for Multi-Dimensional Data Cube Models." *International Journal of Information Retrieval Research* 6.3 (2016): 52–74. DOI: 10.4018/IJIRR.2016070104.

7. Bylysheva, Larisa, Jeffery Jones, and Zhuming Bi. "A new approach for image database design." *Information Technology and Management* 18 (2017): 97–105. DOI: 10.1007/s10799-015-0224-6.

8. Unwin, Anthony. "Why is Data Visualization important? What is Important in Data Visualization?." *Harvard Data Science Review* 2.1 (2020): 1–7. DOI: 10.1162/99608f92.8ae4d525.

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

10. Peskov, Yuriy A. *Morskaya navigatsiya s GLONASS/GPS*. M.: Morkniga, 2010.

11. Yuyukin, Igor V. "Optimization of navigational isosurface simulation by the methods of basic finite splines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.

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

13. Yuyukin, Igor V. "Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.

14. Johansson, Jimmy, and Camilla Forsell. "Evaluation of Parallel Coordinates: Overview, Categorization and Guidelines for Future Research." *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 22.1 (2015): 579–588. DOI: 10.1109/TVSG.2015.2466992.

15. Raidou, Renata G., Martin Eisemann, Marcel Breeuwer, Elmar Eisemann, and Anna Vilanova. "Orientation-Enhanced Parallel Coordinate Plots." *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 22.1 (2015): 589–598. DOI: 10.1109/TVSG.2015.2467872.

16. Tuor, Raphael, Florian Evequoz, and Denis Lalanne. "Parallel Bubbles - Evaluation of Three Techniques for Representing Mixed Categorical and Continuous Data in Parallel Coordinates." *Proceedings of the 13th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*. Vol. 2. Portugal, 2018. 252–263. DOI: 10.5220/0006615602520263.

17. Isayeva, Elmira A. "The role of fluctuations in artificial intelligence from Zadeh's fuzzy sets point of view." *IFAC-PapersOnLine* 51.30 (2018): 812–815. DOI: 10.1016/j.ifacal.2018.11.189.

18. Chang, Ruth, Donald F. Bliss II, and Anne R. Altemus. "Usability Guidelines for an Online Image Database." *Journal of Biocommunication* 43.1 (2019): 14–23. DOI: 10.5210/jbc.v43i1.7874.

19. Kondrashihin, Vladimir T. *Teoriya oshibok i eye primenenie k zadacham sudovozhdeniya*. M.: Transport, 1969.

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

21. Yager, Ronald R. "Decision-making with measure modeled uncertain payoffs and multiple goals." *Granular Computing* 5 (2020): 149–154. DOI: 10.1007/s41066-019-00203-4.

22. Gorban, Alexander N., Eugenij Moiseevich Mirkes, and A. Zinovyev. “Piece-wise quadratic approximations of arbitrary error functions for fast and robust machine learning.” *Neural Networks* 84 (2016): 28–38. DOI: 10.1016/j.neunet.2016.08.007.

23. Hand, David. “What is the Purpose of Statistical Modeling?.” *Harvard Data Science Review* 1.1 (2019): 1–6. DOI: 10.1162/99608f92.4a85af74.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2020 г.
Received: April 7, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-492-503

METHOD FOR ASSESSING THE COORDINATES OF THE GENERAL CENTER OF GRAVITY OF MASSES COMPOSING THE SHIP CONSTANT

S. V. Ermakov

Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU»,
Kaliningrad, Russian Federation

The present work is devoted to the substantiation of the calculation method for determining the coordinates (abscissa and ordinate) of the general center of gravity of «the ships constant» — non-measurable load items whose total mass is determined by the difference between the actual (calculated from the draft) mass of the empty vessel and the mass of the empty vessel specified in the documentation, and is taken into account when determining the mass of the cargo according to the draft of the vessel (by draft survey method). To determine the coordinates of the center of gravity, it is proposed to use the software installed on the vessel for stability calculation (in terms of the International Code on Intact Stability, 2008 — part of the stability instrument). To determine the abscissa, one should use the draft of the vessel measured by the marks of the recesses, estimate the difference between the actual and calculated ship draft, by discrete change of the abscissa of the center of gravity, laid down in the program, and achieve equality of actual and estimated draft. As a result, the desired value will be the value of the abscissa at which the indicated equality of values of the vessel's draft is observed. To determine the ordinate, the actual value of the transverse metacentric height (i. e. obtained differently than using a computer program) must be available. The captain formula is proposed to use for this purpose. The further algorithm is similar to the algorithm for determining abscissas — the desired ordinate value will be observed in the program when the actual and obtained using the stability instrument transverse metacentric heights are equal.

The possibility of practical realization of substantiated method is demonstrated using real stability instrument applied in marine vessel (bulk carrier). During the computational experiment, it was found that the input of arbitrary or intuitively valid coordinates of the center of gravity of "dead load" can lead to significant errors in the calculation of the transverse metacentric height. In turn, these errors can become a source of error in assessing the vessel stability. Thus, the use of the substantiated method and the results of its application in calculating stability prevent the occurrence of such errors.

Keywords: ship constant, center of gravity, coordinates.

For citation:
Ermakov, Sergey V. "Method for assessing the coordinates of the general center of gravity of masses composing the ship constant." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 492–503. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-492-503.

УДК 656.61.052

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ «МЕРТВОГО ЗАПАСА» (КОНСТАНТЫ)

С. В. Ермаков

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Российская Федерация

Выполнено обоснование расчетной методики для определения координат (абсциссы и аппликаты) центра тяжести «мертвого запаса» (судовой постоянной, судовой константы) — не подлежащих измерению статей нагрузки, общая масса которых определяется разностью между фактической (рассчитываемой по осадкам) массой судна порожнем и массой судна порожнем, указанной в документации, и принимаемого во внимание при определении массы груза по осадкам судна (методом драфт-сюрвея). Для определения координат центра тяжести «мертвого запаса» предлагается использовать программное обеспечение, установленное на судне для расчета остойчивости (в терминах «Международного кодекса остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года» является частью ее инструмента). Под-

черкивается, что для определения абсциссы следует использовать снятые по маркам углублений (фактические) осадки судна, оценить разность между фактическими и рассчитанными программой значениями осадок, дискретным изменением абсциссы центра тяжести «мертвого запаса», заложенной в программе, а также добиться равенства фактических и расчетных осадок. Отмечается, что в итоге искомым будет являться то значение абсциссы, при котором наблюдается указанное равенство. Для определения ординаты необходимо иметь в распоряжении фактическое значение поперечной метацентрической высоты, т. е. полученное иначе, чем при помощи компьютерной программы. Для этой цели предлагается использовать капитанскую формулу. Исследован алгоритм, аналогичный алгоритму для определения абсциссы — искомое значение ординаты будет наблюдаться в программе при равенстве фактического и полученного при помощи инструмента остойчивости значений поперечной метацентрической высоты.

Возможность практической реализации обоснованной методики продемонстрирована при помощи реального инструмента остойчивости, используемого на морском судне (балкере). В процессе проведенного вычислительного эксперимента установлено, что ввод произвольных или интуитивно обоснованных значений координат центра тяжести «мертвого запаса» может привести к появлению значимых погрешностей в расчете поперечной метацентрической высоты. В свою очередь, эти погрешности могут явиться источником ошибки в оценке остойчивости судна. Таким образом, использование предложенной обоснованной методики и результатов ее применения при расчете остойчивости предупреждает возникновение подобных ошибок.

Ключевые слова: «мертвый запас», центр тяжести, координаты.

Для цитирования:
Ермаков С. В. Методика оценки координат центра тяжести «мертвого запаса» (константы) / С. В. Ермаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 492–503. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-492-503.

Введение (Introduction)

Главной задачей, реализуемой при помощи постоянного мониторинга окружающей обстановки и контроля элементов движения судна, его местоположения и мореходных качеств, решение которой является обязательным для судоводителя во время рейса, служит постоянное обеспечение безопасности судна и экипажа. К мореходным качествам судов и, в первую очередь, к остойчивости, международные и национальные нормативно-правовые акты предъявляют достаточно жесткие требования [1]–[4].

Обязанность выполнения расчетов остойчивости возникает у судоводителя перед каждым выходом в море и при любом изменении параметров загрузки судна. В современном мореплавании расчеты остойчивости производятся, как правило, с использованием специализированных программ для ЭВМ [5], что практически исключает возможность появления ошибок в вычислениях. В таком случае достоверность результата определяется точностью введенных данных и достигается только в том случае, если при расчете использовались значения, максимально приближенные к истинным. В частности, для вычисления аппликаты центра тяжести (ЦТ) судна и поперечной метацентрической высоты (МВ) необходимо иметь в распоряжении достаточно точные значения аппликат ЦТ и массы размещенных на судне грузов. В противном случае, т. е. при использовании в расчетах недопустимых приближений, полученное значение МВ может включать такие неоцененные погрешности, которые могут инициировать неверные решения по обеспечению безопасности судна.

Если какая-либо величина, необходимая для расчета остойчивости, не подлежит измерению, то следует иметь инструмент, позволяющий ее оценить косвенным способом. В том случае, когда для такой величины имеет место интервальная оценка, при расчете остойчивости следует принимать во внимание такое значение величины из интервала, которое при прочих равных условиях дает в результате наихудшее значение метацентрической высоты, т. е. необходимо придерживаться принципа «держать себя ближе к опасности». Подобный подход использован, например, при установлении Российским морским регистром судоходства стандарта в отношении аппликаты ЦТ загруженного контейнера. В соответствии с этим стандартом следует принимать положение ЦТ в геометрическом центре контейнера, т. е. на половине его высоты. Как показано в работе [6], фактически центр тяжести контейнера при стандартной загрузке располагается,

как правило, ниже геометрического центра. Следовательно, фактическое значение поперечной МВ практически всегда больше расчетного. Таким образом, принимая при расчетах аппликату ЦТ такой, как установлено, Правилами классификации и постройки морских судов РМРС, поперечную метацентрическую высоту получают минимальной из всех значений, возможных при различных вариантах размещения грузов в контейнерах.

Косвенную оценку координат ЦТ необходимо выполнять не только для грузов, размещенных в контейнерах, но и в отношении других грузов. Настоящая работа имеет своей целью обоснование методики определения координат ЦТ так называемого «мертвого запаса» — груза, который не имеет коммерческого характера, явно выраженных массово-габаритных характеристик и конкретного размещения на судне. На практике «мертвый запас» строго принимают во внимание только при определении по осадкам массы принятого или сданного груза, т. е. при использовании метода драфт-сюрвея [7]–[11], когда имеет значение только его величина, но не координаты ЦТ. Большинство компьютерных программ для расчета остойчивости также требуют ввода информации о «мертвом запасе», однако при известной его массе абсцисса и аппликата для этого «груза» вводятся в большинстве случаев произвольно или установлены по умолчанию и каких-либо общепринятых методик оценки этих величин не существует.

На первый взгляд, масса, соответствующая «мертвому запасу», имеет на практике такие небольшие значения, что погрешности, вызванные незнанием координат его ЦТ, не могут привести при расчетах к критичным погрешностям метацентрической высоты. Однако любая методика, реализация которой приводит к уточнению критериев остойчивости с минимальными затратами вычислительных и иных ресурсов, играет положительную роль при выполнении процедуры оценки остойчивости. В случае наличия возможности избежать игнорирования каких-либо погрешностей необходимо ею воспользоваться. Кроме того, экипаж и груз, например, имея меньшую, чем «мертвый запас» массу, в программах по расчету остойчивости учитываются отдельными статьями нагрузки со своими координатами ЦТ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящее время на судах перевозят огромное количество таких грузов, массу которых невозможно определить визуально, также очень затруднительно подсчитать точное количество груза, которое может поместиться в трюм. Речь идет о перевозке зерна, бокситов, удобрений и многих других навалочных, насыпных и наливных грузов. Очень часто их количество определяется уже на борту судна, зная его осадку и значения постоянных составляющих нагрузки [7]–[11]. Подобный метод определения массы груза называется *драфт-сюрвей*. Суть его заключается в том, что по рассчитанной средней осадке определяют водоизмещение судна, находят поправки к нему и вычисляют истинное водоизмещение судна. Далее путем замеров определяют массу всех переменных запасов. Массу груза вычисляют как разность водоизмещений *до* и *после* погрузки / выгрузки с учетом изменения массы переменных запасов.

Понятие «мертвый запас» не принято к официальному употреблению в литературе, вместо него чаще употребляется понятие «судовая постоянная», или «константа» [11]. Однако в настоящей работе оно рассматривается в контексте оценки остойчивости судна, т. е. как некоторый груз со своими координатами ЦТ. Из приведенных ранее трех терминов: «мертвый запас», «судовая постоянная», «константа» понятию «груз» в большей степени соответствует термин «мертвый запас» («судовая постоянная», «константа» — это по определению только числа, характеризующие груз).

«Мертвый запас» — это разность между фактическим водоизмещением судна порожнем, определяемым путем замера осадки разгруженного судна за вычетом массы всех поддающихся измерению находящихся на борту грузов (запасов), и массой порожнего судна, указанной в судовых документах. Последняя, известная в результате процедуры кренования, сообщается судостроителем. Однако подобное определение не дает понимания состава «мертвого запаса».

В общем случае под «мертвым запасом» следует понимать любую неучтенную, вследствие неизмеряемости или других причин, нагрузку на борту судна, т. е. все то, что нельзя точно про-

считать и что находится на судне постоянно без изменения в течение всего времени проведения грузовых работ. В первую очередь, к «мертвому запасу» относятся остатки жидких грузов в опорожненных танках, цепных ящиках, цистернах, оставшиеся в них ил, грязь, ржавчина, краска на корпусе и надстройках судна и т. п. Причиной остатков жидкости в танках и цистернах может служить неправильная форма днища танка, которая подверглась разрушению от ржавчины или его деформация вследствие удара. Кроме того, из-за влияния ржавчины, может быть повреждена осушительная магистраль в трюме, вследствие чего невозможно полное удаление жидкого груза. Каждый сантиметр жидкости, который не удалось откачать, оказывает влияние на величину «мертвого запаса». Также к «мертвому запасу» можно отнести судовое оборудование, которое не было предусмотрено при начальной постройке судна, но в силу специфики перевозимых грузов и особенностей портов захода стало неотъемлемой его частью. К последнему можно отнести шифтингбордсы — съемные трюмные переборки, устанавливаемые при погрузке некоторых видов сыпучих грузов, а иногда также для того, чтобы разделить между собой некоторые насыпные грузы, что позволяет перевозить несколько разных видов сыпучих грузов одновременно, исключив их перемешивание. Вес одной такой переборки может достигать нескольких тонн. К «мертвому запасу» относятся также и другие механизмы для крепления груза, а именно: стойки для крепления некоторых грузов на крышках трюмов, твистлоки, талрепы и другие устройства для крепления контейнеров на палубе.

Часто суда, которые имеют свои краны, перевозят на палубе грейферы, используемые для разгрузки / погрузки. Такая ситуация характерна для регионов, где местные порты не всегда могут предоставить свои грузозахватные приспособления. По этой же причине возможны перевозки различных спредеров и других устройств, предназначенных для подъема грузов. Новое оборудование на судне может появиться и при смене района плавания. Например, для того, чтобы судно могло зайти в некоторые порты Канады, на нем необходимо установить специальные стрелы, которые используют для подачи швартовных концов. Подобные требования для захода судна устанавливают портовые власти.

В судовой документации вес этого оборудования чаще всего не учитывается, так как оно появилось на судне уже после его постройки, зачастую спустя некоторое время после начала его эксплуатации. Суда продаются, экипажи сменяются и иногда вновь прибывший вахтенный помощник капитана уже не знает, внесены ли такие элементы в документацию и программы для расчета остойчивости или нет. Конечно, вес каждого отдельного приспособления и оборудования незначителен и не может оказать серьезного влияния на результаты драфт-сюрвея, однако их сумма, в совокупности с накопившейся на судне неоткачанной водой, грязью и ржавчиной, дает большую погрешность.

К «мертвому запасу» иногда относят также слой снега со льдом, которыми покрывается судно при работе в северных регионах [12]–[14]. Очевидно, что определить точное значение «мертвого запаса» в таких условиях является невыполнимой задачей. Также к «мертвому запасу» можно отнести и результаты обрастания корпуса, которое оказывает влияние на водоизмещение судна [15]. Наибольшему обрастанию подвержены судна, которые в течение длительного периода времени находятся у причала. Скорость обрастания корпуса судна зависит также от района плавания и времени года. В итоге масса судна может увеличиться на десятки тонн [16].

Наибольшей точности в определении величины «мертвого запаса» можно достичь, если вахтенные помощники будут фиксировать такие конструктивные изменения судна, которые оказывают влияние на значение этой величины (например, установка нового шифтингбордса или новой стрелы) и рассчитывать вес получаемого снабжения и различного оборудования. Желательно проводить работы по удалению грязи и воды из цепного ящика, очищать от ила балластные танки. Такие процедуры помогут избежать увеличения «мертвого запаса». Однако на многих судах, из-за интенсивной работы, возможность выполнения таких операций отсутствует. Из приведенного описания «мертвого запаса» следует, что несмотря на свое название, он не является величиной постоянной. В процессе эксплуатации судна значение «мертвого запаса» по объективным причинам (заиливание балластных танков, обрастание и др.) постепенно увеличивается. Например,

ежегодное уменьшение грузоподъемности танкеров, из-за накопления в корпусе судна ржавчины, составляет 0,2 % от массы перевозимого груза, причем ремонт и очистка не приводят к полному восстановлению грузоподъемности [12]. Масса «мертвого запаса» может изменяться на величину, измеряемую десятками тонн, достигая значений в сотни тонн.

Приведенное ранее определение «мертвого запаса» только как неучтенного груза является не совсем полным. Существует ряд причин расхождения фактической и «документальной» массы судна порожнем, не связанных с накоплением лишнего груза, которое возникает при длительной эксплуатации судна [12]. Именно эти причины могут приводить к появлению, на первый взгляд, парадоксальной ситуации, когда значение «мертвого запаса» принимается отрицательным. Так, некоторые суда используют калибровочные таблицы для балластных танков и данные по корпусу судна, разработанные для другого судна этого же типа, которое имеет некоторые отличия. Еще одна причина может заключаться в погрешностях грузовой шкалы, которая смещена выше или ниже своего реального положения. Часто причиной ошибок является дифферент судна, если его значение значительно больше допустимого [12].

Метод драфт-сюрвея выполняется только при перевозке сыпучих и навалочных грузов, т. е. когда перевозимые объекты нельзя подсчитать поштучно. При любых остальных видах грузоперевозок проведение процедуры определения количества принятого груза по осадкам не выполняется, так как количество перевозимых объектов нормируется конкретным числом и в определении масс принятого груза не возникает проблем. Таким образом, контейнеровозы, лесовозы, суда, перевозящие генеральные грузы, и прочие суда, не занимающиеся перевозкой сыпучего и навалочного материалов и поэтому не проводящие драфт-сюрвей, не имеют возможности уточнять значение массы «мертвого запаса».

Если рассматривать «мертвый запас» не только в контексте метода драфт-сюрвея, но и в целях его учета при оценке остойчивости, то следует указать еще одну его особенность. В отличие от большинства других грузов составляющие «мертвого запаса» располагаются в разных частях судна (в различных координатах), однако при расчете остойчивости во внимание принимается один (общий) центр тяжести «мертвого запаса».

Результаты (Results)

Если методика нахождения величины «мертвого запаса» понятна даже из ее определения и успех ее определяется тем, насколько точно судоводитель учитывает изменение количества различных запасов, то рекомендации по определению координат центра тяжести «мертвого запаса» до сих пор нигде не представлены. Эту величину можно найти в информации об остойчивости, однако с течением времени, по понятным причинам, это значение все больше будет отличаться от действительного. Не зная точной величины составляющих «мертвого запаса» и того, как они распределены на судне, найти точные координаты его ЦТ не представляется возможным. Для решения этой проблемы предлагается описанная далее методика оценки координат, инструментальной основой которой является судовая программа для ЭВМ, предназначенная для расчета остойчивости.

Для оценки ординаты центра тяжести (ее координаты y) примем допущение о том, что элементы, составляющие «мертвый запас», относительно диаметральной плоскости распределены равномерно. Очевидно, что это допущение можно принять $y = 0$.

Главным признаком того, что принимаемая к расчету абсцисса центра тяжести МЗ не соответствует действительной ($x_{\text{МЗ}_{\text{расч}}} \neq x_{\text{МЗ}_{\text{факт}}}$), является различие расчетных осадок носом и кормой, полученных с помощью инструмента остойчивости (программы для ЭВМ), и осадок фактических ($d_{\text{н.расч}} \neq d_{\text{н.факт}}$; $d_{\text{к.расч}} \neq d_{\text{к.факт}}$). При появлении этого признака вахтенному помощнику капитана необходимо уточнить массы жидкостей во всех цистернах и танках, и затем еще раз проверить количество принятого груза. Если ошибок не обнаружено, то необходимо изменить значение абсциссы «мертвого запаса», это следует делать в соответствии со следующим алгоритмом.

Вначале необходимо оценить направление, по которому требуется «смещать» вдоль диаметральной плоскости «мертвый запас» (в нос или в корму), т. е. определить дальнейший порядок

действий с расчетным значением абсциссы: следует ли ее увеличивать или уменьшать. Правило оценки направления смещения по осадке носом можно сформулировать следующим образом: если расчетное значение осадки больше фактического (измеренного), то абсциссу необходимо уменьшать ($d_{\text{н.расч}} > d_{\text{н.факт}} \Rightarrow x_{\text{МЗ}_{\text{расч}}} \searrow$), и наоборот, абсциссу следует увеличивать, если судно заглублено носом больше, чем это получено при расчете программным способом ($d_{\text{н.расч}} < d_{\text{н.факт}} \Rightarrow x_{\text{МЗ}_{\text{расч}}} \nearrow$).

Далее необходимо изменять (увеличивать или уменьшать — в зависимости от того как определено) значение абсциссы в соответствующей ячейке программы до того момента, пока расчетные значения осадок не совпадут с фактическими ($d_{\text{н.расч}} = d_{\text{н.факт}}$; $d_{\text{к.расч}} = d_{\text{к.факт}}$). Зафиксированное в этот момент значение абсциссы и будет являться фактическим (или, точнее, вероятнейшим) для «мертвого запаса» ($x_{\text{МЗ}_{\text{расч}}} = x_{\text{МЗ}_{\text{факт}}}$). В итоге для определения абсциссы ЦТ «мертвого запаса» необходимо, варьируя в программе по расчету остойчивости значение x, получить значения снятых (измеренных) осадок.

Аналогичным образом определяется и аппликата центра тяжести: ее изменением необходимо добиться, чтобы аналитически рассчитанное значение поперечной метацентрической высоты совпало с ее значением, полученным опытным путем. Однако альтернативные программному экспериментальные методы определения h не настолько просты и очевидны, как алгоритм снятия осадок. Так, для опытной оценки поперечной метацентрической высоты можно использовать известную «капитанскую» формулу [17]–[19]:

$$\tau_0 = CB/\sqrt{h}, \tag{1}$$

где τ_0 — период бортовой качки судна на тихой воде; B — ширина судна; C — эмпирический коэффициент, зависящий от форму судна, наличия и размеров скуловых и килей и других выступающих частей.

Из «капитанской» формулы следует выражение

$$h = \left(CB/\tau_0\right)^2. \tag{2}$$

Недостаток использования формулы (2) заключается в том, что при расчете довольно затруднительно обеспечить достаточную точность определения h. Иные экспериментальные методы (например, кренование) являются очень трудоемкими. На практике можно использовать *упрощенный эвристический метод*, заключающийся в формулировании и использовании следующей системы правил:

– если есть основание предполагать, что массу «мертвого запаса» составляют только остатки жидких грузов в танках и цистернах, то аппликату его центра тяжести следует принимать исходя из того, что вся масса находится в самом «высоком» танке или цистерне;

– если есть основание предполагать, что по вертикали «мертвый запас» распределен равномерно до верхней палубы (например, вместе с неоткачанными жидкостями частью «мертвого запаса» являются размещенные на палубе, равные этим жидкостям по массе малогабаритные устройства и приспособления), то за аппликату «мертвого запаса» следует принимать половину высоты надводного борта;

– если есть основание предполагать, что по вертикали «мертвый запас» распределен равномерно по всей высоте судна (например, вместе с неоткачанными жидкостями частью «мертвого запаса» являются размещенные на палубе, равные этим жидкостям по массе, «высокие» приспособления), то за аппликату «мертвого запаса» следует принимать высоту надводного борта.

Очевидно, что представленные правила являются:

– гипотетическими;

– допускающими множество промежуточных правил;

– основанными на принципе «держать себя ближе к опасности»;

– требующими конкретизации для каждого судна;

– зависящими от грамотности лица, их формулирующих и применяющих, и от его внутреннего восприятия потенциальной опасности, которая может появиться из-за погрешности принятой к расчету аппликаты.

Обсуждение (Discussion)

Демонстрацию практического применения описанной ранее методики проведем с использованием программного обеспечения для расчета остойчивости, используемого на реальном судне — балкере валовой вместимостью 5629 и длиной 108,2 м, находящемся в балласте. Первоначально принималось, что «мертвый запас» массой 95 т размещался в координатах $x_1 = LCG = 10$ м и $z_1 = VCG = 2{,}21$ м и создавал моменты $M_{x1} = 950$ т · м и $M_{z1} = 209{,}95$ т · м. При этом расчетная осадка оказалась равной: носом — $d_{\text{н.расч1}} = T_{fcorr1} = 2{,}99$ м, кормой — $d_{\text{к.расч1}} = T_{acorr1} = 4{,}90$ м (рис. 1).

	W	LCG	Mx	VCG	Mz
Container	0	18	0,00	12,5	0,00
Constanta	95	10	950,00	2,21	209,95
	95	10,00	950,00	2,21	209,95

	W	LCG	Mx	VCG	Mz	FSM
Light Ship	3029,2	-5,826	-17648,12	7,772	23542,94	
Cargo	0	0,00	0,00	0,00	0,00	
DWT	2708,43	5,60	15158,79	2,51	6808,80	804,40
Displacement	5737,63	-0,43	-2489,33	5,29	30351,75	804,40

LCG	-0,43	GM'	0,14	Dencity	1,025	Propeller	143%
LCB	2,78	KG=VCG	5,29	TRIM	-1,91	FW corr	0,00
BG	-3,21	TKM	8,73	Tmean	3,90		
LCF	1,93	GM	3,30	TF	2,97	Tf corr	2,99
MTC	96,25	KG'	5,43	TA	4,89	Ta corr	4,90

Рис. 1. Осадки судна и поперечная метацентрическая высота, полученные при исходных значениях координат центра тяжести «мертвого запаса»

Фактические осадки оказались следующие: $d_{\text{н.факт1}} = 3{,}04$ м, кормой — $d_{\text{к.факт1}} = 4{,}84$ м. Поскольку имеет место неравенство $d_{\text{н.расч1}} < d_{\text{н.факт1}}$, значение абсциссы центра тяжести «мертвого запаса» следует увеличивать.

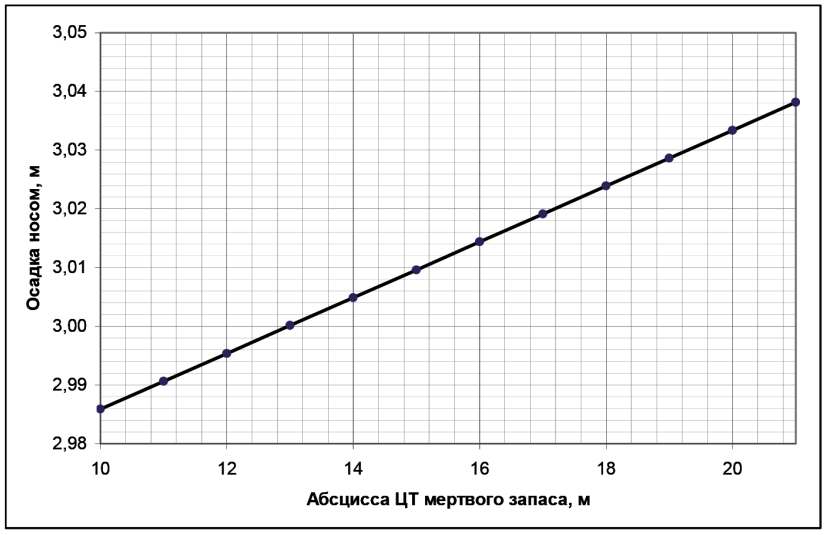


Рис. 2. Процесс изменения значений осадки судна носом при увеличении абсциссы центра тяжести «мертвого запаса»

В процессе вычислительного эксперимента увеличение массы производили с дискретностью в 1 м (рис. 2). В итоге при значении аппликаты «мертвого запаса» $x_2 = 21$ м расчетная и фактическая осадки носом оказались равны (рис. 3).

	W	LCG	Mx	VCG	Mz
Container	0	18	0,00	12,5	0,00
Constanta	95	21	1995,00	7,88	748,60
	95	21,00	1995,00	7,88	748,60

	W	LCG	Mx	VCG	Mz	FSM
Light Ship	3029,2	-5,826	-17648,12	7,772	23542,94	
Cargo	0	0,00	0,00	0,00	0,00	
DWT	2708,43	5,98	16203,79	2,71	7347,45	804,40
Displacement	5737,63	-0,25	-1444,33	5,38	30890,40	804,40

LCG	-0,25	GM'	0,14	Dencity	1,025	Propeller	141%
LCB	2,78	KG=VCG	5,38	TRIM	-1,81	FW corr	0,00
BG	-3,03	TKM	8,73	Tmean	3,90		
LCF	1,93	GM	3,21	TF	3,03	Tf corr	3,04
MTC	96,25	KG'	5,52	TA	4,83	Ta corr	4,84

Рис. 3. Осадки судна и поперечная метацентрическая высота, полученные при измененных (откорректированных) значениях координат центра тяжести «мертвого запаса»

Для оценки аппликаты ЦТ «мертвого запаса» первоначально рассчитаем эмпирический коэффициент C «капитанской» формулы (1), используя следующее его представление, данное в публикации [17]:

$$C = 0,7487 + 0,0456\,B/d_{cp} - 0,000864L. \tag{3}$$

В этом случае $C = 0,7487 + 0,0456 \cdot 18,2/3,94 - 0,000864 \cdot 108,2 = 0,866$.

Таким образом, формулу (2) можно переписать следующим образом (для рассматриваемого судна):

$$h = (0,866 \cdot 18,2/\tau_0)^2 = 248,3/\tau_0^2, \tag{4}$$

и представить для наглядности графически (рис. 4).

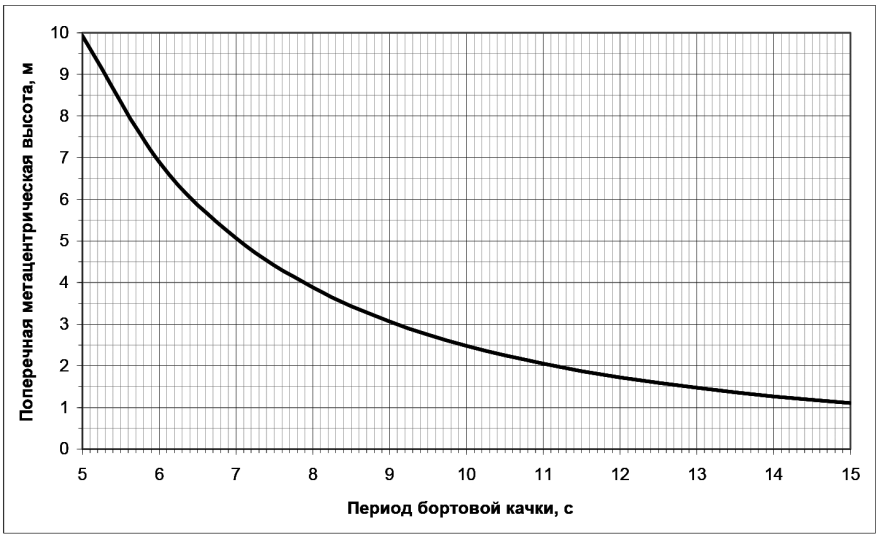


Рис. 4. Зависимость поперечной метацентрической высоты от периода бортовой качки для рассматриваемого варианта посадки судна (капитанская формула)

В дальнейшем принимаем к анализу измеренное значение периода собственных колебаний судна τ_0 = 8,8 с и используя формулу (4) или рис. 4, получим $h_{факт}$ = 3,21 м. Очевидно, что рассчитанная поперечная метацентрическая высота отличается в меньшую сторону от полученной

программным способом при $z_1 = VCG = 2{,}21$ м и $h_{пр} = GM = 3{,}30$ м (см. рис. 1). Следовательно, к расчету в программе принимается заниженное значение аппликаты центра тяжести и ее необходимо увеличивать. На рис. 5 представлена полученная в результате расчета в программе зависимость поперечной метацентрической высоты от аппликаты центра тяжести «мертвого запаса». По этому графику определяем, что при $h = 3{,}21$ м будет иметь место и устанавливаем последнее значение в соответствующую ячейку (см. рис. 3). Аналогичный результат можно получить, используя кривую зависимости аппликаты ЦТ «мертвого запаса» от периода бортовой качки судна (рис. 5).

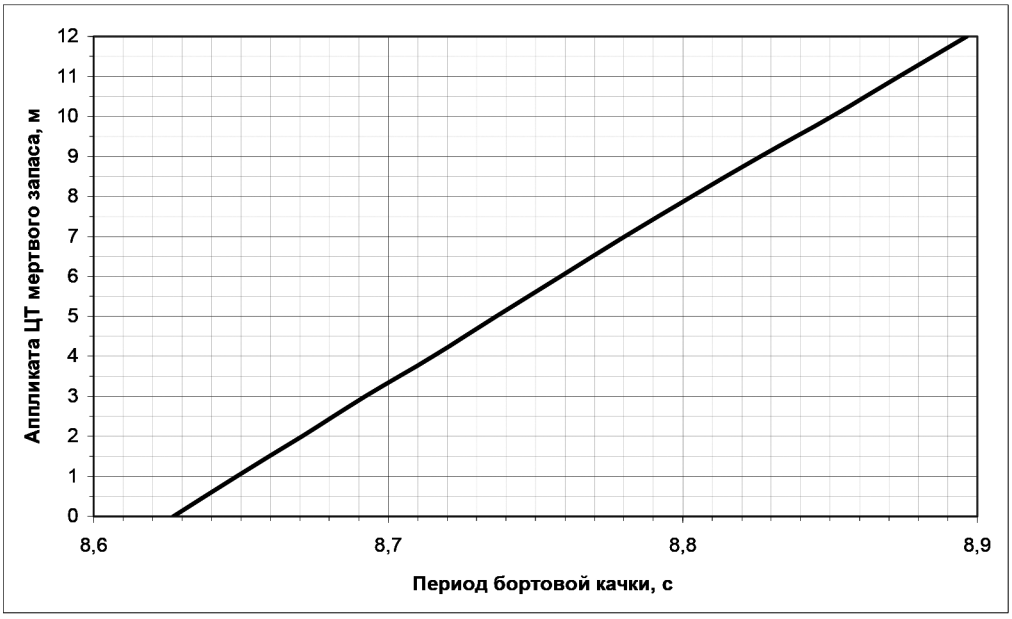


Рис. 5. Зависимость аппликаты центра тяжести «мертвого запаса» от периода бортовой качки для рассматриваемого варианта посадки судна

Таким образом, имеем, что погрешность аппликаты ЦТ «мертвого запаса», равная 5,57 м, привела к погрешности поперечной метацентрической высоты, равной 9 см.



Рис. 6. Зависимость расчетного значения поперечной метацентрической высоты судна от вводимой аппликаты центра тяжести «мертвого запаса» для рассматриваемого варианта посадки судна

В целях более полного анализа такой погрешности был построен график (рис. 6), на основе которого можно сделать вывод о том, что погрешность поперечной метацентрической высоты, обусловленная некорректным вводом аппликаты ЦТ «мертвого запаса», может достигать 20 см.

Заключение (Conclusion)

Научно-технический прогресс и сопровождаемое его развитие технологий (в том числе вычислительных) позволили автоматизировать большую часть процесса расчета остойчивости судна и повысить точность вычислений. Однако вследствие различных причин, связанных, в первую очередь, с приближениями и допущениями в отношении исходных для расчета данных, погрешности вычислений еще нельзя однозначно и без отрицательных последствий считать «практически нулевыми», допустимыми и не оказывающими влияния на решения по обеспечению остойчивости. Одна из таких причин, которая является предметом рассмотрения в настоящей статье, заключается в некорректном учете при расчете остойчивости «мертвого запаса» и координат его центра тяжести, значения которых определяются (уточняются по отношению к предустановленным) интуитивно, без какого-либо научного обоснования, несмотря на то, что масса «мертвого запаса» имеет, как правило, небольшие значения как в абсолютном, так и в процентном отношении. Некорректное указание координат его ЦТ приводит к появлению погрешностей в расчете поперечной метацентрической высоты, которые при небольшом запасе остойчивости судна могут вызвать ошибки в ее оценке. Предложенная в статье методика определения (оценки) координат центра тяжести «мертвого запаса», основанная на использовании «штатного» судового программного обеспечения, позволяет свести эти погрешности к возможному минимуму.

Для оценки координат необходимо с помощью изменений их значений, указанных в соответствующих ячейках программы для ЭВМ, привести значения осадок судна и поперечной метацентрической высоты к фактическим, полученным иным (опытным) способом. Полученные однократно значения координат ЦТ можно использовать в дальнейшем при расчетах в течение длительного периода времени до того, как появятся основания считать, что «мертвый запас» принципиально изменил свое содержание и местоположение. Кроме того, значения координат, полученные при помощи представленной методики, в отдельных случаях позволят оценить или переоценить характер «мертвого запаса» (его содержание), выявить конкретные элементы, составляющие его массу и учесть их (если это возможно) при расчете остойчивости вне «мертвого запаса». Следует отметить, что исходя из содержания метода расчетного определения осадок судна и поперечной метацентрической высоты и вследствие присутствующей некоторой неопределенности природы «мертвого запаса», представленная в данной работе методика оценки координат, по сути, является методикой оценки моментов M_x и M_z, вызываемых «мертвым запасом», однако это не оказывает влияния на алгоритм ее практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Суслов А. Н.* Система оперативной оценки остойчивости судна / А. Н. Суслов, В. Ю. Семёнова, М. А. Кутейников // Морской вестник. — 2016. — № 2 (58). — С. 111.

2. *Бугаев В. Г.* Обеспечение вместимости, посадки и начальной остойчивости в задачах оптимизации судов / В. Г. Бугаев, Т. М. До, В. Т. Дам // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2019. — № 4 (41). — С. 55–63. DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-5.

3. *Великанов Н. Л.* Остойчивость рыболовных судов на промысле / Н. Л. Великанов, С. И. Корягин, В. В. Ярисов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2014. — № 37. — С. 23–28.

4. *Болгарчук В. С.* Некоторые несоответствия требований обязательных инструментов ИМО в нормировании остойчивости судна, перевозящего зерно навалом с учетом действия сильного ветра и волнения (критерий погоды) / В. С. Болгарчук // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2012. — № 1 (1). — С. 24–27.

5. *Якута И. В.* К вопросу определения погрешностей, возникающих при расчетах остойчивости судна в судовых компьютерных программах / И. В. Якута, Б. С. Гуральник // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 3. — С. 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-7-15.

6. *Царик Р. С.* Оценка влияния положения центра тяжести контейнера на метацентрическую высоту контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70.

7. *Якута И. В.* Оценка расхождения масс принятого и сданного грузов при определении массы по осадкам (методом драфт-сюрвея) / И. В. Якута, С. В. Ермаков // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2016. — Т. 19. — № 4. — С. 822–829. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-4-822-829.

8. *Ермаков С. В.* К вопросу определения погрешностей водоизмещения при снятии осадок методом драфт-сюрвея / С. В. Ермаков, И. В. Якута // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4-3 (42). — С. 103–108.

9. *Телегин А. Н.* Проблема определения массы навалочных грузов по осадке судна / А. Н. Телегин, А. О. Ничипорук, В. Н. Шабров // Речной транспорт (XXI век). — 2013. — № 4 (63). — С. 83–86.

10. *Тимченко Т. Н.* Актуальные проблемы определения массы насыпных грузов методом «драфт-сюрвей» / Т. Н. Тимченко, М. В. Бухтенко // Научное обозрение. — 2017. — № 19. — С. 104–108.

11. *Письменный М. Н.* Определение количества груза по осадкам судна / М.Н. Письменный. — 2-е изд. — Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2006. — 45 с.

12. *Донцов С. В.* Методика проведения драфт-сюрвея / С. В. Донцов. — Одесса: ОНМА, 2014. — 34 с.

13. *Монинец С. Ю.* Роль прогнозирования рисков в обеспечении безопасности судоходства в сложных климатических условиях / С. Ю. Монинец, А. И. Баженова // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2018. — Т. 21. — № 4. — С. 558–565. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-4-558-565.

14. *Ершов А. А.* Рекомендации по действиям в чрезвычайных ситуациях в ледовых условиях плавания / А. А. Ершов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 17–26. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-17-26.

15. *Абачараев М. М.* Перспективные разработки по борьбе с морским обрастанием / М. М. Абачараев, И. М. Абачараев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 3. — С. 7–9.

16. *Карпов В. А.* Комплексный подход к защите от морского обрастания и коррозии / В. А. Карпов [и др.]; Подод ред. И. Н. Ильина. — М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. — 155 с.

17. *Шарлай Г. Н.* Обеспечение остойчивости, прочности корпуса и непотопляемости морского судна: учеб. пособие / Г. Н. Шарлай. — М., 2007. — 188 с.

18. *Антоненко С. В.* Практическая оценка остойчивости в открытом море по капитанской формуле / С.В. Антоненко // Интернет-журнал СахГУ: Наука, образование, общество. — 2009. — № 1. — С. 12.

19. *Лупина Т. О.* Задача о собственных колебаниях судов / Т. О. Лупина // Водный транспорт. — 2015. — № 2 (23). — С. 251–255.

REFERENCES

1. Suslov, A. N., V. Yu. Semenova, and M. A. Kuteinikov. “Sistema operativnoi otsenki ostoichivosti sudna.” *Morskoi vestnik* 2(58) (2016): 111.

2. Bugaev, Victor, Tat Manh Do, and Van Tung Dam. “Trim and draft, capacity and initial stability optimization solutions for the vessels.” *The Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin* 4(41) (2019): 55–63. DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-5.

3. Velikanov, N. L., S. I. Koryagin, and V. V. Yarisov. “Ostoichivost’ rybolovnykh sudov na promysle.” *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 37 (2014): 23-28.

4. Bolgarchuk, V. S. “Some differences in IMO requirements regarding the Mandatory instruments in the regulation of ship stability carrying grain in bulk, considering severe wind and rolling conditions (weather criterion).” *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 1(1) (2012): 24–27.

5. Yakuta, Irina Vladimirovna, and Boris Samuilovich Guralnik. “To the question of defining errors arising in the analysis of ship stability in ship computer software.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2019): 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-7-15.

6. Tsarik, Ruslan Stanislavovich, and Denis Aleksandrovich Akmaykin. "Evaluation of influence of container's center of gravity position on container ship's metacentric height." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70.

7. Yakuta, I. V., and S. V. Ermakov. "Evaluation difference between mass of received cargo and mass of handed over the cargo in the determination of the masses by draft survey." *Vestnik of MSTU* 19.4 (2016): 822–829. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-4-822-829.

8. Ermakov, Sergey V., and Irina V. Yakuta. "Error estimation of water displacement when counting drafts by the draft-survey method." *Marine Intelligent Technologies* 4-3 (42) (2018): 103–108.

9. Telegin, A. N., A. O. Nichiporuk, and V. N. Shabrov. "Problema opredeleniya massy navalochnykh gruzov po osadke sudna." *River transport (XXIst century)* 4(63) (2013): 83–86.

10. Timchenko, Tat'yana Nikolaevna, and Mikhail Vladmirovich Bukhtenko. "Relevant problems of determining the mass of bulk cargo by the draft survey method." *Nauchnoe obozrenie* 19 (2017): 104–108.

11. Pis'mennyi, M. N. *Opredelenie kolichestva gruza po osadkam sudna*. Vladivostok: MGU im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2006.

12. Dontsov, S. V. *Metodika provedeniya draft-syurveya*. Odessa: ONMA, 2014.

13. Moninets, S. Yu., and A. I. Bazhenova. "The safety of navigation in difficult climatic conditions: Forecasting of risks." *Vestnik of MSTU* 21.4 (2018): 558–565. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-4-558-565.

14. Ershov, Andrey A., and Pavel I. Petuhov. "Recommendations for emergency response in ice conditions of navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 17–26. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-17-26.

15. Abacharaev, Musa Magomedovich, and Ibragim Musaevich Abacharaev. "Perspective developments on marine fouling control." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2011): 7–9.

16. Karpov, V. A. [et al]. *Kompleksnyi podkhod k zashchite ot morskogo obrastaniya i korrozii.* Edited by Il'in, I.N. M.: Tovarishchestvo nauchnykh izdanii KMK, 2007.

17. Sharlai, G. N. *Obespechenie ostoichivosti, prochnosti korpusa i nepotoplyaemosti morskogo sudna. Uchebnoe posobie prednaznacheno dlya kursantov i studentov morskikh uchebnykh zavedenii*. M., 2007.

18. Antonenko, Sergey V. "Practical Stability of the Ship Estimation by Using the Captain's Formula on the Open Sea." *Internet-zhurnal SakhGU: Nauka, obrazovanie, obshchestvo* 1 (2009): 12.

19. Lupina, T. "The tasks of the natural oscillations of the ships." *Vodnyi transport* 2(23) (2015): 251–255.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ермаков Сергей Владимирович —
кандидат технических наук
Балтийская государственная академия
рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО
«Калининградский государственный технический
университет»
236035, Российская Федерация, г. Калининград,
ул. Молодежная, 6
e-mail: *esv.klgd@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ermakov, Sergey V. —
PhD
Baltic Fishing Fleet State
Academy FSBEI HE
«Kaliningrad State Technical University»
6 Molodezhnaya Str.,
Kaliningrad, 236035,
Russian Federation
e-mail: *esv.klgd@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2020 г.
Received: April 13, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-504-514

NETWORK MODELING OF THE TANKERS CHARTERING PROCESS AS AN ELEMENT OF COMMERCIAL WORK DIGITALIZATION IN WATER TRANSPORT

M. D. Diakonova

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

The emergence of "Industrialization 4.0" concept in Germany has received wide interest from European countries and Russia. The idea of creating a suitable digital platform that unites all sectors of the country economy in a single place is promising for the domestic transport industry development. In particular, the digitalization of chartering, operation and maintenance of the fleet within a single electronic platform could reduce the time spent on the certain operations, improve communication between shipowners and charterers, as well as between departments and technical services of the transport company, and convert most of the documentation to electronic format, reduce part of the company costs. In order to realize this idea, it is necessary to have a well-designed schedule of the decision chain of not only the office personnel of the shipowning company, but also of all structures involved in sea and water transport.

In the framework of this paper, applying a network modeling method to build a model of the decisions sequence of office workers in water transport is proposed. For this, it is proposed to consider one of the commercial processes in sea and river transport, namely, chartering of tonnage. So, for the purposes of the study, a network diagram of the decision chain when the charter is being agreed and made is built, a series of experiments showing the rules of changing the temporal values of this process is carried out, an analysis of the reasons affecting these changes is made. Based on the work results, a forecast regarding changes in document management, in operational and communication processes after the electronic platforms introduction in the work of freight departments of the water transport enterprises is made.

Keywords: network modeling, commercial work in the water transport, chartering, digitalization.

For citation:
Diakonova, Mariia D. "Network modeling of the tankers chartering process as an element of commercial work digitalization in water transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 504–514. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-504-514.

УДК 656.09

СЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРАХТОВАНИЯ ТАНКЕРОВ КАК ЭЛЕМЕНТ ЦИФРОВИЗАЦИИ КОММЕРЧЕСКОЙ РАБОТЫ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

М. Д. Дьяконова

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

Отмечается, что появление и развитие европейской концепции «Индустриализация 4.0» получило широкий интерес со стороны транспортной отрасли и идея создания единой цифровой платформы, объединяющей на общей информационной базе всех операторов и клиентов транспортного рынка, является перспективной для развития и отечественной транспортной отрасли. В частности, цифровизация коммерческой работы, охватывающей процессы фрахтования судов, планирования и оформления материальных и финансовых транзакций, может обеспечить снижение временных издержек при проведении тех или иных операций, улучшить коммуникации между судовладельцами и фрахтователями, перевозчиками грузовладельцами и транспортными экспедиторами, а также департаментами и техническими службами транспортной компании, перевести большую часть документации в электронный формат, снизить

часть расходов компании. Чтобы реализовать данную идею, необходимо иметь простроенный график цепи решений не только офисного персонала компании-судовладельца, но и всех структур, причастных к морскому и водному транспорту.

В рамках данной статьи предлагается применить способ сетевого моделирования для построения модели последовательности решений, принимаемых офисными работниками на водном транспорте. Для этого предлагается рассмотреть один из ключевых коммерческих процессов морских и речных перевозок, а именно фрахтование тоннажа. Так, для исследования построен сетевой график цепи решений при согласовании и заключении чартера, проведен ряд экспериментов, устанавливающих законы изменения временных величин данного процесса, выполнен анализ причин, оказывающих влияние на эти изменения. На основе результатов работы сделан прогноз в отношении изменения документооборота, а также оперативных и коммуникативных процессов после внедрения электронных платформ в работу фрахтовых подразделений предприятий водного транспорта.

Ключевые слова: сетевое моделирование, коммерческая работа на водном транспорте, фрахтование, цифровизация.

Для цитирования:
Дьяконова М. Д. Сетевое моделирование процесса фрахтования танкеров как элемент цифровизации коммерческой работы на водном транспорте / М. Д. Дьяконова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 504–514. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-504-514.

Введение (Introduction)

Возникшая в 2011 г. немецкая идея «Индустриализация 4.0», основной смысл которой заключается в переводе отраслей экономики на кибернетические технологии, получила высокую оценку и была принята за основу государственных программ в США, Китае, а также развитых европейских странах, таких как Великобритания, Франция, Бельгия и др. Следует отметить, что в рамках реализации данной идеи ведутся разработки цифровой платформы, которая могла бы объединить отрасли экономики в едином цифровом пространстве. На сегодняшний день в Российской Федерации также проводится реализация соответствующей государственной программы [1], и российские отраслевые специалисты ведут разработки электронной платформы для нужд участников перевозочных процессов на водном транспорте.

Учитывая, что транспортная отрасль является неотъемлемым участником общемировых экономических процессов, такая платформа должна здесь тоже последовательно применяться. Очевидно, что для реализации такого проекта перед специалистами IT-индустрии необходимо корректно сформулировать техническое задание, которое наглядно продемонстрирует схему работы отрасли, которая находится в основе работы цифровой платформы. Поскольку данная тема является крайне актуальной, в научном сообществе активно ведутся различного рода исследования данного вопроса. Так, в статье [2] рассматривается проблема массового перевода навигационно-гидрографического обеспечения на цифровые продукты, в результате чего появилась необходимость включения в план Международной морской организации (ИМО) глобальной стратегической программы e-Navigation. В исследовании [3] сделан вывод о том, что актуализация перспективного направления повышения эффективности и обеспечения доступности транспортной отрасли возможна на основе декомпозиции потоковых процессов в транспортном пространстве.

В исследовании [4] показана заинтересованность в развитии, стандартизации и использовании электронной платформы в таможенном оформлении и управлении, оцифровке и упрощении документооборота, а также данное исследование свидетельствует о наличии перспектив развития блокчейн-технологии и ее применения в организации морской перевозки. В работе [5] исследована гипотеза о том, что вопросы устойчивости в форме атрибутов транзакций должны быть определены и приняты во всем мире, прежде чем блокчейн-технологии могут быть полностью реализованы в развитии судоходной отрасли. В то же время в работе [6] сделан вывод о том, что несмотря на важность внедрения инноваций (включая технологию блокчейн), из-за отсутствующего рыночного стандарта, регулирующие и государственные органы могут представлять собой потенциальное препятствие для полного внедрения технологии цепочки блоков в морском секторе.

Авторы статьи [7] считают, что внедрение разработанной ими цифровой вычислительной процедуры принятия решений по размещению и креплению груза в подвижном составе с учетом прогнозных параметров его сдвига при условии движения позволит повысить качество работы транспортной системы и уровень ее безопасности по всем направлениям деятельности. Авторами исследования [8] предложены вычислительный алгоритм и процедура оптимизации функционирования логистической системы, позволяющие сократить время, необходимое на перемещения грузопотока из исходного в конечный пункт, согласно критерию качества, за счет выбора кратчайших маршрутов по звеньям транспортной сети. В статье [9] авторы приходят к выводу о том, что цифровые платформы, в основе которых лежит технологическая совместимость и технология адаптивного управления, повысят производительность организационных систем, осуществляющих хозяйственную деятельность. В работе [10] выводы проведенного исследования показывают, что цифровизация может не только позитивно сказаться в работе компании и отрасли в целом, но также способна начать расшатывать сложившуюся отраслевую структуру за счет разрыва между развитием и внедрением цифровых технологий и знаниями сотрудников компании, как ими грамотно пользоваться. Поскольку для большинства компаний люди являются наиболее важным активом, необходимо создать условия, при которых сотрудники компании и специалисты отрасли могли обучаться и активно участвовать в цифровизации. Инвестиции компании в повышение квалификации сотрудников, которое также должно позитивно отразиться на их мотивации, будет стимулировать развитие коммерческой деятельности в цифровую эпоху.

Таким образом, основное внимание в процессе решения вопросов, касающихся влияния, которое оказывает внедрение кибертехнологий в транспортную отрасль, направлено на ускорение документооборота, трансформацию процессов оформления грузов государственными структурами, автоматизацию крепления грузов на транспорте, решение проблемы обучения специалистов отрасли работе с применением новейших технологий и т. д. Однако проблема цифровизации процессов работы офисных сотрудников на транспорте, в частности при фрахтовании тоннажа, в научных исследованиях пока не рассматривалась.

Целью статьи является изучение влияния работы в цифровой платформе, разработанной для транспортной отрасли, на продолжительность выполнения фрахтования танкеров типа *река – море*. Для этого необходимо решить следующие задачи:

– построение сетевой модели;

– анализ распределения времени выполнения всех работ системы в зависимости от изменения внешних факторов;

– изучение и анализ собственно внешних факторов, оказывающих влияние на систему.

Результаты проведенного исследования позволят сделать прогноз изменения документарных, оперативных и коммуникативных процессов после внедрения электронных платформ в работу фрахтового департамента на водном транспорте.

Методы и материалы (Methods and Materials)

За основу принято сетевое моделирование. Для этого вначале строится сетевая модель в виде табл. 1.

Таблица 1

Табличное представление сетевой модели фрахтования тоннажа

Описание события	Код начальной работы «*i*»	Продолжительность работы, сут	Код конечной работы «*j*»
Получено предложение по перевозке от фрахтователя	1	0,5	2
Сделан расчет предварительной ставки фрахта и принято положительное решение о начале переговоров	2	0,5	3

Окончание табл. 1

Отправлено ответное предложение фрахтователю с указанием предварительных ставок и пожеланий. Начало переговоров по деталям чартера	3	0,5; 0,5; 0,5	4, 5, 6
Переписка и согласование условий чартера	4	1	15
Отправка запроса грузоотправителю для проверки пригодности характеристик судна для порта погрузки	5	0,5	10
Отправка запроса агенту на выгрузке для проверки пригодности характеристик судна для порта выгрузки	6	0,5	7
Проверка с портом пригодности характеристик судна для грузовых операций	7	2	8
Получение подтверждения от порта о пригодности характеристик судна для грузовых операций	8	0,5	9
Отправка данного подтверждения грузополучателю-фрахтователю	9	1	15
Отправка запроса агенту для проверки пригодности характеристик судна для порта погрузки	10	0,5	11
Отправка письма в порт для проверки пригодности характеристик судна для грузовых операций	11	2	12
Получение ответа от порта о пригодности характеристик судна для грузовых операций	12	0,5	13
Отправка данного подтверждения грузоотправителю	13	0,5	14
Отправка грузоотправителем подтверждения по судну фрахтователю	14	1,5	15
Получение фрахтователем полного комплекта данных о пригодности характеристик судна для грузовых операций в выбранных портах погрузки и выгрузки	15	0,5	16
Фрахтователь подтвердил судовладельцу, что по результатам проверки судно подходит для осуществления данного рейса в выбранные порты погрузки и выгрузки	16	0,5	17
Итоги сделки согласованы и зафиксированы; фрахтователь берет время для принятия решения	17	1	18
Сделка зафиксирована	18	–	–

Приведенный блок состоит из восемнадцати «событий», каждое из которых связано временными отрезками, именуемыми «работа». В сетевом графике работа изображается стрелкой, длина которой может быть произвольной. Работа может означать действительную работу, т. е. какой-либо трудовой процесс, требующий затрат времени и ресурсов, либо ожидание, не требующее затрат труда, но которое тем не менее занимает время. Работой также может называться логическая связь, соединяющая два события и не требующая затрат времени. Такая работа называется *фиктивной* (передача / получение информации) и изображается стрелкой с пунктирной линией. Событие — это конечный результат одной или нескольких работ.

В данном блоке всего восемнадцать событий и девятнадцать работ (i; j), где i — это индекс начального события любой работы, j — индекс конечного события любой работы. Изменение величин данных работ влечет за собой изменения в графике, в том числе в нахождении его критического пути [11]. В рамках данной статьи определим, что под критическим путем графика понимается максимальный полный путь, продолжительность которого соответствует времени выполнения всего комплекса работ. Таким образом, в графике может быть несколько полных путей (L), т. е. непрерывных последовательностей выполняемых работ от начального события до конечного, но критический путь, т. е. максимальный, — один. При этом работы в данной модели исполняются

последовательно от события 1 к событию 3 и от события 15 к конечному событию 18, в то время как работы от события 3 до события 15 исполняются параллельно. Учитывая, что сетевая модель относится к процессу фрахтования судов, этот график будет вероятностным, так как в данной сети невозможно заранее точно оценить продолжительность работ. Чтобы рассчитать такие сетевые графики, нужно использовать теорию вероятности [12]. Для этого требуется провести серию экспериментов, где будет меняться время исполнения графика работ. Данные наблюдения затем необходимо свести в матрицу, в которой будет представлена дисперсия выполнения работ в разных случаях статистических наблюдений (табл. 2).

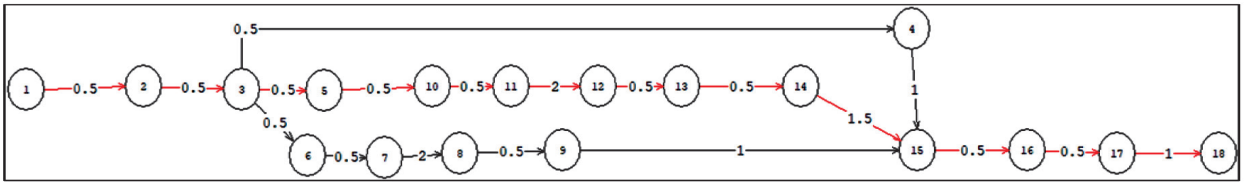
Таблица 2

Матрица дисперсии скоростей исполнения работ

Номер эксперимента	Работы (i, j), сут																		
	1,2	2,3	3,4	4,15	3,5	5,10	10,11	11,12	12,13	13,14	14,15	3,6	6,7	7,8	8,9	9,15	15,16	16,17	17,18
1	0,5	0,5	0,5	4	0,5	0,5	0,5	2	0,5	0,5	0	0,5	0,5	2	0,5	1	0,5	0,5	1
2	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	2	0,5	0,5	0	0,5	0,5	2	0,5	1	0,5	0,5	1
3	0,5	0,5	0,5	8	0,5	0,5	0,5	2	0,5	0,5	0	0,5	0,5	2	0,5	1	0,5	0,5	1
4	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	2	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	2	0,5	1	0,5	0,5	1
5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

На основе сетевой модели фрахтования тоннажа затем строятся графики 1 и 2 (рис. 1).

а)



б)

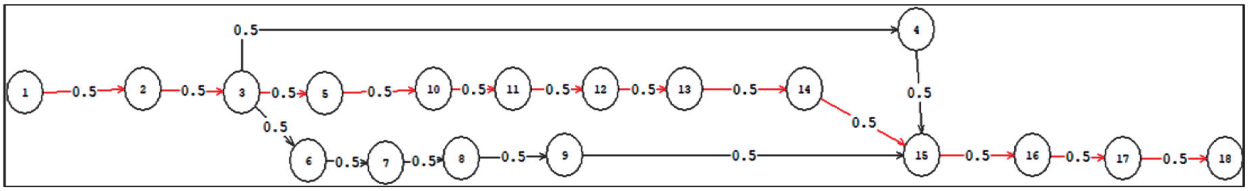


Рис. 1. Сетевой график 1 (*а*), сетевой график 2 (*б*)

На основании наблюдений, полученных на практике, в табл. 3 представлено условное распределение скорости выполнения работ при фрахтовании флота в условиях влияния факторов сезонности и районов плавания.

Таблица 3

Условная дисперсия скоростей исполнения работ при фрахтовании флота в зависимости от сезона и бассейна плавания

Сезон	Бассейн				
	Черноморский	Средиземноморский	Балтийский	Каспийский	ВВП
Весна	Высокая	Средняя	Минимальная	Высокая	Высокая
Лето	Средняя	Средняя	Средняя	Средняя	Средняя
Осень	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Минимальная
Зима	Средняя	Средняя	Средняя	Минимальная	0

За основу приняты танкеры смешанного *река – море* плавания отечественного производства, выполняющие рейсы в разное время года преимущественно в Балтийском, Каспийском, Черноморском и Средиземноморском регионах, а также на внутренних водных путях (ВВП) западной части России.

Результаты (Results)

На основании данных табл. 1 получена сетевая модель офисного труда при фрахтовании флота (см. рис. 1), на которой красными стрелками указан критический путь, равный девяти суткам. Для того чтобы определить критический путь при минимальных временных издержках, все работы приравнены к 0,5 сут (те работы, которые действительно могут занимать такое количество времени и на практике). В результате критический путь здесь равен шести суткам, что является наименьшим временем выполнения всего комплекса работ из всей серии экспериментов.

На основании данных табл. 2 проведена серия имитационных экспериментов в целях получения оценки распределения случайной величины, а именно общего времени, затраченного на согласование сделки, вплоть до получения зафиксированной сделки (рис. 2).

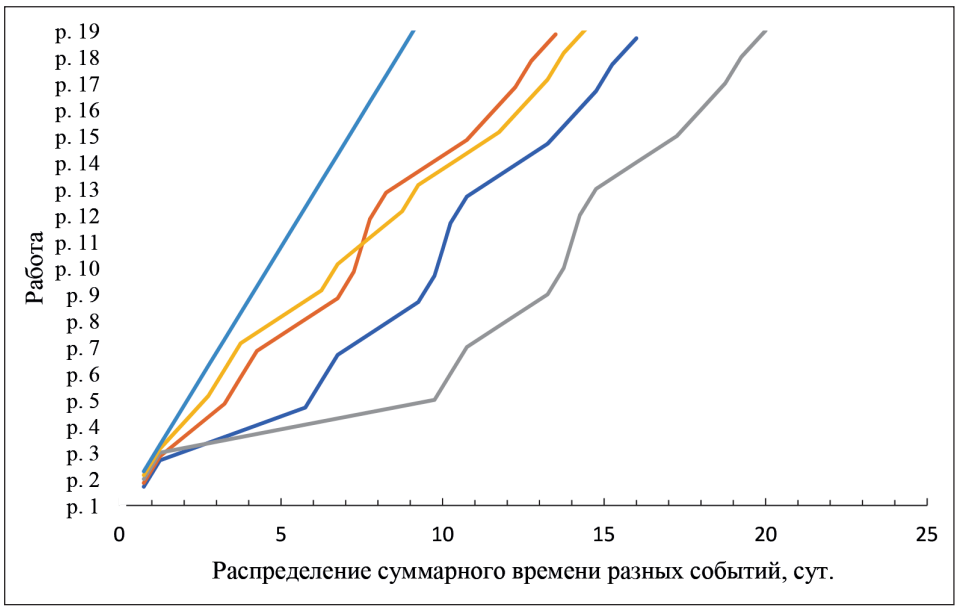


Рис. 2. Распределение суммарного времени

Условные обозначения:

— эксперимент 1; — эксперимент 2; — эксперимент 3; — эксперимент 4; — эксперимент 5

Кроме того, данные табл. 2 позволяют построить график распределения критических путей серии вариантов событий при фрахтовании тоннажа от момента получения предложения по перевозке от фрахтователя до момента получения зафиксированной сделки (рис. 3).

Полученная в результате имитационного эксперимента зависимость распределения активности фрахтования судна от сезонности представлена на рис. 4. В целях построения графиков на рис. 4 и 5 использованы данные, полученные из практики отечественной судовладельческой компании, владеющей танкерами типа *река – море*. За исходные данные, трансформированные затем в коэффициенты, наибольшим значением которых является единица, т. е. сумма всех рейсов за несколько лет, принята статистика по рейсам, которые осуществлялись на основе контрактов, подписанных в каждый из сезонов (зима, весна, лето, осень). В результате выяснилось, что наибольшее число рейсов по статистике за несколько лет было совершено по контрактам, заключенным весной и осенью. Рейсов по зимним и летним контрактам меньше в три-четыре раза. Таким образом, можно сделать вывод о том, что весной и осенью активность фрахтования судов выше,

чем летом и зимой, так как именно в эти периоды распределяются наиболее длительные, выгодные и стабильные по условиям сделки.

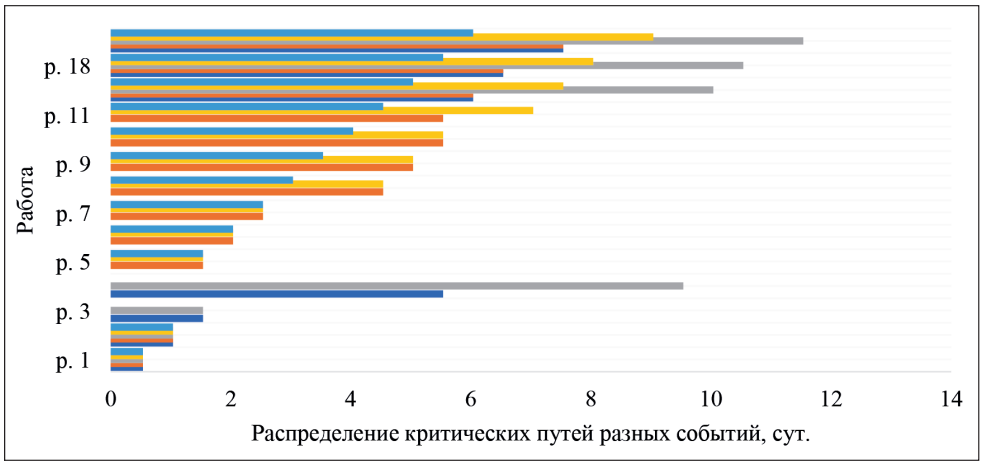


Рис. 3. Распределение критических путей

Условные обозначения:

— эксперимент 1; — эксперимент 2; — эксперимент 3; — эксперимент 4; — эксперимент 5

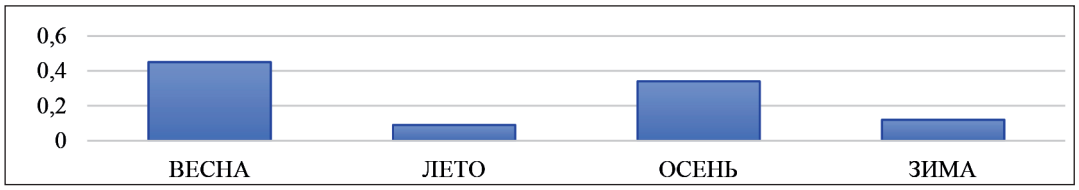


Рис. 4. Распределение активности фрахтования флота в зависимости от сезонности

На рис. 5 показано распределение активности фрахтования флота в зависимости от сезонности и региональности. По аналогии с принципом построения данного графика, на основе полученных в течение нескольких лет статистических данных, были выведены коэффициенты распределения активности фрахтования флота в зависимости от сезонности и районов расстановки тоннажа.

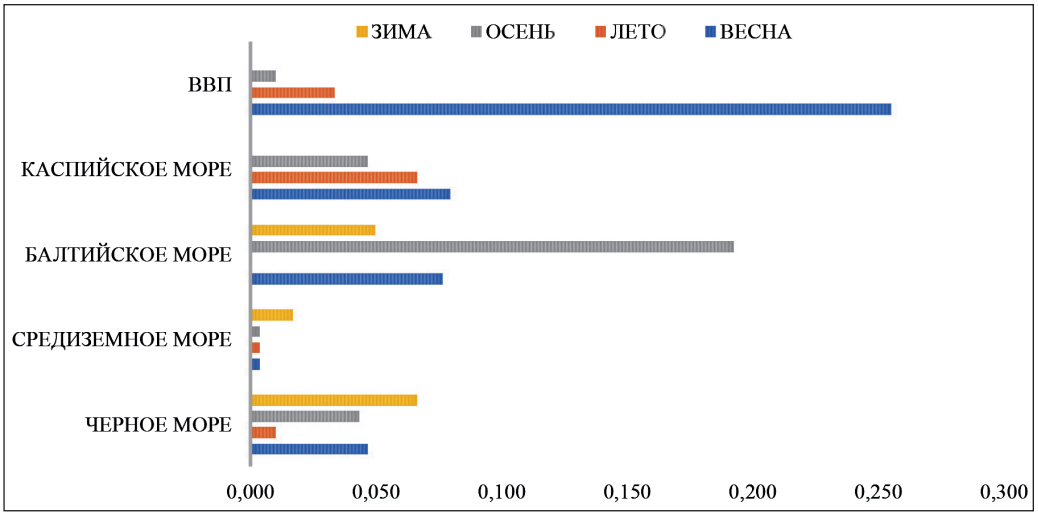


Рис. 5. Распределение активности заключения фрахтовых сделок в зависимости от сезона в различных районах плавания для отечественных судов смешанного (*река – море*) плавания

Из рис. 5 видно, что наибольшее количество рейсов совершается по весенним контрактам, когда большинство единиц флота уходит на ВВП. В то же время по завершении летней навигации наибольшая активность фрахтования осенью приходится на Балтийский регион, а зимой — на Черноморский. Данное распределение связано с тем, что в эти статистические периоды сохранялась тенденция превышения предложения над спросом в районе Балтийского моря, поэтому ранняя расстановка тоннажа на зиму могла дать преимущество при заключении выгодного договора на период зимней навигации. В Черноморском регионе ситуация была более стабильная в этом случае, поэтому резкое падение там наблюдается только летом, когда большинство единиц флота переходит на ВВП.

Обсуждение (Discussion)

Как отмечалось ранее, время работ (i, j) является величиной случайной. На практике это объясняется следующим образом. Представители компании фрахтователя раз в произвольный, либо определяемый промежуток времени N отправляют запросы на осуществление перевозки груза. В этих запросах кратко указываются количество и тип груза, порты или регионы погрузки и выгрузки; согласованный диапазон времени (ограниченный двумя датами) для подачи судовладельцем судна под погрузку — «лей-кан» (сокр. от англ. Lay-Can, что расшифровывается как Laydays — начало дней под постановку, и Cancelling Date — последняя дата); ставки фрахта, наличие комиссий. Такие запросы могут поступать конкретному контрагенту, а могут отправляться массовой скрытой рассылкой. Далее срабатывает *человеческий фактор*, который зависит от загруженности представителя судовладельца, часовых поясов, а также других причин. Поэтому скорость обработки такого запроса может варьировать от нескольких минут до нескольких часов. В случае, когда параметры запроса фрахтователя не совпадают с теми, которые готов предложить судовладелец (например, фрахтователь просит судно в Черном море, а у судовладельца весь флот в Балтийском море, и перегонять судно порожнем может быть или коммерчески невыгодно судовладельцу, или слишком дорого фрахтователю), последний может не отреагировать на запрос вовсе. Таким образом, значительное влияние на скорость исполнения работы оказывает *человеческий фактор.*

В процессе исследования было построено несколько вариаций развития событий, выделен и проанализирован критический путь каждой ситуации. Минимальное значение исполнения полной цепи событий получилось равным шести суткам. Теоретически максимальное время не ограничено, но на практике обычно все-таки оно не превышает тридцати суток. Следует отметить, что заключение сделки в период менее шести суток тоже является достаточно редким явлением и, как правило, относится к разовым сделкам при условии работы на основе данных уже выполненного в прошлом чартера с изменением только основных его параметров, таких как тип груза, количество груза, диапазон времени для подачи судна под грузовые операции, ставки фрахта и др. Тем не менее вариативность распределения времени исполнения событий достаточно высока (см. рис. 3). При этом распределение их критических путей показывает, что самый быстрый путь заключения сделки проходит через путь (*6*, *15*). Это обусловлено тем, что в данной цепи необходимость работы через посредника (в данном случае через грузоотправителя) отсутствует, в отличие от пути (*5*, *15*). Из рис. 2 видно, что самый быстрый путь из трех — это путь (*4*, *15*). Тем не менее на практике он эффективен в случаях, когда и фрахтователь, и судовладелец уже имели опыт работы в данных портах с данными терминалами и не испытывают необходимости проверять с портом техническую возможность данного судозахода.

При этом в течение года скорость фрахтования судов меняется под влиянием сезонности и относительно регионов плавания (рис. 4 и 5). Согласно данным рис. 4, весной и осенью активность фрахтования и, соответственно, скорость реагирования на запрос во время согласования сделки выше, чем летом и зимой. Обусловлено это тем, что весной и осенью идет основная расстановка тоннажа на лето и на зиму. Особенно ярко это проявляется при работе с флотом типа *река – море*, техническая конструкция которого позволяет работать и в море, и на внутренних водных путях. Так как к лету весь флот типа *река – море* в большинстве случаев уходит на ВВП,

следовательно, в близлежащих регионах, в данном случае регионы Балтийского, Средиземного и отчасти Черного морей, наблюдается спад фрахтовой активности. При этом с наступлением весны Каспийский регион, наоборот, становится более привлекательным для расстановки флота, так как появляется доступность к нему по ВВП России.

Выводы (Summary)

В целях исследования была построена сетевая модель процессов офисного труда при фрахтовании тоннажа, сделан анализ распределения времени исполнения всех работ системы в зависимости от изменения внешних факторов, изучены и проанализированы внешние факторы, оказывающие воздействие на систему. Таким образом, практически реализован синтез сетевого и имитационного моделирования, когда созданная сетевая модель представляет собой основу для последующего имитационного эксперимента. В результате была выявлена высокая стохастичность времени выполнения работ, которая тем не менее в большинстве случаев ограничена диапазоном от шести до тридцати суток. Кроме того, в процессе исследования также использовались данные, полученные от отечественной компании-судовладельца, из которых следует, что на скорость фрахтования судов оказывают влияние такие внешние факторы, как сезонность и региональность. Это вносит определенную предсказуемость в характер фрахтовой работы в то или иное время года в регионах. Так, например, весной активность фрахтования флота для работы на ВВП России будет выше, чем поздним летом, когда летняя навигация постепенно близится к завершению. Моделирование процесса фрахтования судов показало, что работа без посредников является более оперативной. Причем в данном случае под посредниками подразумеваются не только брокеры, но и агенты и грузоотправители.

Работа в цифровой платформе, при условии организации доступа и своевременного обновления данных всеми задействованными транспортными структурами по всему миру, должна позволить не только сократить сроки процесса фрахтования, но и исключить дополнительные запросы, которые контрагент может сделать напрямую в интересующий порт. Особенно это может быть ощутимо при работе с развивающимися странами, где часто агенты очень долго обрабатывают запросы или при работе с портами с большим разрывом между часовыми поясами. Таким образом, только комплексное подключение всех морских и портовых структур к единой цифровой транспортной платформе позволит существенно ускорить процессы заключения сделок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 28 июля 2017 года № 1632-р. «Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://government.ru/docs/28653/ (дата обращения: 20.02.2020).

2. *Губернаторов С.С.* Навигация будущего – стратегическая программа e-Navigation / С. С. Губернаторов // Транспорт Российской Федерации. — 2014. — № 1. — С. 52–56.

3. *Кузнецов А. Л.* Направления цифровизации транспортной отрасли / 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. — № 6. — С. 1179–1190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1179-1190.

4. *Yang C. S.* Maritime shipping digitalization: Blockchain-based technology applications, future improvements, and intention to use / C. S. Yang // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2019. — Vol. 131. — Pp. 108–117. DOI: 10.1016/j.tre.2019.09.020.

5. *Clott C.* Sustainable blockchain technology in the maritime shipping industry / C. Clott, B. Hartman, B. Beidler // Maritime Supply Chains; edited by T. Vanelslander, C. Sys. — Elsevier Inc., 2020. — Pp. 207–228. DOI: 10.1016/B978-0-12-818421-9.00011-2.

6. *Bavassano G.* Blockchain: How shipping industry is dealing with the ultimate technological leap / G. Bavassano, C. Ferrari, A. Tei // Research in Transportation Business & Management. — 2020. — № 100428. DOI: 10.1016/j.rtbm.2020.100428. (In press).

7. *Гозбенко В. Е.* Автоматизация отдельных операций перевозочного процесса с целью обеспечения достаточных условий для оптимального функционирования «цифрового» транспорта и логистики / В. Е. Гозбенко, В. А. Оленцевич, Ю. И. Белоголов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2018. — № 4 (60). — С. 125–132. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).125-132.

8. *Сахаров В. В.* Автоматизация поиска оптимальных маршрутов и грузовых потоков в транспортных сетях средствами целочисленного линейного программирования / В. В. Сахаров, И. А. Сикарев, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 647–657. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-647-657.

9. *Zatsarinnyy A .A.* Model of a Prospective Digital Platform to Consolidate the Resources of Economic Activity in the Digital Economy / A. A. Zatsarinnyy, A. P. Shabanov // Procedia Computer Science. — 2019. — Vol. 150. — Pp. 552–557. DOI: 10.1016/j.procs.2019.02.092.

10. *Genzorova T.* How digital transformation can influence business model, Case study for transport industry / T. Genzorova, T. Corejova, N. Stalmasekova // Transportation Research Procedia. — 2019. — Vol. 40. — Pp. 1053–1058. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.147.

11. *Бурыкин А. А.* Экономико-математические методы и модели в управлении водным транспортом: сетевое планирование: учеб. пособие / А. А. Бурыкин [и др.] ; Под ред. канд. воен. наук, доц. А. А. Бурыкина. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — 220 с.

12. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — М.: Юстиция, 2018. — 664 с.

REFERENCES

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28 iyulya 2017 goda №1632-r. «Ob utverzhdenii programmy «Tsifrovaya ekonomika Rossiiskoi Federatsii». Web. 20 Feb. 2020 <http://government.ru/docs/28653/>.

2. Gubernatorov, S. S. "Navigatsiya budushchego – strategicheskaya programma e-Navigation." *Transport Rossiiskoi Federatsii* 1 (2014): 52–56.

3. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "The directions of the transport industry digitalization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1179–1190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1179-1190.

4. Yang, Chung-Shan. "Maritime shipping digitalization: Blockchain-based technology applications, future improvements, and intention to use." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 131 (2019): 108–117. DOI: 10.1016/j.tre.2019.09.020.

5. Clott, Christopher, Bruce Hartman, and Benson Beidler. "Sustainable blockchain technology in the maritime shipping industry." *Maritime Supply Chains*. Thierry Vanelslander and Christa Sys, eds. Elsevier Inc., 2020. 207–228. DOI: 10.1016/B978-0-12-818421-9.00011-2.

6. Bavassano, Giorgio, Claudio Ferrari, and Alessio Tei. "Blockchain: How shipping industry is dealing with the ultimate technological leap." *Research in Transportation Business & Management* (2020). № 100428. (In press).

7. Gozbenko, V. E., V. A. Olentsevich, and U.I. Belogolov. "Automation of individual transport operations to ensure sufficient conditions for optimal operation of "digital" transport and logistics." *Modern technologies. System analysis. Modeling* 4(60) (2018): 125–132. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).125-132.

8. Saharov, Vladimir V., Igor A. Sikarev, and Alexander A. Chertkov. "Automating search optimal routes and goods flows in transport networks means the integer linear programming." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.3 (2018): 647–657. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-647-657.

9. Zatsarinnyy, A. A., and A. P. Shabanov. "Model of a prospective digital platform to consolidate the resources of economic activity in the digital economy." *Procedia Computer Science* 150 (2019): 552–557. DOI: 10.1016/j.procs.2019.02.092.

10. Genzorova, Tatiana, Tatiana Corejova, and Natalia Stalmasekova. "How digital transformation can influence business model, Case study for transport industry." *Transportation Research Procedia* 40 (2019): 1053–1058. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.147.

11. Burykin, A. A. *Ekonomiko-matematicheskiye metody i modeli v upravlenii vodnym transportom: setevoye planirovaniye: ucheb. posobiye*. Edited by A. A. Burykin. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015.

12. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostei*. M.: Yustitsiya, 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дьяконова Мария Дмитриевна —
аспирант
Научный руководитель:
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: *mara.1990@yandex.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Diakonova, Mariia D. —
Postgraduate
Supervisor:
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: *mara.1990@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 3 марта 2020 г.
Received: March 3, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-515-525

WAYS TO EFFECTIVELY MANEUVER A TANKER IN A STORM

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

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

The ways to effectively maneuver a tanker in a storm to preserve the ability to ensure the vessel safety and maintain the movement speed along a given route are suggested in the paper. Effective maneuvering can be understood as a timely change of the ship course to reduce the dangerous consequences of navigation under stormy conditions without significant reduce of the speed movement along the originally set path. Stormy navigation leads to adverse and sometimes disastrous consequences for the ship, its cargo and crew. High-amplitude rolling, especially, in resonant conditions, can lead to cargo loss, devices and equipment damage, and sometimes, in cases of reduced stability, the vessel capsizing. Bottom hitting the waves (slamming), hits into the collapse of the sides (slapping) can lead to the ship hull damage, the destruction of fasteners of ship mechanisms and devices, up to their complete separation, to water leakage, and in the most adverse conditions, to the shell break and/or the vessel break with its subsequent flooding. In similar stormy conditions, "Estonia" liner, "Erika" and "Prestige" tankers, "Mol Comfort" container ship and others were lost. From the point of view of a vessel operation by the ship-owners and the shipper, the most significant is an additional increase in resistance to the vessel movement in storm conditions, resulting in reduced vessel speed for a given route. The issues of ensuring the specified speed and safety of cargo delivery by sea, including stormy navigation, are becoming the main issues of transport logistics and the development of new ports. The method of effective sequential maneuvering of a tanker in a storm, called "12-60", proposed in this paper shows the possibility of a comprehensive solution to the problems of safety and maintaining the speed of the vessel. The results of this paper provide ample opportunity for optimization of voyage costs and reduce the voyage time in storm conditions during cargo and ballast transitions in storm conditions for tankers and other ships.

Keywords: effective maneuvering of a tanker in a storm, ensuring the safety of stormy navigation, saving the voyage time.

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

УДК 655.62.052.4

СПОСОБЫ ЭФФЕКТИВНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ ТАНКЕРА В УСЛОВИЯХ ШТОРМА

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

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

Предложены способы эффективного маневрирования танкера в условиях шторма для сохранения возможности обеспечения безопасности судна и поддержания скорости движения по заданному маршруту. Под эффективным маневрированием можно понимать своевременное изменение курса судна для снижения опасных последствий плавания в штормовых условиях без значительного снижения скорости движения по изначально заданному пути. Отмечается, что штормовое плавание приводит к неблагоприятным, а иногда и катастрофическим последствиям для судна, его груза и экипажа; бортовая качка с большой амплитудой, особенно в условиях резонанса, может приводить к потере груза, повреждению устройств и оборудования, а иногда, в случае снижения остойчивости, — к опрокидыванию судна, удары днищем о волны (слемминг)и удары в развал бортов (слеппинг) — к повреждению корпуса судна, разрушению креплений судовых механизмов и устройств, вплоть до их полного отрыва, к появлению водотечности, а в наиболее неблагоприятных условиях — к разрыву обшивки и / или разлому судна с его последующим затоплением. В качестве доказательных примеров приведены крушения лайнера «Эстония», танкеров «Эрика»

и «Престиж», контейнеровоза «Мол Комфорт» и др. Подчеркивается, что с точки зрения эксплуатации судна судовладельцем и грузоотправителем наиболее существенным является дополнительное увеличение сопротивления движению судна в штормовых условиях, приводящее к снижению скорости судна по заданному маршруту. Рассматриваемые вопросы обеспечения заданной скорости и безопасности доставки грузов морем, включая штормовое плавание, становятся основной транспортной логистики и развития новых портов. Предлагаемый в настоящей статье способ эффективного последовательного маневрирования танкера в шторм — «12-60» — показывает возможность комплексного решения проблем безопасности и сохранения скорости движения судна по заданному пути. Результаты настоящей статьи дают широкие возможности для оптимизации рейсовых расходов и уменьшения ходового времени в условиях штормового плавания при грузовых и балластных переходах в условиях штормового плавания танкеров и других типов судов.

Ключевые слова: эффективное маневрирование судна в шторм, обеспечение безопасности штормового плавания, сохранение времени рейса.

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

Введение (Introduction)

Современные технологии используются во всех областях морского транспорта вплоть до создания беспилотных судов. Однако способы безопасного и эффективного маневрирования судна в штормовых условиях остаются прежними. Одним из важнейших достижений XX в. по праву может считаться диаграмма Ю. В. Ремеза, которая с минимальными изменениями является важнейшим научным результатом и в настоящее время. Существующие рекомендации по штормовому плаванию также были разработаны в XX в. и практически без изменений используются современным поколением судоводителей.

Штормовое плавание приводит к неблагоприятным, а иногда и катастрофическим последствиям для судна, его груза и экипажа. Бортовая качка с большой амплитудой, особенно в условиях резонанса, может приводить к потере груза, повреждению устройств и оборудований, а иногда (в случаях снижения остойчивости) — к опрокидыванию судна. Удары днищем о волны (слемминг), а также удары в развал бортов (слеппинг) могут приводить к повреждению корпуса судна, разрушению креплений судовых механизмов и устройств, вплоть до их полного отрыва, появлению водотечности, а в наиболее неблагоприятных условиях может произойти разрыв обшивки и / или разлом судна с его последующим затоплением. В аналогичных штормовых условиях затонули лайнер «Эстония», танкеры «Эрика» и «Престиж», контейнеровоз «Мол Комфорт» и др. Вопросам обеспечения безопасности штормового плавания посвящены работы [1]–[3]. В то же время устанавливаются новые требования, когда наряду с задачами безопасности судна, необходимо обеспечить максимально точное следование судовому расписанию и строгую по времени доставку груза в порт назначения, без снижения скорости на заданном маршруте.

Ряд работ посвящен вопросам улучшения ходкости судна при штормовом плавании и анализу применения формул ветроволновых потерь скорости [4], [5]. В работах [6], [7] для более точного учета этих параметров созданы кинематические модели и процедуры автоматизации выбора кратчайших маршрутов. Вопросы обеспечения заданной скорости и безопасности доставки грузов морем, включая штормовое плавание, являются основой транспортной логистики и развития новых портов. В работах [8]–[12] отмечается важность соблюдения скорости и расписания доставки грузов как фактора конкурентоспособности морских портов и целых районов Мирового океана. Существенным недостатком ранее указанных работ является то, что в них рассматривались вопросы сохранения и увеличения скорости без решения вопросов безопасности, часто сопровождающих штормовое плавание судна. Таким образом, отсутствует комплексный подход к решению проблем безопасности и сохранения скорости судна по заданному пути при плавании в шторм.

В данной статье рассматривается эффективное маневрирование танкера, которое должно включать возможности своевременного реагирования на опасности штормового плавания с максимальным сохранением скорости движения судна по заранее заданному маршруту. В силу особенностей эксплуатации танкеры, включая крупнотоннажные типа «Афрамакс» или «Панамакс», при штормовом плавании находятся либо в полностью загруженном состоянии, либо совершают балластные переходы. Это позволяет оптимизировать движение судна таким образом, чтобы оно могло обеспечивать его безопасность и сохранение максимальной скорости движения по заданному курсу при основных вариантах загрузки судна. При совершенствовании предлагаемых в настоящей статье способов маневрирования для улучшения параметров безопасности, ходкости и экономии топлива при штормовом плавании они могут быть распространены и на другие типы судов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Причины, приводящие к необходимости изменения режима движения судна в штормовых условиях.

1. *Улучшение мореходности и избежание опасных явлений при штормовом плавании.*

Для того чтобы судно обладало хорошей мореходностью, его качка должна быть плавной и умеренной, т. е. иметь большие периоды и малые амплитуды. Кроме того, на положении судна относительно волн существенно сказывается разность фаз.

Амплитуды и фазы качки существенно зависят от скорости судна и его курса по отношению к волне. Изменяя режим движения, т. е. целенаправленно выбирая курс (курсовой угол волнения), судоводитель может добиться умеренной качки и избежать опасных последствий шторма. На рис. 1 и 2 показано как изменением курсового угла волнения (КУВ) путем приведения судна «носом на волну» можно добиться улучшения штормовых условий движения судна.

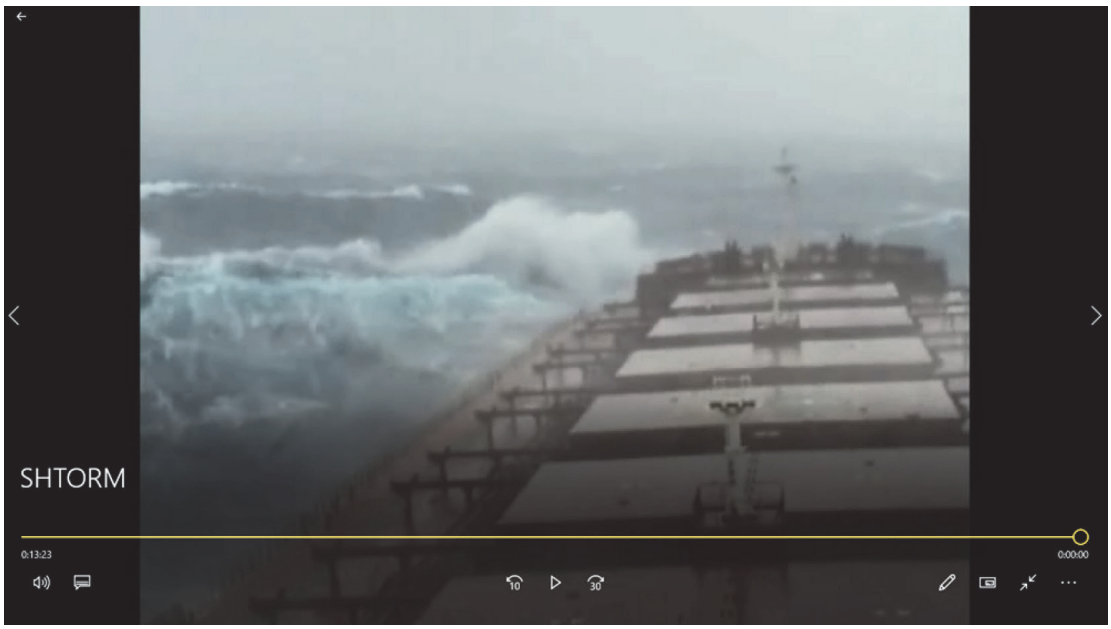


Рис. 1. Неблагоприятные штормовые условия перехода
(*источник — личный архив авторов*)

Даже тогда, когда непосредственная угроза гибели судна отсутствует, при шторме возникают неблагоприятные явления, приводящие к местным повреждениям корпуса, авариям механизмов и нарушению нормальной эксплуатации судна: удары корпуса днищем о волны (слемминг), удары волн в развал бортов в носовой оконечности (слеппинг), виппинговые явления, проходящие «волной» по корпусу после таких ударов и вызывающие разрушение судовых

конструкций, заливание палубы водой, смещение недостаточно надежно закрепленных жидких или сыпучих грузов, смывание за борт палубного груза и спасательных устройств, повышенная вибрация, разрушение судовых конструкций.

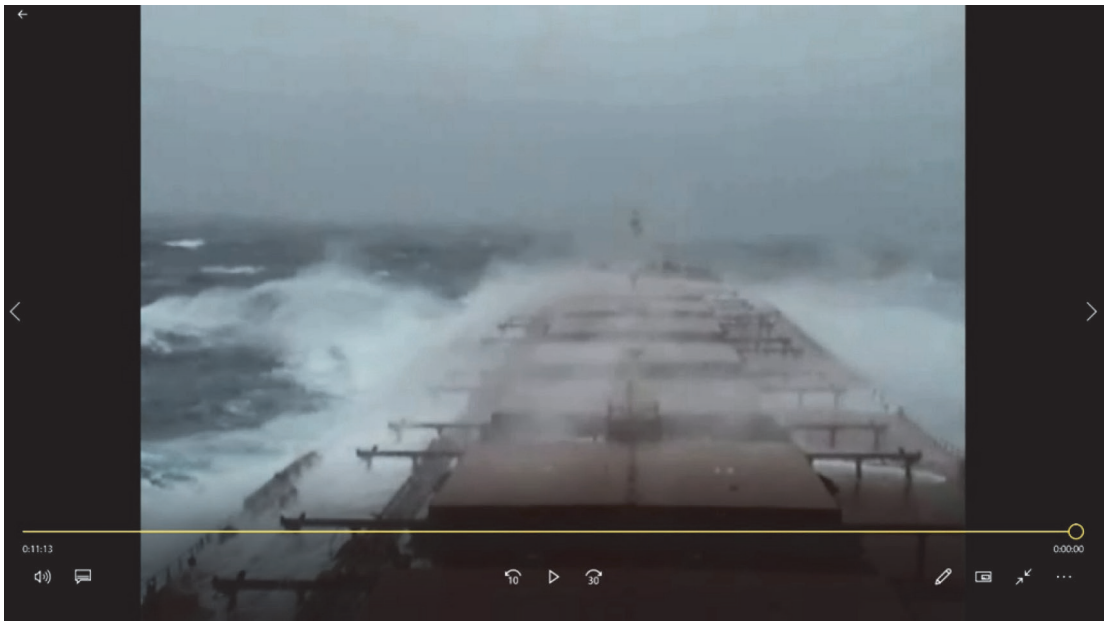


Рис. 2. Улучшение штормовых условий перехода путем изменения курса судна носом на волну (*источник — личный архив авторов*)

Снижение скорости из-за возрастания общего сопротивления воды движению судна, ухудшения режима работы движителей и главных двигателей («разгон» винта и двигателя), невозможность удержания судна на курсе, обледенение судна при заливании и обрызгивании в условиях низких температур, ухудшение обитаемости и психологическое и физиологическое воздействие на экипаж и пассажиров сопровождают штормовое плавание (рис. 3–5).



Рис. 3. Удары в развал бортов при движении контейнеровоза с курсовым углом ветра и волнения 40° на полном ходу (*источник — личный архив авторов*)



Рис. 4. Удары в развал бортов при буксировке аварийного автомобилевоза на самом малом ходу (*источник — личный архив авторов*)



Рис. 5. Последствия ударов в развал бортов при буксировке аварийного автомобилевоза на самом малом ходу – отрыв части кормовой аппарели (*источник — личный архив авторов*)

Необходимость решения этих задач давно привлекает внимание специалистов. Начиная с 30-х гг. XX в. в различных странах для определения безопасных режимов штормового плавания были предложены специальные диаграммы двух типов: диаграммы качки и диаграммы допустимой скорости судна, которые позволяют избегать указанных явлений, включая диаграмму Ю. В. Ремеза.

2. *Дополнительная потеря скорости судна.*

Скорость судна на волнении всегда меньше, чем в тихую погоду, ввиду следующих основных причин:

– увеличения сопротивления движению судна, вызванного как непосредственным воздействием на корпус ветра и волн, так и их вторичным влиянием посредством различных видов качки и рыскания судна на курсе;

– снижения эффективности действия гребного винта вследствие увеличения его нагрузки, а также изменения характера обтекания лопастей и колебаний погружения;

– ограничения используемой мощности главной энергетической установки либо вводимого системой автоматической защиты двигателя от перегрузок, либо намеренно предпринимаемого механиком при чрезмерных колебаниях частоты вращения двигателя, подачи топлива в двигатель и других его параметров вследствие разгона гребного винта;

– намеренного снижения скорости и / или изменения курса судна судоводителем при возникновении опасных для судна или груза явлений: ударов корпуса о волны (слемминг, удары воли в развал носа), заливания палубы и надстроек, чрезмерных ускорений при качке и др.

Основная часть естественной потери скорости судна обусловлена средним дополнительным сопротивлением, которое вызвано ударными нагрузками, снижающими скорость с судна, а также ветром и волнами. Это дополнительное сопротивление не зависит от сопротивления движению судна на тихой воде. Ветровое сопротивление, пропорциональное площади поперечной проекции надводной части судна и квадрату относительной скорости ветра, является различным для судов разного архитектурного типа.

На основании обработки испытании более ста моделей танкеров были получены значения составляющих сопротивления от ветра и волнения по сравнению с сопротивлением на тихой воде (R_0) в зависимости от курсового угла ветра и волнения на режимах переднего хода (рис. 6).

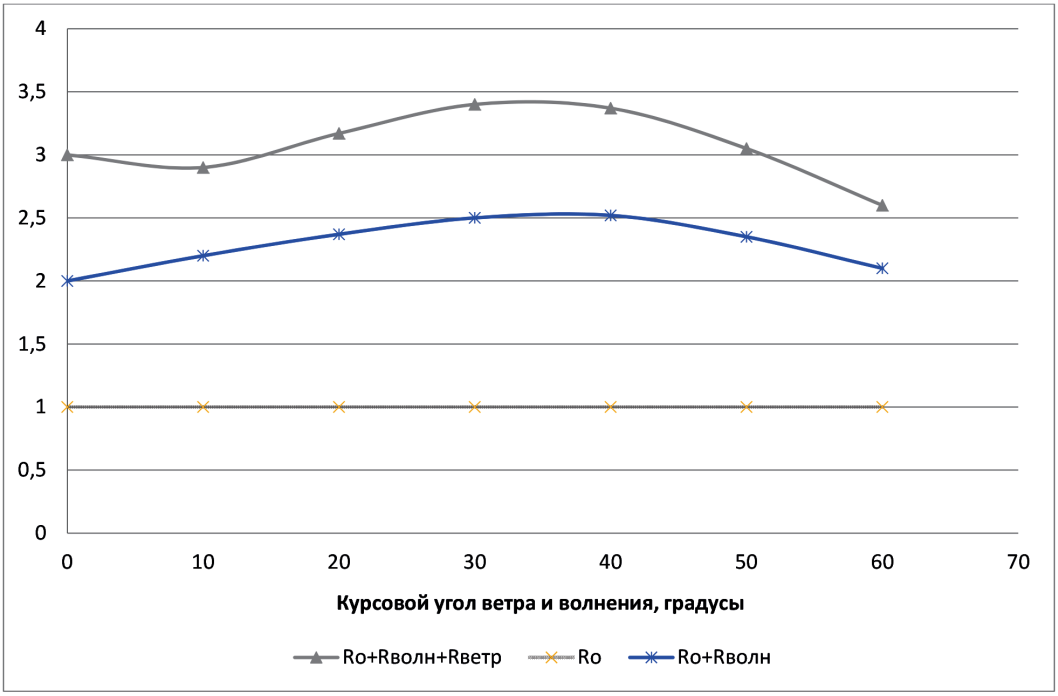


Рис. 6. Составляющие сопротивления движению танкера в грузу в зависимости от курсового угла ветра и волнения

Полученные с использованием паспортных диаграмм средние величины скорости на различных курсовых углах ветра и волнения танкера в грузу представлены на рис. 7, откуда следует, что наибольшие потери скорости возникают на курсовых углах ветра и волнения 24–40°. На этих же курсовых углах возникают наибольшие потери скорости движения судна вследствие ударных нагрузок: слемминга, слеппинга и т. п., что, очевидно, является явлением, связанным с потерей скорости судна (см. рис. 1 и 3). Таким образом, появляется возможность изменять неблагопри-

ятные условия плавания танкера в шторм, одновременно увеличивая скорость движения судна путем приведения судна к более эффективным курсовым углы ветра и волнения, максимально сохраняя при этом среднюю скорость движения по заданному пути, т. е. использовать способы эффективного маневрирования танкера в шторм, которые будут одновременно снижать опасные явления штормового плавания, не снижая скорости движения судна по заданному маршруту.

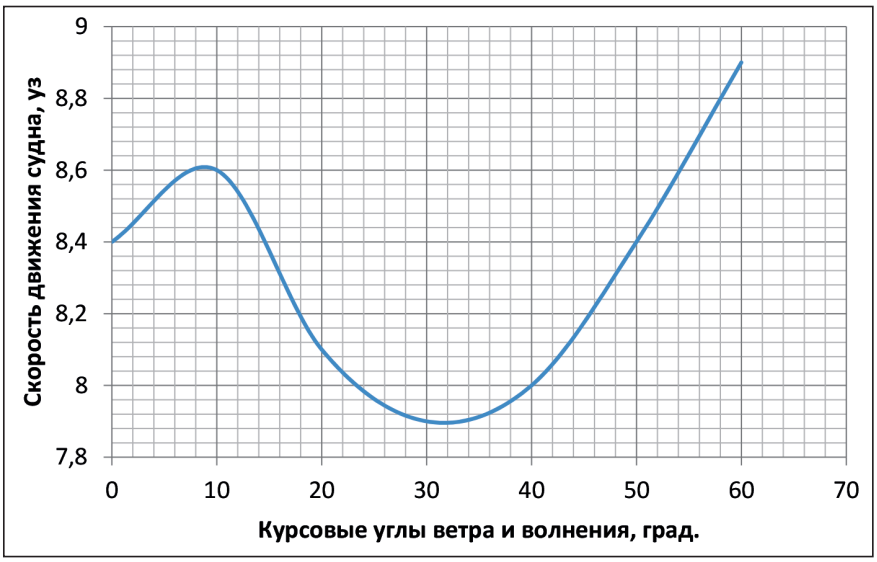


Рис. 7. Изменения скорости танкера в грузу
в зависимости от курсового угла ветра и волнения

Основная задача способа эффективного маневрирования танкера в условиях шторма заключается в том, чтобы обеспечивать безопасные условия штормового плавания с минимальным отходом от первоначального пути и наименьшим снижением скорости при движении по основному пути (заданному путевому углу (ПУ).

Способ эффективного маневрирования танкера в шторм «12-60» предусматривает выполнение следующих действий:

1. Из рис. 7 видно, что наиболее значительные величины увеличения скорости танкера в шторм достигаются на курсовых углах ветра и волнения (КУВ), равных 12° и 60°. Диапазон курсовых углов более 12° выгоден и тем, что позволяет избежать наибольших опасностей при плавании судном «носом на волну». На диаграмме Ю. В. Ремеза он заштрихован особо, как вызывающий наибольшие проблемы при штормовании судном носом на волну. Используя диапазон курсовых углов ветра и волнения КУВ > 12° в качестве начального маневра, можно избежать дополнительных опасностей.

2. Значения изменения курса судна, переводящий ветер и волнение на КУВ > 12°, можно взять в качестве первого маневра для эффективного маневрирования, например, «12-60», что соответствует курсовым углам наибольших скоростей движения судна на рис. 7.

3. Для детального рассмотрения применения маневра «12-60» необходимо предположить, что судно изначально следует ИК = ПУ = 0° и что на КУВ = 30° судно испытывает удары в развал бортов и неблагоприятную качку, что одновременно снижает скорость его движения, так как это, очевидно, взаимосвязанные и взаимозависимые явления (см., например, рис. 1 и 7). Схематично это движение судна можно представить в виде рис. 8.

4. Для улучшения состояния качки и улучшения мореходных качеств судно изменяет свой курс так, чтобы его КУВ был равен 12° (на рис. 1 оно должно изменять курс влево, ближе к положению «носом на волну», как видно из рис. 2), но не доходя до этого положения 12° с тем, чтобы избежать дополнительных потерь скорости и опасностей штормового плавания (см. рис. 7) и использовать диаграмму Ю. В. Ремеза. Схематично это движение судна можно представить на рис. 9.

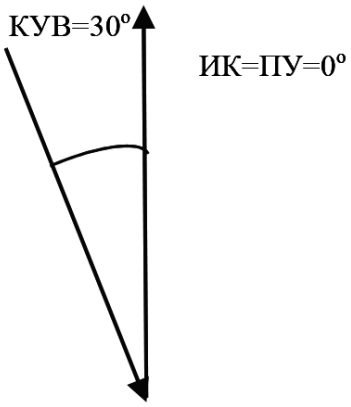


Рис. 8. Первоначальное расположение судна ИК = ПУ = 0º и курсового угла ветра и волнения КУВ = 30º

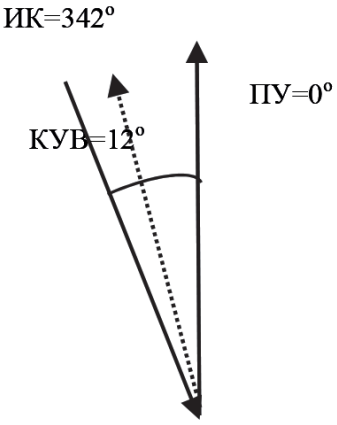


Рис. 9. Изменение курса судна влево на ИК = 360 º –18 º = 342 º для получения курсового угла ветра и волнения КУВ = 12º

5. Для того чтобы не уйти далеко от первоначального пути (первоначальный ПУ = 0 º), судно должно через некоторое время перейти на КУВ = 60 º с тем, чтобы вернуться на первоначальную линию пути ПУ = 0º (рис. 10).

6. После возврата к первоначальной линии пути ПУ = 0º маневр «12-60» может быть повторен.

7. С целью сравнения эффективного маневрирования и плавания на КУВ = 30 º (без изменения курса) можно использовать следующую сравнительную схему расчета, приведенную в следующей таблице:

Параметры движения судна	Численные значения		
Эффективный маневр «12-60»	–	–	–
Маневр «12»: поворот направо, КУВ = 12 град.	–	–	–
КУВ начальный, град.	30,0	30,0	30,0
Направление ИК (ПУ), град.	0,0	0,0	0,0
Изменение КУВ, град.	18,0	18,0	18,0
Изменение ИК, град.	342,0	342,0	342,0
Скорость на КУВ = 12 град., уз	8,6	8,6	8,6
Время, ч	1,0	2,0	3,0
Расстояние, мили	8,6	17,2	25,8
Движение по курсу (ПУ = 0), мили	8,2	16,4	24,5
Снос поперек курса (ПУ = 0), мили	–2,7	–5,3	–8,0
Маневр «60»: поворот направо, КУВ = 60 град.	–	–	–
КУВ измененный, град.	60,0	60,0	60,0
Изменение курса, град.	42,0	42,0	42,0
Внутренний угол для расчета движения по курсу и сноса, град.	42,0	42,0	42,0
Скорость на КУВ = 60 град., уз	8,9	8,9	8,9
Время, ч	0,4	0,7	1,3
Расстояние, мили	3,1	6,2	11,6
Движение по курсу (ПУ = 0), мили	2,3	4,6	8,6
Снос поперек курса (ПУ = 0), мили	2,1	4,2	7,7
Суммарное движение по курсу ПУ = 0 с эффективным маневрированием (без опасностей штормового плавания), мили	10,5	21,0	33,1
Скорость с КУВ = 30, уз	7,9	7,9	7,9
Суммарное движение без маневрирования по курсу ПУ = 0 с КУВ = 30 град. (с опасностями штормового плавания), мили	10,7	21,3	34,0

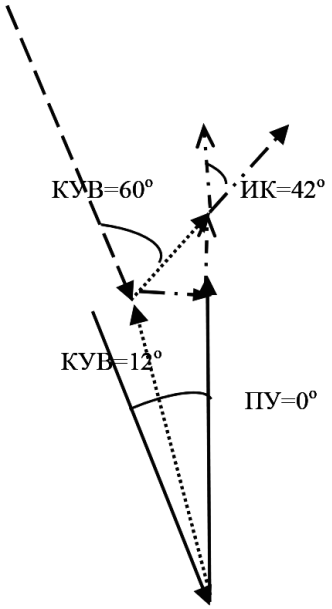


Рис. 10. Изменение курса судна вправо на КУВ = 60 º или ИК=342 º + 60 º – 12 º = 42 º для получения курсового угла ветра и волнения КУВ = 60º и возврата к первоначальной линии пути (ПУ = 0º)

Как следует из результатов, приведенных в таблице, предложенный способ эффективного маневрирования «12-60» позволяет не только избежать опасностей штормового плавания за счет безопасного маневрирования, но и совершать переход по заданному направлению (ПУ = 0º) практически без потери пройденного расстояния (снижения средней скорости).

Подобный подход, основанный на исследованиях показателей скорости и расхода топлива конкретных судов, который был предложен в работе [4], может явиться основой для выбора эффективных способов маневрирования конкретных судов в условиях штормового плавания и позволит решать новые комплексные задачи, связанные с одновременным обеспечением безопасности, а также поддержанием заданной скорости при штормовом плавании любого судна.

Обсуждение (Discussion)

Сравнение эффективности маневра «12-60» с движением без маневров по результатам, приведенным в таблице, подтверждает возможность выбора эффективных маневров, которые позволяют решать комплексную задачу — одновременно обеспечивать условия безопасности и сохранять скорость движения по заданному направлению. Полученные в статье выводы совпадают с данными других авторов о возможности эффективного совершенствования способов штормового плавания, включая одновременное обеспечение безопасности и сохранение скорости. Результаты настоящей работы могут быть использованы для развития методов сохранения скорости и ходового времени при плавании в шторм, учитывая особенности и историю эксплуатации конкретного судна, как это было предложено в публикации [4].

Выводы (Conclusions)

1. Предлагаемый в настоящей статье способ эффективного маневрирования танкера в шторм «12-60» показывает возможность комплексного решения проблем безопасности и сохранения скорости движения судна по заданному пути в условиях штормового плавания.

2. Современные навигационные методы позволяют с большой точностью определять скорости движения судна на различных курсовых углах ветра и волнения при плавании в шторм в разных вариантах загрузки конкретного судна и совершенствовать предлагаемый способ или его модификации.

3. Исследования, основанные на результатах экспериментов и наблюдений, проводимых непосредственно на конкретном судне, дают возможность решать вопросы эффективного маневрирования и одновременно проблемы безопасности и сохранения скорости на заданном пути при штормовом плавании. Способы, предложенные в публикации [4], дают возможность учитывать особенности и опыт эксплуатации конкретного судна, а также корректировать предлагаемый способ маневрирования в шторм.

4. При совершенствовании рассмотренного способа обеспечения безопасности и сохранения скорости при штормовом плавании он может быть распространен и на другие типы судов.

5. Результаты настоящей статьи дают широкие возможности для оптимизации рейсовых расходов и уменьшения ходового времени в условиях штормового плавания при грузовых и балластных переходах в условиях штормового плавания танкеров и других типов судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ершов А. А.* Совершенствование методов обеспечения безопасности штормового плавания судов / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 7–13.

2. *Ершов А. А.* Безопасность штормового плавания судна / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Научно- технический вестник Поволжья. — 2015. — № 3. — С. 129–131.

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

4. *Ершов А. А.* Способы увеличения скорости и экономии топлива танкера при штормовом плавании / А. А. Ершов, П. И. Буклис // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1122–1131. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1122-1131.

5. *Бояринов А. М.* Анализ применимости формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов / А. М. Бояринов, А. А. Ершов, С. М. Пылаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1168–1174. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1168-1174.

6. *Дерябин В. В.* Кинематическая модель движения судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 260–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-260-271.

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

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

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

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

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

12. *Eguíluz V. M.* A quantitative assessment of Arctic shipping in 2010-2014 / V. M. Eguíluz, J. Fernández-Gracia, X. Irigoien, C. M. Duarte // Scientific reports. — 2016. — Vol. 6. — Is. 1. — Pp. 1–6. DOI: 10.1038/srep30682.

REFERENCES

1. Ershov, Andrey Aleksandrovich, and Alexander Vladimirovich Terenchuk. “Improvement of the methods of ensuring safety of storm navigation of the ships.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 7–13.

2. Ershov, A. A., and A. V. Terenchuk. “Safety of storm navigation of the vessels.” *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 3 (2015): 129–131.

3. 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.

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

5. Boyarinov, Alexander M., Andrey A. Ershov, and Sergey M. Pylayev. “Analysis of the applicability of the formulas the calculation of the loss of ships speed due to wind and waves.”*Vestnik Gosudarstvennogo universiteta*

morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Mararova 9.6 (2017): 1168–1174. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1168-1174.

6. Deryabin, Victor V. "Kinematic model of vessel motion." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 260–271. DOI: 10.21821/2309-5180- 2017-9-2-260-271.

7. Chertkov, Alexander A. "Automation selection shortcuts routes of ships on the basis of modified Bellman-Ford Algorithm." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.

8. Bodrovtseva, N. "Systematization of an assessment factors and indicators of the seaports competitiveness." *Transport business of Russia* 2 (2017): 105–109.

9. Rusinov, Igor A., Irina A. Gavrilova, and Andrey G. Nelogov. "Japan's experience in governing liner shipping." *World of Transport and Transportation* 15.1(68) (2017): 150–160.

10. Stepanov, A., and O. Verbilo. "Razvitie portov i konteinernykh terminalov." *Logistika* 3(124) (2017): 25–33.

11. Plotnikov, S.N., and V.E. Marlei. "Model of passage of vessels through the waterway section forming the schedule in the course of its implementation." *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies* 79.1(71) (2017): 114–118. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-1-114-118.

12. Eguíluz, Victor M., Juan Fernández-Gracia, Xabier Irigoien, and Carlos M. Duarte. "A quantitative assessment of Arctic shipping in 2010–2014." *Scientific reports* 6.1 (2016): 1–6. DOI: 10.1038/srep30682.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov, Andrey A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *ershov_63@mail.ru*, *kaf_mus@gumrf.ru*

Buklis, Peter I. — Postgraduate
Supervisor:
Razvozov, Sergey Yu.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *petyunyaaa@mail.ru*, *kaf_mus@gumrf.ru*

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

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2020 г.
Received: April 29, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-526-536

SIMULATION MODELLING FOR NETWORK TECHNOLOGICAL PROCESSES OF SEAPORTS CARGO HANDLING

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

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation
[2] — Yanino Logistics Park LLC, Leningrad Region, Russian Federation

Since middle 1960s methods of network planning and running have become one of the decision-making tools. The networks (graphs) are used to formulate and solve different practical issues connected with implementation of activities (events) sequence. Some of these issues have become axiomatic. Development of programming tools led to these methods recovery based on the modern technologies, which allows a researcher to provide fast and reliable forecasts of the under-study processes behavior. The Business Process Model and Notation (BPMN) have been developed and widely used. BPMN is notation of business processes modelling, which is the interface between business process formalization and its practical implementation. The notation is represented as the number of graphical elements which are used in business processes description. It is often used for description and formalization of business processes on easy-to-understand level. But BPMN also allows you to automate the company activity. The algorithm of object-oriented network model is considered in the paper. The model is applied to maritime transport business processes which conveniently can be described in BPMN. Application of the approach particularly means building the networks simulation model. This allows you to provide stochastic analysis of business processes in the case of stochastic nature of the processes implementation and alternative critical paths. The authors believe that the model can be widely used. The stochastic nature of the weights of the network model edges, as shown by experimental tests of the approach presented in the paper, allows one to observe changes in the critical path. This ambiguous solution allows, in principle, to rationally reserve the necessary resources.

Keywords: business processes, simulation modelling, networks, critical paths.

For citation:
Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. "Simulation modelling for network technological processes of seaports cargo handling." *VestnikGosudarstvennogouniversitetamorskogoirechnogoflotaimeniadmirala S.O. Makarova* 12.3 (2020): 526–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-526-536.

УДК 656.615

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГРУЗООБРАБОТКИ В МОРСКИХ ПОРТАХ

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

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — ООО «Логистический Парк «Янино», Ленинградская область, Российская Федерация

Рассмотрены вошедшие в практику с середины 1960-х гг. обоснования управленческих решений — методы сетевого планирования и управления. На сетях (графах) ставится и решается множество задач, связанных с выполнением последовательности работ (наступления последовательных событий), при этом некоторые являются уже хрестоматийными. Отмечается, что развитие в настоящее время программных средств и сред программирования привело к своеобразной «реанимации» апробированных сетевых методов на новой базе, в свою очередь, обеспечивающих достаточно быстрый и достоверный прогноз раз-

вития управляемых процессов для анализа любых возможных вариантов решений. Разработан и получил развитие BPMN (Business Process Modeland Notation) — язык моделирования бизнес-процессов, который является промежуточным звеном между формализацией / визуализацией и воплощением бизнес-процесса. Нотация представляет собой описание графических элементов, используемых для построения схемы протекания бизнес-процесса. Подчеркивается, что такая схема как минимум целесообразна для того, чтобы выстроить в соответствии с ней бизнес-процесс и регламентировать его для всех участников, как максимум моделирование BPMN позволяет выполнить автоматизацию бизнес-процессов в соответствии с имеющейся схемой. В статье применительно к бизнес-процессам морского транспорта в нотации BPMN представлен оригинальный алгоритм функционирования объектной модели сетевого графика, основанного на логических переходах. Применение подобного подхода практически означает построение имитационной модели на базе сетевой, что позволяет осуществлять достоверный анализ стохастического протекания бизнес-процессов с формированием альтернативных (в зависимости от случайного сочетания условий функционирования) критических путей. Модель, по мнению авторов исследования, имеет большую сферу и широкие возможности применения. Стохастический характер весов ребер сетевой модели, как показывают экспериментальные проверки приведенного в исследовании подхода, позволяет наблюдать изменения критического пути. Данное неоднозначное решение дает возможность, в принципе, рационально резервировать необходимые ресурсы.

Ключевые слова: бизнес-процессы, моделирование, сетевые графы, критический путь, среда программирования, управленческие задачи.

Для цитирования:
Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование сетевых технологических процессов грузообработки в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 526–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-526-536.

Введение (Introduction)

Рациональное планирование бизнес-процессов, в том числе транспортных, является в различной степени сложной задачей, в основе решения которой в настоящее время находится моделирование. Вошедшую в оборот аббревиатуру BPM расшифровывают двояко: Business Process Modeling и Business Process Management. В первом случае это непосредственно моделирование бизнес-процесса, во втором — управление бизнес-процессами, т. е. общая система, частью которой является Business Process Modeling [1]–[3]. В настоящее время остаются актуальными сетевые модели, достаточно адекватно описывающие цепочки событий, столь характерные для процессов на транспорте [4]–[7]. Современное развитие языков и сред программирования позволяет решать управленческие задачи, обеспечивая достаточно быстрый и достоверный прогноз развития управляемых процессов для анализа любых возможных вариантов решений [8]–[10].

Деятельность морских портов, связанная с обработкой судов (прием лоцмана, прохождение подходного канала, буксировка, постановка к причалу, швартовка, оформление документации, погрузо-разгрузочные работы и др.), в полной мере относится к указанному классу задач [11]–[13]. Более того, на отдельные взаимосвязанные технологические операции традиционно разбивается и основной компонент процесса обработки — погрузочно-разгрузочные работы. Все операции, рассматриваемые на соответствующих уровнях, являются ничем иным, как бизнес-процессами. Поскольку анализ портовых и внутрипортовых операций появился значительно раньше, соответствующие операции сохраняли свое название и традиционно связанные с ними инструменты анализа. Первый шаг в развитии этого инструментария был связан с появлением новых методов анализа операций — сетевых моделей [14]. В сетевых моделях, используемых для анализа операций, вершинами графа являются однотипные объекты. Каждый объект является некоторым событием, от инициации до завершения которого проходит определенный период времени. Инициация события осуществляется определенными действиями, которые представлены ребрами графа. Действия не имеют длительности и отражают лишь причинно-следственные связи между событиями. Входящие в вершину ребра графа инициируют соответствующее событие по логике И или ИЛИ (рис. 1).

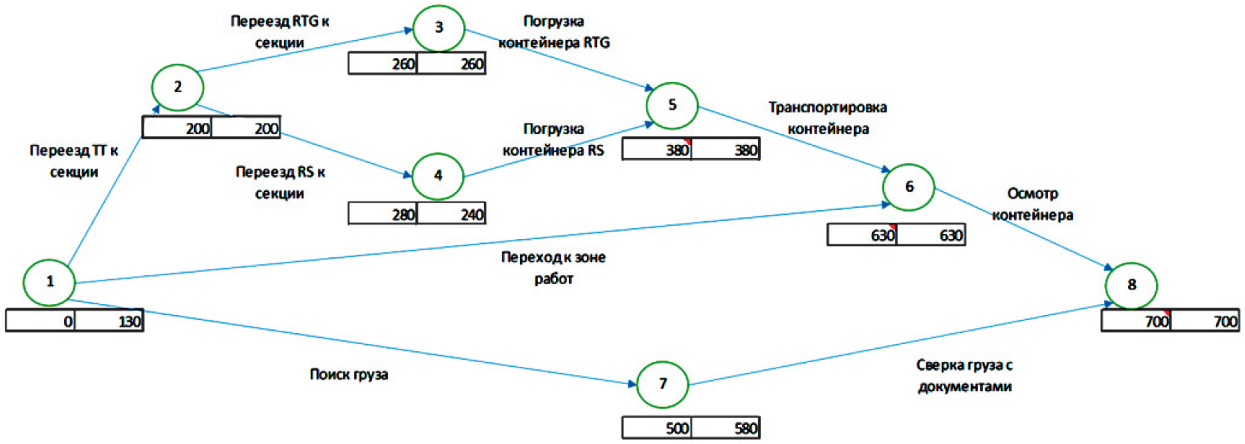


Рис. 1. Пример сетевой модели

Модели данного типа часто используются для представления производственных и технологических процессов, протекающих в морских портах [14], [15]. В то же время на современном этапе для анализа бизнес-процессов выразительных средств сетевых моделей оказывается недостаточно, поскольку инициирующие действия могут быть реализованы одновременно как по логике И, так и по логике ИЛИ. Более того, в зависимости от характеристик поступающей в систему заявки («работы») бизнес-процесс может пойти по разным маршрутам графа («траекториям»). Таким образом, в графической модели бизнес-процесса могут присутствовать «решающие», или логические элементы, которые определяют траекторию процесса. Наконец, в бизнес-процессах отдельные операции на графе могут выполняться агентом, который может быть свободен или занят в момент поступления инициирующей заявки. В этом случае дальнейшая обработка процесса может быть задержана.

В данной статье исследуется *метод моделирования обобщенных сетевых графов*, описывающих бизнес-процессы, протекающие при обработке судов в морских портах. Для наглядности и универсальности при описании используется терминология и нотация BPMN [2].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для того чтобы иметь возможность учитывать особенности бизнес-процессов, в сетевой модели вместо однотипных вершин графа необходимо ввести объекты разных классов, каждый из которых будет выполнять свою функцию. Кроме того, необходимо определить объект «заявка», который будет перемещаться между вершинами графа, инициируя составляющие процесс события.

К основным типам вершин графа относятся следующие объекты:

– обработка — задерживает заявку на определенное время;

– инициация(по И, по ИЛИ) — запускает последовательности событий;

– выбор (исключающее ИЛИ) — определяет ветвь маршрута, по которой следует заявка.

Рассмотрим принцип работы этих элементов на следующих примерах.

Пример 1. *Обработка*. Предположим, что бизнес-процесс представляет собой последовательность действий (рис. 2). В данном случае заявка, вышедшая из зеленого круга, будет последовательно перемещаться между действиями, задерживаясь на заданные промежуток времени. Общее время операции составит 14 мин.

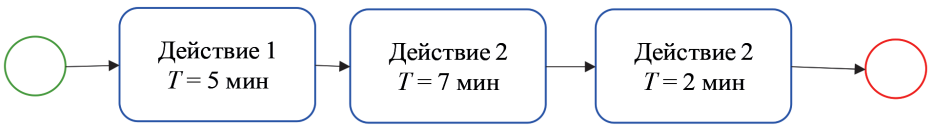


Рис. 2. Последовательность действий

Пример 2. *Выбор.* Пусть имеется процесс, в котором *Действие 2* выполняется при *условии 1*, а *действие 3* — при *условии 2* (рис. 3).

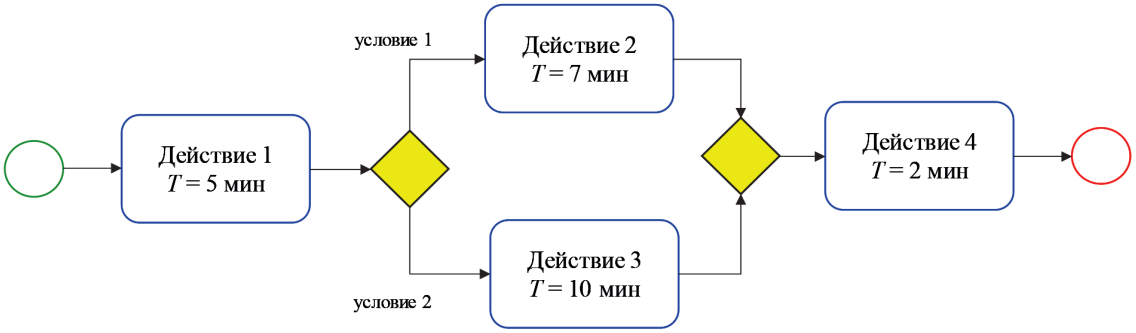


Рис. 3. Исключающее ИЛИ

При этом будем считать, что *условие 1* и *условие 2* являются характеристиками заявки. В таком случае, в зависимости от характеристики заявки, процесс может занять 14 мин или 17 мин.

Пример 3. *Запуск* (Логика по И). Пусть *Действие 2* и *Действие 3* должны выполнятся параллельно. Перейти к следующему действию можно только в том случае, если оба предыдущие действия были выполнены. Модель процесса представлена на рис. 4. В результате весь процесс будет выполнен за 17 мин.

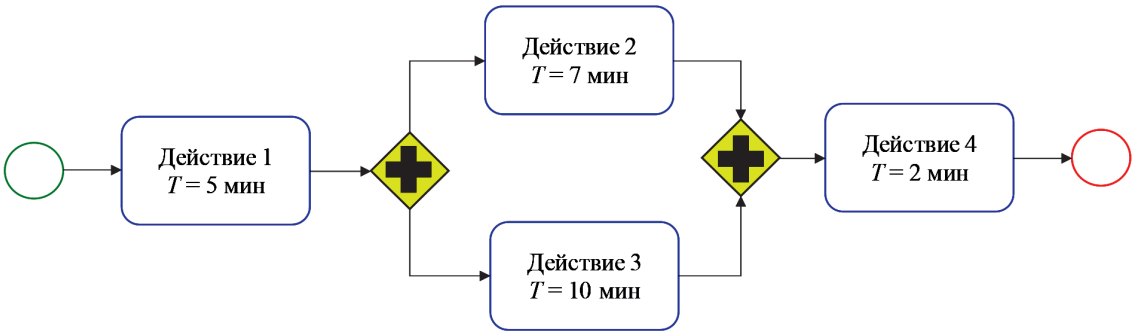


Рис. 4. Логика по И

Пример 4. *Запуск* (Логика по ИЛИ). Пусть *Действие 2* и *Действие 3* также выполняются параллельно, но перейти к следующему действию можно в том случае, если было выполнено хотя бы одно из них (рис. 5). В данном случае весь процесс займет 14 мин.

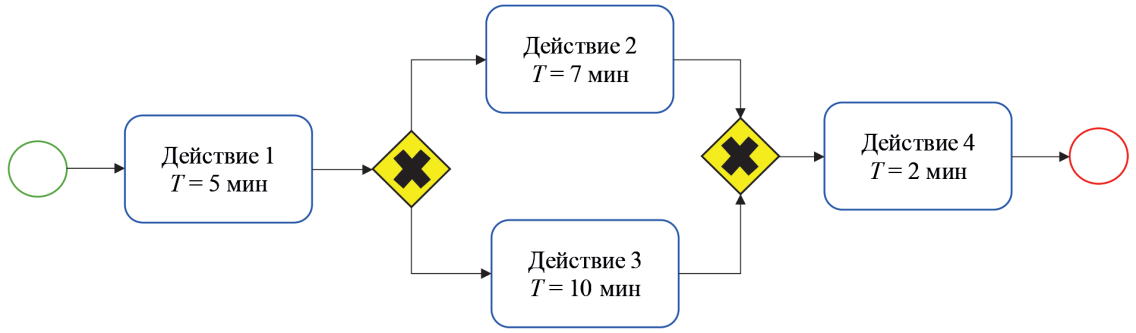


Рис. 5. Логика по ИЛИ

Традиционные методы сетевого анализа неприменимы для исследования графов такого типа. Именно данное обстоятельство обуславливает необходимость разработки алгоритма, который учитывает структуру бизнес-процесса, а также случайный характер поступления и обработ-

ки заявок. Исследование разработанного в данной работе алгоритма из этого класса и является целью данной публикации.

Для описания алгоритма работы модели примем следующие обозначения:

– order — переменная, содержащая экземпляр класса «заявка» — каждый экземпляр содержит имя заявки, начальную точку, точку назначения, а также информацию, которую содержит заявка, и время ожидания;

– get_position() — метод класса «заявка» — возвращает код вершины, в которой находится заявка;

– set_position(new_position) — метод класса «заявка» — перемещает заявку в вершину с кодом new_position;

– get_waiting_time() — метод класса «заявка» — возвращает оставшееся время, в течение которого заявка останется в текущей позиции;

– set_waiting_time(time) — метод класса «заявка» — устанавливает время ожидания заявки в текущей вершине равным time;

– get_total_time() — метод класса «заявка» — возвращает время, которое заявка провела в системе;

– increase_total_time() — метод класса «заявка» — увеличивает общее время заявки в системе на единицу;

– get_info() — метод класса «заявка» — возвращает информацию, которую содержит заявка;

– last_position — переменная, содержащая код последней вершины, на которой заявка убывает из системы, а алгоритм прекращает работу (в общем случае таких вершин может быть несколько, процесс с одной конечной вершиной рассматривается здесь для упрощения рассуждений);

– go_to_next_point() — процедура перехода на следующую позицию — логика перехода на следующую вершину зависит от ее типа и рассматривается далее;

– next_position — переменная, которая содержит код следующей вершины.

Все классы вершин содержат следующие методы:

– get_name() — возвращает код вершины;

– get_waiting_time() — возвращает время ожидания в данной вершине;

– check_order() — проверяет состав заявок в данной вершине и принимает решение о возможности продолжения процесса.

Обобщенный алгоритм программы представлен на рис. 6. Схема представляет собой упрощенный алгоритм обработки заявки на одном шаге модели. Логика алгоритма помещается в бесконечный цикл времени, который прерывается, когда заявка достигла конечной вершины. Процедура перехода на следующую вершину графа зависит от ее типа. Код следующей вершины определяется по матрице смежности (табл. 1).

Таблица 1

Матрица смежности

		Код вершины													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Код вершины	1		1												
	2			1											
	3				1	1									
	4						1	1	1						
	5									1	1				
	6											1			
	7											1			
	8											1			
	9												1		
	10												1		
	11													1	
	12													1	
	13														1
	14														

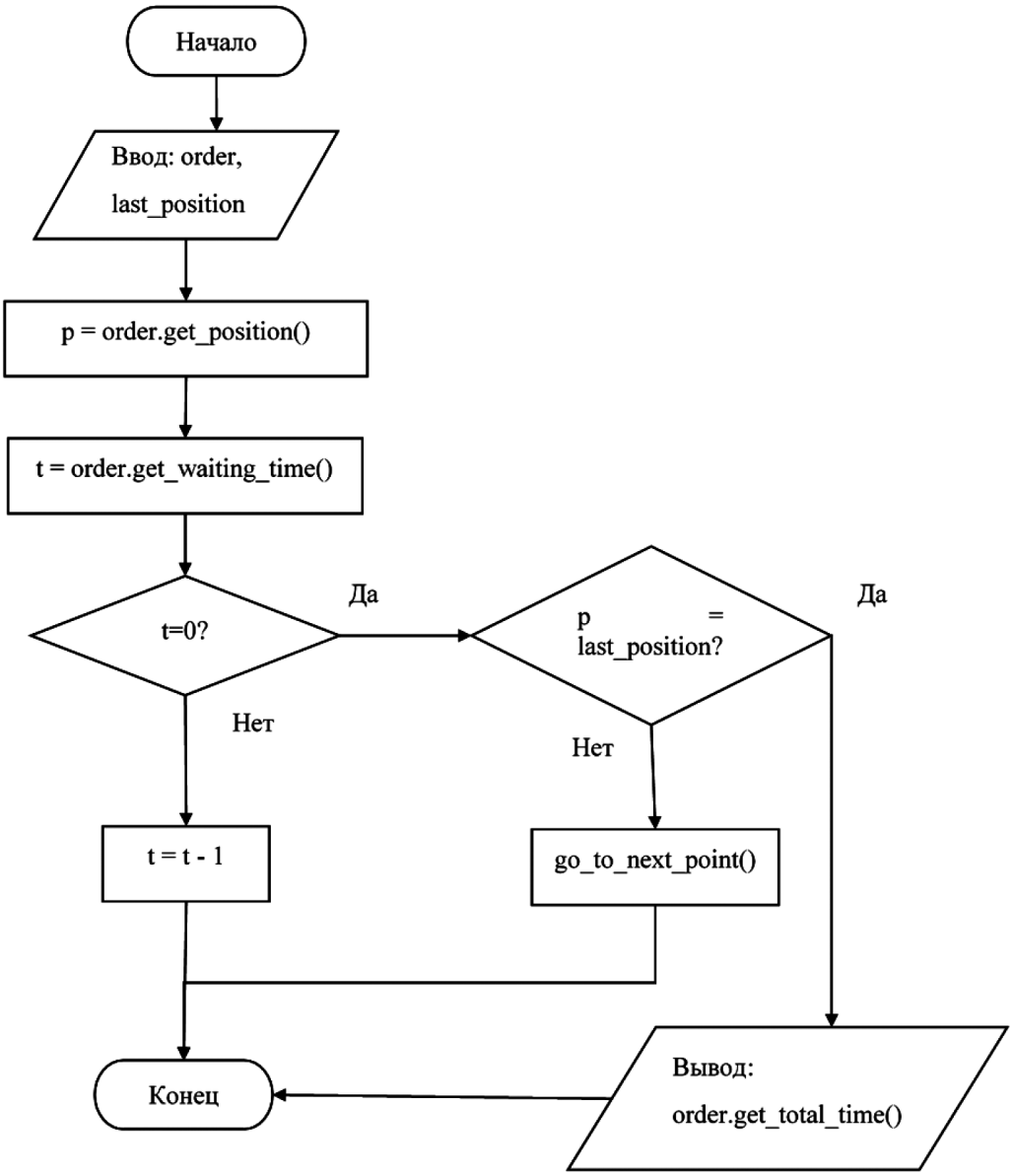


Рис. 6. Алгоритм одной итерации

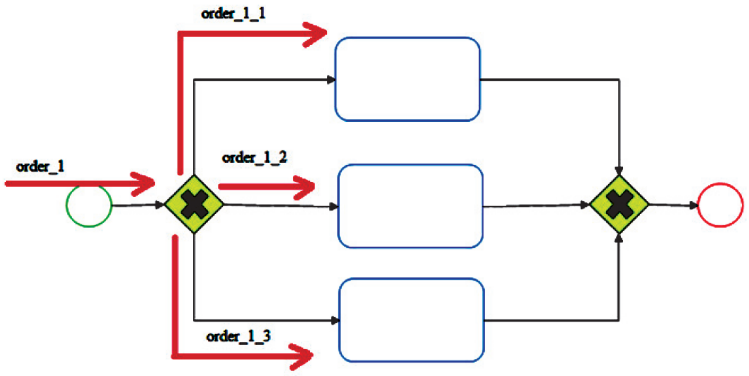
Если тип следующей вершины «Обработка», то заявка сразу переходит на эту вершину. Для перехода выполняются команды set_position() и set_waiting_time().

Если тип следующей вершины «Выбор», то программа определяет, является ли эта вершина начальной или конечной. «Решающие» объекты представляют собой скобки для набора вершин. Как следствие, необходимо указать открывающую и закрывающую скобку. В программе для этого используется массив logic_list, элементами которого являются массивы пар открывающих и закрывающих «решающих» объектов.

Если следующая вершина является открывающей, то программа сравнивает все имеющиеся в данной вершине условия для перехода с информацией, которую содержит заявка. При этом в объекте класса «Выбор» содержится ассоциативная матрица вида {условие : код вершины}, которая определяет, на какую вершину перейдет заявка при выполнении соответствующего условия.

Если следующая вершина является закрывающей, то заявка переходит на эту вершину так же, как на вершину типа «Обработка». В случае, если тип следующей вершины «Инициация по И», то в начальной вершине данного типа программа создает копии заявки, которые обрабатываются при выполнении параллельных операций (рис. 7, *а*).

а)



б)

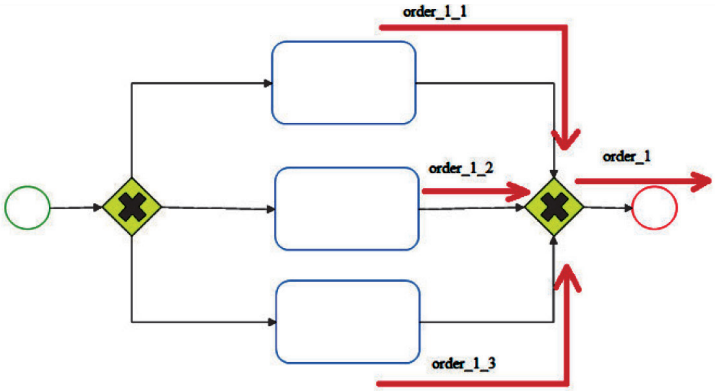


Рис. 7. Параллельная обработка копий заявки (*а*), удаление копий (*б*)

Оригинальная заявка на время существования копий «замораживается». Конечная вершина содержит информацию о том, какие заявки должны прийти в эту вершину, чтобы оригинальная заявка могла продолжить движение в бизнес-процессе (рис. 7, *б*).

Вершина типа «инициация по ИЛИ» работает аналогично объекту «Логика по И». Однако оригинальная заявка продолжает движение даже тогда, когда в конечную вершину прибыла хотя бы одна из копий.

Результаты (Results)

Для более детального описания рассмотрим участок бизнес-процесса, составленного из нескольких рассмотренных конструкций, представленный диаграммой на рис. 8. В качестве действий могут быть рассмотрены укрупненные компоненты операций по обработке контейнерного судна в порту, включающие лоцманскую проводку, швартовку, ожидание свободной практики, раскрепление контейнеров, грузовые операции, крепление контейнеров, ожидание лоцмана, ожидание отшвартовки, отшвартовку, лоцманскую проводку на выход, подробное описание, взаимосвязь и продолжительность которых рассмотрена в монографии [15].

После выполнения *Действия 1* (см. рис. 8) продолжение процесса предполагает запуск параллельных операций. Продолжение процесса (*Действие 8*) возможно только тогда, когда закончится наиболее длительная последовательность действий. В зависимости от типа заявки наиболее длительной операцией будет верхняя или нижняя ветвь. Так, если заявка содержит информацию, удовлетворяющую *условию 2*, длительность процесса будет определяться верхней совокупностью действий. Критический путь будет состоять из действий «1–2–8».

В этом случае длительность всего процесса составит 5 + 3 + 5 = 13 единиц времени. Иначе длительность процесса будет определяться маршрутом: «1–7–5–8», а общее время процесса составит: 5 + 1 + 8 + 5 = 19 единиц. Предположим теперь, что в систему поступают заявки, которые с вероятностью 0,5 содержат информацию, удовлетворяющую *условию 1*, и с вероятностью 0,5 — *условию 2* (см. рис. 8). Результат экспериментов с моделью в этом случае представлен на рис. 9. Очевидно, что различия частоты вариантов объясняются конечным числом экспериментов, и при росте их числа частоты будут приближаться к вероятности.

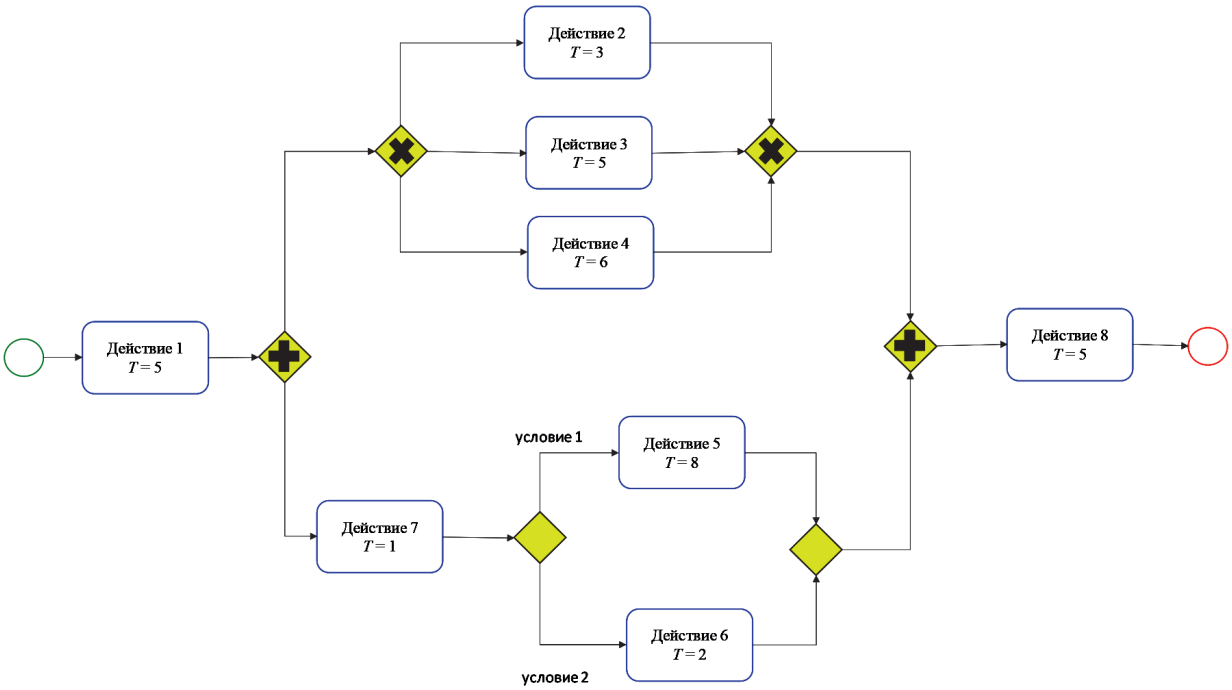


Рис. 8. Диаграмма бизнес-процесса

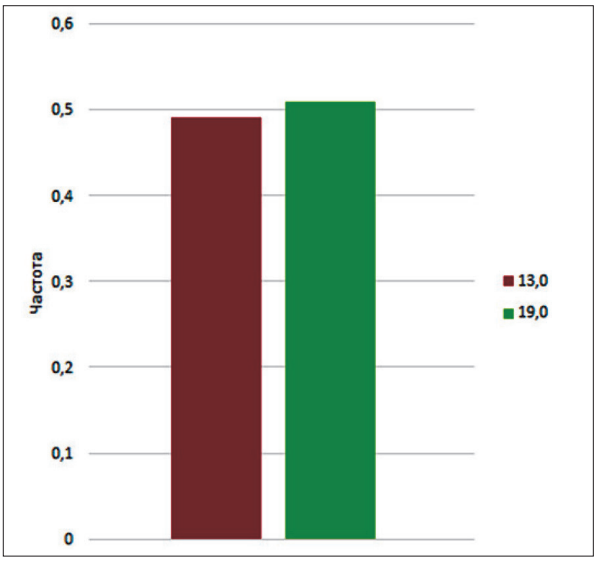


Рис. 9. Распределение продолжительности бизнес-процесса

Предположим теперь, что вместо детерминированной продолжительности действия известно распределение случайной интенсивности, с которой оно выполняется. В таком случае

показанные на рис. 9 значения «расщепляются», и случайное распределение продолжительности бизнес-процесса принимает вид рис. 10.

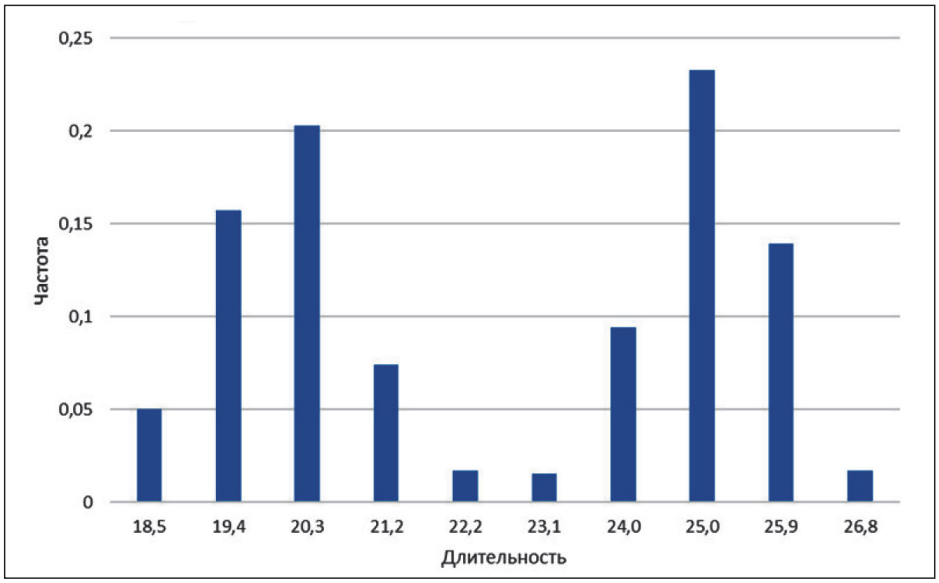


Рис. 10. Распределение продолжительности бизнес-процесса при заданной интенсивности выполнения действий

Видно, как именно два детерминированных значения, показанные на рис. 10 и соответствующие двум равновероятным вариантам маршрута, формируют два семейства разной длительности маршрутов.

Выводы

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Сложная структура и случайный характер продолжительности отдельных действий бизнес-процессов компании не позволяют исследовать их методами сетевого анализа, вследствие этого анализ бизнес-процессов возможен только методами моделирования.

2. Описанный в статье метод моделирования графов бизнес-процессов позволяет анализировать бизнес-процессы различного характера и сложности.

3. В то же время представленный в примерах алгоритм может быть также модернизирован путем ввода агентов — действующих лиц, выполняющих отдельные операции бизнес-процесса. В этом случае на длительность всего процесса будет также оказывать влияние занятость агента, ответственного за множество отдельных действий бизнес-процессов, которые могут протекать параллельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайдукова Е. Нотация BPMN 2.0: ключевые элементы и описание [Электронный ресурс] / Е. Гайдукова. — Режим доступа: https://www.comindware.com/ru/blog/(дата обращения: 10.04.20).

2. *Гайдукова Е.* BPMN-процессы: основы моделирования и примеры бизнес-процессов [Электронный ресурс] / Е. Гайдукова.— Режим доступа: https://www.comindware.com/ru/blog/ (дата обращения: 10.04.20).

3. *Prades L.* Defining a Methodology to Design and Implement Business Process Models in BPMN According to the Standard ANSI/ISA-95 in a Manufacturing Enterprise / L. Prades, F. Romero, A. Estruch, A. García-Dominguez, J. Serrano //Procedia Engineering. — 2013. — Vol. 63. — Pp. 115–122. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.283.

4. *Dong J. X.* Joint service capacity planning and dynamic container routing in shipping network with uncertain demands / J. X. Dong, C. Y. Lee, D. P. Song // Transportation Research Part B: Methodological. — 2015. — Vol. 78. — Pp. 404–421. DOI: 10.1016/j.trb.2015.05.005.

5. *Gelareh S.* Hub-and-spoke network design and fleet deployment for string planning of liner shipping / S. Gelareh, N. Maculan, P. Mahey, R. N. Monemi // Applied Mathematical Modelling.— 2013. — Vol. 37. — Is. 5. — Pp.3307–3321. DOI: 10.1016/j.apm.2012.07.017.

6. *Msakni M. K.* Analyzing different designs of liner shipping feeder networks: A case study / M. K. Msakni, K. Fagerholt, F. Meisel, E. Lindstad // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review.— 2020. — Vol. 134. — Pp. 101839. DOI: 10.1016/j.tre.2020.101839.

7. *Jiang L.* Analysis of topology and routing strategy of container shipping network on "Maritime Silk Road" / L.Jiang, Y. Jia, C. Zhang, W. Wang, X. Feng // Sustainable Computing: Informatics and Systems. — 2019. — Vol. 21. — Pp. 72–79. DOI: 10.1016/j.suscom.2018.11.002.

8. *Yahia E.* Supply chain business patterns definition for process interoperability / E. Yahia, M. Bigand, J. P. Bourey, E. Castelain // IFAC Proceedings Volumes. — 2009. — Vol. 42. — Is. 4. — Pp. 169–174. DOI: 10.3182/20090603-3-RU-2001.0359.

9. *Appel S.*Modeling and execution of event stream processing in business processes / S. Appel, P. Kleber, S. Frischbier, T. Freudenreich, A. Buchmann // Information Systems.— 2014. — Vol. 46. — Pp. 140–156. DOI: 10.1016/j.is.2014.04.002.

10. *Bazhenova E.* From BPMN process models to DMN decision models / E. Bazhenova, F. Zerbato, B. Oliboni, M. Weske // Information Systems. — 2019. — Vol. 83. — Pp. 69–88. DOI: 10.1016/j.is.2019.02.001.

11. *Weilkiens T.* Chapter 6: Modeling Business Processes Using BPMN / T. Weilkiens, C. Weiss, A. Grass, K. N. Duggen // OCEB 2 Certification Guide. Business Process Management - Fundamental Level.— Second Edition. — Morgan Kaufmann, 2017. — Pp. 93–147. DOI: 10.1016/B978-0-12-805352-2.00006-6.

12. *Ferreira P.* Process Invariants: An Approach to Model Expected Exceptions / P.Ferreira, R. Martinho, D. Domingos // Procedia Technology. — 2014. — Vol. 16. — Pp. 824–833. DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.032.

13.*Ahoa E.* Business processes and information systems in the Ghana cocoa supply chain: A survey study / E. Ahoa, A. Kassahun, B. Tekinerdogan // NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences.— 2020. — Vol. 92. — Pp. 100323. DOI: 10.1016/j.njas.2020.100323.

14. *Купцов Н. В.* Разработка модели вероятностной оценки пропускной способности морского грузового фронта экспортного угольного терминала / Н. В. Купцов, А. Л. Кузнецов, А. В. Шатилин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 17–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.

15. *Кузнецов А. Л.* Морские контейнерные перевозки: монография / А. Л. Кузнецов [и др.]. — М.: Моркнига, 2019. — 412 с.

REFERENCES

1. Gaydukova, E. Notatsiya BPMN 2.0: klyuchevye elementy i opisanie. Web. 10 Apr. 2020 <https://www.comindware.com/ru/blog/>.

2. Gaidukova, E. BPMN-protsessy: osnovy modelirovaniya i primery biznes-protsessov. Web. 10 Apr. 2020 <https://www.comindware.com/ru/blog/>.

3. Prades, L., F. Romero, A. Estruch, A. García-Dominguez, and J. Serrano. "Defining a Methodology to Design and Implement Business Process Models in BPMN According to the Standard ANSI/ISA-95 in a Manufacturing Enterprise."*Procedia Engineering* 63(2013): 115–122. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.283.

4. Dong, Jing-Xin, Chung-Yee Lee, and Dong-Ping Song. "Joint service capacity planning and dynamic container routing in shipping network with uncertain demands." *Transportation Research Part B: Methodological* 78 (2015): 404–421. DOI: 10.1016/j.trb.2015.05.005.

5. Gelareh, Shahin, Nelson Maculan, Philippe Mahey, and RahimehNeamatianMonemi. "Hub-and-spoke network design and fleet deployment for string planning of liner shipping." *Applied Mathematical Modelling* 37.5 (2013): 3307–3321. DOI: 10.1016/j.apm.2012.07.017.

6. Msakni, Mohamed Kais, Kjetil Fagerholt, Frank Meisel, and Elizabeth Lindstad. "Analyzing different designs of liner shipping feeder networks: A case study." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 134 (2020): 101839. DOI: 10.1016/j.tre.2020.101839.

7. Jiang, Liupeng, Yue Jia, Cheng Zhang, Wei Wang, and Xuejun Feng. "Analysis of topology and routing strategy of container shipping network on "Maritime Silk Road"." *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 21 (2019): 72–79. DOI: 10.1016/j.suscom.2018.11.002.

8. Yahia, Esma, Michel Bigand, Jean-Pierre Bourey, and Emmanuel Castelain. “Supply chain business patterns definition for process interoperability.”*IFAC Proceedings Volumes* 42.4 (2009): 169–174. DOI: 10.3182/20090603-3-RU-2001.0359.

9. Appel,Stefan, Pascal Kleber, Sebastian Frischbier, Tobias Freudenreich, and Alejandro Buchmann. “Modeling and execution of event stream processing in business processes.”*Information Systems* 46 (2014): 140–156. DOI: 10.1016/j.is.2014.04.002.

10. Bazhenova,Ekaterina, Francesca Zerbato, Barbara Oliboni, and Mathias Weske. “From BPMN process models to DMN decision models.”*Information Systems* 83 (2019): 69–88. DOI: 10.1016/j.is.2019.02.001.

11. Weilkiens, Tim, Christian Weiss, Andrea Grass, and Kim NenaDuggen. “Chapter 6: Modeling Business Processes Using BPMN.”*OCEB 2 Certification Guide. Business Process Management - Fundamental Level*. Second Edition. Morgan Kaufmann, 2017. 93–147. DOI: 10.1016/B978-0-12-805352-2.00006-6.

12. Ferreira, Pedro, Ricardo Martinho, and Dulce Domingos. “Process invariants: an approach to model expected exceptions.” *Procedia Technology* 16 (2014): 824–833. DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.032.

13. Ahoa, Emmanuel, Ayalew Kassahun, and Bedir Tekinerdogan. “Business processes and information systems in the Ghana cocoa supply chain: A survey study.” *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 92 (2020): 100323. DOI: 10.1016/j.njas.2020.100323.

14. Kuptsov, Nikolay V., Aleksandr L. Kuznetsov, and Andrey V. Shatilin. “Development of a model for the probabilistic assessment of annual throughput of the marine loading complex of the export coal terminal.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 17–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.

15. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, O. V. Solyakov, and A. D. Semenov. *Morskie konteinerny eperevozki: monografiya*. M.: MORKNIGA, 2019.

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*
Семенов Антон Денисович —
диспетчер
ООО «Логистический парк «Янино»
Российская Федерация, Ленинградская область,
Всеволожский район, д. Янино-1,
Торгово-логистическая зона «Янино-1», № 1
e-mail: *asemyonov054@gmail.com*

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*
Semenov, Anton D. —
Dispatcher
Yanino Logistics Park LLC
Vsevolozhsky District, Yanino-1 village,
Trade and logistics zone Yanino-1, No. 1,
Leningrad Region, Russian Federation
e-mail: *asemyonov054@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 7мая 2020 г.
Received: May7, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-537-550

USING 3D ELECTRONIC NAVIGATIONAL CHARTS TO PREVENT NAVIGATIONAL ACCIDENTS OF VESSELS WHEN PASSING LOCKS ON INLAND WATERWAYS

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

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

New approaches to the information support of navigators are considered in the paper. They can positively influence the increase in the level of providing the modern navigators with the navigation information necessary for making decisions that make it possible to safely perform maneuvers when passing navigational hydraulic structures on inland waterways using 3D electronic navigational charts. As such approaches, a number of constructive proposals for the following methods modernization have been proposed: controlling the vessel in course, controlling the vessel in speed, controlling the velocity vector of the vessel, as well as controlling the bow and stern ends of the vessel. When navigating a vessel in course, a sequence of actions when the vessel is turning is disclosed. When considering the control of a vessel in speed, an example of displaying information on a change in the navigation situation with a change in the water level, which is important in ensuring the safety of navigation, is considered. When considering the control of the ship's velocity vector using the 3D image of the Bagaevsky waterworks as an example, the possibility of performing a visual assessment of the spatial dimensions of objects and ships when implementing the method is emphasized. In addition, the fragments of 3D electronic navigational cartography those display the maneuvers of vessels entering a double-lane lock, showing the implementation of controlling the bow and stern ends of the vessel are presented. In the proposed study, based on the application of elements of situational analysis and methods for assessing the navigation situation by the skipper, when performing maneuvers, the recommendations that will improve the navigation safety through the use of standard electronic navigational charts and the latest 3D navigational charts are suggested.

Keywords: vessels maneuvering in narrow channels, navigational accidents, navigational safety, 3D navigational charts, inland waterways.

For citation:
Karetnikov, Vladimir V., Andrei A. Prokhorenkov, and Yuriy N. Lysenko. "Using 3D electronic navigational charts to prevent navigational accidents of vessels when passing locks on inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 537–550. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-537-550.

УДК 656.628

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 3D ЭЛЕКТРОННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ КАРТ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ АВАРИЙ СУДОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ШЛЮЗОВ НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ

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

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

Рассмотрены новые подходы информационного обеспечения судоводителей, позволяющие положительным образом влиять на повышение уровня их обеспеченности навигационной информацией, необходимой для принятия решений, дающих возможность безопасно выполнять маневры при прохождении судоходных гидротехнических сооружений на внутренних водных путях с использованием 3D электронных навигационных карт. В качестве таких подходов разработан ряд конструктивных предложений по модернизации следующих методов: управление судном по курсу, управление судном по скорости, управление вектором скорости судна, а также контроль движения носовой и кормовой оконечности судна.

При управлении судном по курсу раскрыта схема последовательности действий при выполнении поворота судна. При рассмотрении управления судном по скорости рассмотрен пример отображения информации по изменению навигационной обстановки с изменением уровня воды, имеющий важное значение при обеспечении безопасности плавания. При рассмотрении управления вектором скорости судна на примере 3D-изображения Багаевского гидроузла отмечена возможность выполнения визуальной оценки пространственных размеров объектов и судов в процессе реализации данного метода. Кроме того, в работе приведены фрагменты 3D электронно-навигационной картографии, отображающие выполнение маневров судов при заходе в двухниточный шлюз, показывающих реализацию контроля движения носовой и кормовой оконечностей судна. В предлагаемом исследовании на основе применения элементов ситуационного анализа и методов оценки навигационной ситуации судоводителем при выполнении маневров предложены рекомендации, позволяющие повысить уровень безопасности судоходства на основе применения стандартных электронных навигационных карт и новейших 3D навигационных карт. Выделены ключевые аспекты применения современных 3D навигационных карт для предупреждения аварийных случаев с судами при шлюзовании.

Ключевые слова: маневрирование судов в узкостях, навигационная аварийность, навигационная безопасность плавания, 3D навигационные карты, внутренние водные пути.

Для цитирования:
Каретников В. В. Использование 3D электронных навигационных карт для предупреждения навигационных аварий судов при прохождении шлюзов на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, Ю. Н. Лысенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 537–550. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-537-550.

Введение (Introduction)

Управление судном при движении на пришлюзовых участках представляет собой сложный комплекс действий, выполняемых судоводителем для того, чтобы движение судна осуществлялось по линии, равноудаленной от навигационных опасностей с безопасной скоростью. Пришлюзовые участки отличаются изменчивостью факторов, оказывающих влияние на навигационную безопасность плавания, среди которых следует отметить навигационно-гидрографические, гидрометеорологические и организационные. Навигационно-гидрографические факторы представляют собой совокупность навигационных знаков, наблюдаемых судоводителем на местности и / или карте, ориентируясь по которым он определяет положение судна и его движение относительно навигационных опасностей, а также иную картографическую информацию (например, информацию о глубинах), степень своей осведомленности о навигационной обстановке, которая будет складываться вокруг судна по мере его следования в подходном канале, на основании анализа информации, представленной на навигационной карте атласа.

Стесненность условий плавания требует от судоводителя точного учета внешних факторов, степень влияния которых на судно будет тем сильнее, чем ниже его скорость. Основными факторами, которые необходимо принимать во внимание, являются: уровень воды, который определяет условия течения и мелководья, ветер и в некоторых случаях волнение. Маневрирование судна в значительной степени определяется интенсивностью судоходства, в связи с чем судно после захода в подходной канал или водохранилище может либо сразу следовать в шлюз, либо ожидать на ходу для выполнения маневра пропуска, либо ошвартоваться к причальной стенке, и затем после прохода встречного судна, выполнять маневр отхода и следовать в шлюз.

Согласно обобщенным многолетним данным об аварийности судов, основной причиной аварий являются ошибки судоводителей, большинство из которых навигационные [1], [2]. Навигационные ошибки вызваны неверным представлением судоводителя о местоположении и параметрах движения судна относительно направлений и границ судового хода, т. е. неверной оценкой динамической навигационной информации. Динамическую навигационную информацию, получаемую и используемую судоводителем в процессе проводки судна, можно подразделить на информацию о параметрах движения судна и навигационную информацию, связанную с полями навигационных параметров, наблюдаемых судоводителем на судне визуально и создаваемых знаками

навигационного оборудования. Таким образом, решение поставленной задачи с учетом доступных видов навигационной информации может быть получено путем реализации следующих методов: управление судном по курсу, управление судном по скорости, управление вектором скорости судна и контроль движения носовой и кормовой оконечностей судна. Применение этих методов является крайне конструктивным в сочетании с 3D ЭНК.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Особенности представления динамической навигационной информации для анализа в 3D ЭНК. Движение судна оценивается непрерывным наблюдением и представляет собой комбинацию продольного, поперечного и вращательного движения. Среди параметров движения судна судоводителю необходимо иметь представление о продольной и поперечной скорости, угловой скорости, угле дрейфа от ветра и течения. Контроль скорости важен для оценки эффективности действий по соблюдению скоростного режима, а также может иметь значение для оценки влияния мелководья на скорость судна и изменение угловой скорости — при выполнении поворота и его контроле. Изменение угла дрейфа имеет важное значение при снижении скорости судна до минимальной, остановке движителей и движении по инерции, при завершении циркуляции и выходе на новый прямолинейный участок. В этом случае особое значение имеет оценка дрейфа от внешних факторов и остаточного дрейфа на циркуляции.

При проводке судна по внутренним водным путям (ВВП) судоводитель должен постоянно определять положение судна в маршрутной системе координат, т. е. положение по расстоянию до точки начала поворота и уклонению по перпендикуляру к оси судового хода. Для определения положения судна судоводитель анализирует расстояния и направления на знаки навигационного оборудования, обозначающие кромки судового хода. Определение движения судна осуществляется путем сравнения между направлением диаметральной плоскости судна и направлением оси судового хода или его кромок. Несмотря на то, что навигационное оборудование ВВП стандартизировано на всей территории Российской Федерации [3], условия плавания настолько изменчивы, что их учет является затруднительным и связанным со значительной неопределенностью. Поэтому методы представления навигационной информации будут определять осведомленность судоводителя об окружающей обстановке и оказывать значительное влияние на качество принимаемых им решений.

Представление навигационной информации в графическом виде непрерывно совершенствуется. Одним из передовых достижений в картографических системах является создание и внедрение 3D навигационных карт стесненных в навигационном отношении районов. Оценки использования 3D ЭНК, выполненные методом ситуационного анализа, показали эффективность их использования за счет отображения информации в виде трехмерной графики, эргономичности управления и получения информации в общем случае проводки судна в сложных условиях плавания, характерных для ВВП [4], [5]. Поскольку использование таких карт для решения задач управления судном является новым методом, для практики управления судном представляет интерес оценка эффективности их применения для обеспечения навигационной безопасности плавания применительно к навигационно-гидрографическим, гидрометеорологическим факторам и особенностям маневрирования для захода и выхода судна из шлюза.

По сравнению с двухмерными картами трехмерные карты дают ряд преимуществ: их использование позволяет судоводителю по-новому оценивать обстановку вокруг судна. Динамическая навигация по трехмерному пространству 3D ЭНК, отображаемому картографической системой, позволяет управлять высотой глаза наблюдателя (точкой обзора), углом обзора, масштабом просмотра карты [4], [5]. Рассмотрим новые возможности отображения навигационной информации в 3D-картах, которые могут быть использованы для повышения эффективности их практического применения.

Управление судном по курсу. Оценить информативность 3D ЭНК применительно к проводке судна можно только детально рассмотрев работу судоводителя. При проводке судна по большинству ВВП, ввиду извилистости судового хода, необходимо многократно менять курс в значительных

пределах. Для обеспечения навигационной безопасности проводки судна при прохождении криволинейных участков необходимо выполнять ряд действий по управлению судном в определенной последовательности (рис. 1).

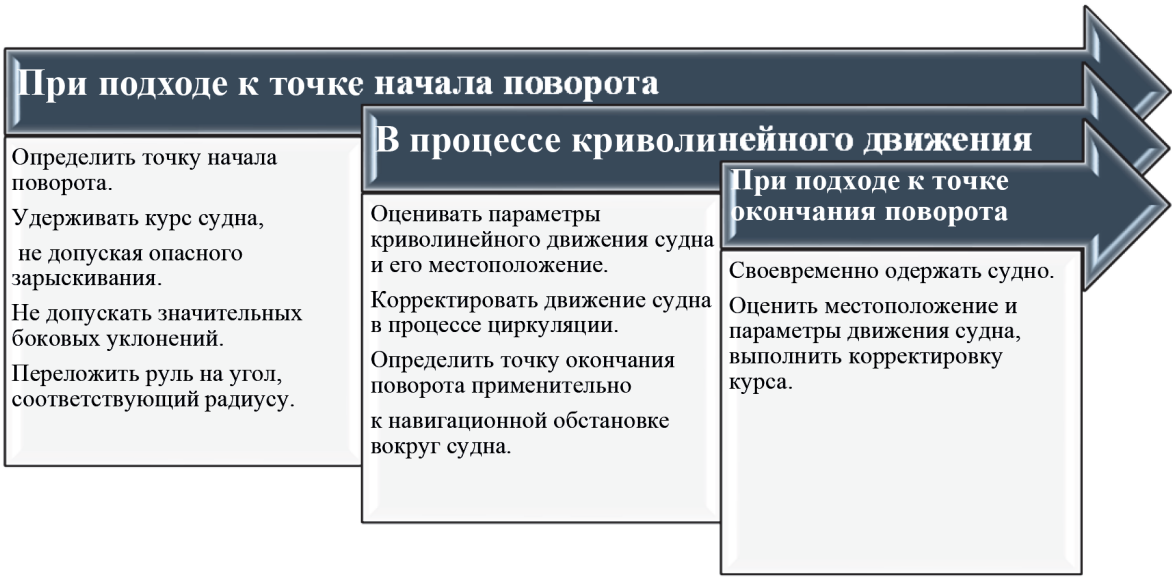


Рис. 1. Последовательность действий при выполнении поворота судна

При выполнении поворота очень сложно осуществлять постоянный визуальный контроль за дистанцией от собственного судна до кромок судового хода, поскольку плавучие знаки обозначают точки начала и окончания поворота. Поэтому выполнять корректирующие действия для предупреждения сближения с кромками судового хода возможно руководствуясь значениями направлений движения по прямолинейным участкам и кинематическими параметрами движения судна. Несмотря на то, что информация относительно направлений движения их последовательности частично хранится в памяти судоводителя, большое количество навигационной информации отображено на навигационной карте, запомнить которую не представляется возможным. Использование 3D ЭНК повышает продуктивность наблюдения за криволинейным движением судна с ходового мостика за счет параллельного сопоставления направлений и дистанций до навигационных ориентиров, наблюдаемых в трехмерном пространстве с наблюдаемыми на местности.

При управлении судном в условиях плавания, характерных для ВВП, все действия должны выполняться оперативно, что обеспечивает учет преобладающих обстоятельств и условий плавания [6]. Однако динамика движения судна такова, что даже при идеальных условиях плавания суда следуют извилистым курсом, что требует периодических корректировок курса. На участках судовых ходов, где глубины подвержены периодическим изменениям, фактический уровень воды будет определять изменение фактической ширины судового хода и, как следствие, курс, который необходимо удерживать для следования по траектории, равноудаленной от навигационных опасностей. При сближении судна с кромками судового хода, ввиду наличия непросматриваемой области вблизи судна, полностью теряется или снижается до минимума возможность ориентирования по плавучим знакам ближней к судну кромке судового хода, а при определении направления движения по другой кромке возможны грубые промахи, поскольку не будет выполняться сравнение изменения положения навигационных знаков с обоих бортов.

В случае сближения судна с кромками судового хода, где границы навигационных опасностей нечетко выражены, встречаются отдельные глубины, близкие к предельным, а окружающие глубины достаточные. Наличие точных карт дает возможность повысить осведомленность судоводителя как за счет использования автоматической функции построения области опасных глубин, позволяющей выделить область, безопасную для движения судна, так и за счет глазомерного

определения направлений и расстояний непосредственно по 3D ЭНК. Пример использования данной функции можно проанализировать по рис. 2, где область опасных глубин выделена красным цветом [7]. При прохождении участков со значительными изменениями курса угловая скорость и угол дрейфа во время циркуляции могут быть существенными. При визуальном ориентировании возникают трудности, вызванные значительными отличиями направления движения судна от направления диаметральной плоскости судна. В этом случае для судоводителя важно без промедления обеспечить выход судна на циркуляцию с заданными параметрами и своевременно одержать судно, при этом необходимо оценивать дистанции до ближайших опасностей и ориентироваться на перспективу [6]. Большое количество навигационной информации, необходимой для анализа, может привести к неверному решению по управлению судном, особенно у судов с плохими маневренными качествами или при наличии значительных гидрометеорологических воздействий.

Примером использования 3D ЭНК для получения навигационной информации в сложных навигационных условиях может служить представленный на рис. 2, *а* фрагмент отображения навигационной обстановки вокруг судна при подходе к точке поворота со значительным углом дрейфа от ветра и течения.

а) б)

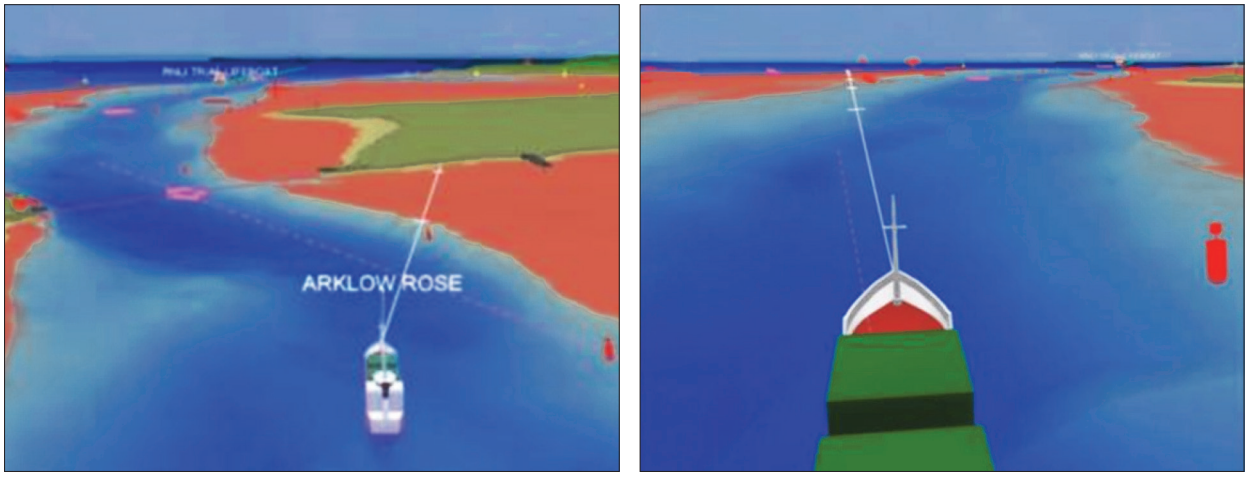


Рис. 2. Пример отображения движения судна со значительным углом дрейфа на 3D ЭНК:
а — при подходе к точке начала поворота; *б* — после выхода на новый курс

Важное значение для судоводителя имеет не только визуальная оценка навигационной обстановки, складывающейся вокруг судна, но и оценка подводной обстановки. Наблюдая движение судов и движение собственного судна, судоводитель может оценить положение судна относительно пространственных и точечных навигационных опасностей с максимально возможной точностью, но не более той, которую позволяет навигационная карта. Пример, приведенный на рис. 2, *б*, демонстрирует возможность судоводителя визуально отслеживать изменение глубин при следовании судна вблизи кромки судового хода.

Актуальность применения трехмерных карт обусловлена спецификой навигационно-гидрографических особенностей пришлюзовых участков ВВП, где, как правило, суда должны следовать строго в своей полосе движения, руководствуясь преимущественно стационарным навигационным оборудованием. Среди знаков стационарного навигационного оборудования можно выделить знак «ориентир» или путевой огонь, которые обычно устанавливаются на кромках каналов, но к которым нельзя приближаться вплотную. Поэтому ориентирование по трехмерному рельефу, обеспечиваемое трехмерными картами, будет способствовать повышению осведомленности судоводителя о навигационной обстановке, складывающейся вокруг судна.

Управление судном по скорости. Под управлением судном обычно понимается управление за счет перекладки руля как для удержания на курсе при следовании по прямолинейному участку,

так и для выхода судна на криволинейное движение в начале криволинейного участка, и при одерживании судна, когда необходимо выйти на новый курс для следования по новому прямолинейному участку [8], [9]. Однако в условиях плавания, характерных для ВВП, управление судном за счет действия руля тесно связано с обеспечением безопасной скорости, поскольку при следовании судна со скоростью, превышающей безопасную, оно будет подвержено чрезмерной рыскливости, что при недостаточно точном ориентировании и выполнении корректирующих действий с задержкой может привести как к зарыскиванию и касанию корпусом судна кромки судового хода, так и к касанию судном грунта за счет чрезмерной просадки. Для соблюдения судном скоростного режима, обусловленного лимитирующим влиянием уровня воды и габаритами судового хода, необходимо постоянно регулировать работу движителей, что, в свою очередь, обуславливает режим работы рулевым органом. При следовании судна по прямолинейному участку большой протяженности и прохождении вблизи мелей для предотвращения чрезмерного зарыскивания судна за счет гидродинамического взаимодействия с мелководными участками необходимо выполнять перекладки руля на большие углы и осуществлять предикцию управления рулем.

Характерной особенностью пришлюзовых участков является частые периодические колебания уровня воды, вызванные цикличностью работы гидроэлектростанции. Колебания уровня воды оказывают влияние не только на величину запаса воды под килем и, таким образом, на необходимость корректировки скорости судна в определенных, безопасных пределах, но и на изменение действия течений, которые меняются как по модулю, так и по направлению. Влияние течения, которое проявляется как на прямолинейных, так и на криволинейных участках, относится к одному из основных гидрометеорологических факторов, оказывающих влияние на движение судна, необходимость его корректировки и, в конечном итоге, на безопасность.

Уровень воды практически очень сложно учесть при предварительной проработке маршрута в условиях ВВП. Карты ВВП составлены применительно к проектному уровню воды соответствующей обеспеченности, зависящей от класса водного пути, который, как правило, значительно отличается от проектного, что «сводит на нет» расчеты, выполняемые для оценки безопасной скорости и других параметров. Ввиду значительных колебаний уровня воды на пришлюзовых участках, их учет является затруднительным при использовании существующих расчетных методик на основе применения формул. На рис. 3 показан пример использования функции построения области безопасных глубин применительно к осадке конкретного судна для детализированной оценки акватории [10].

а) б)

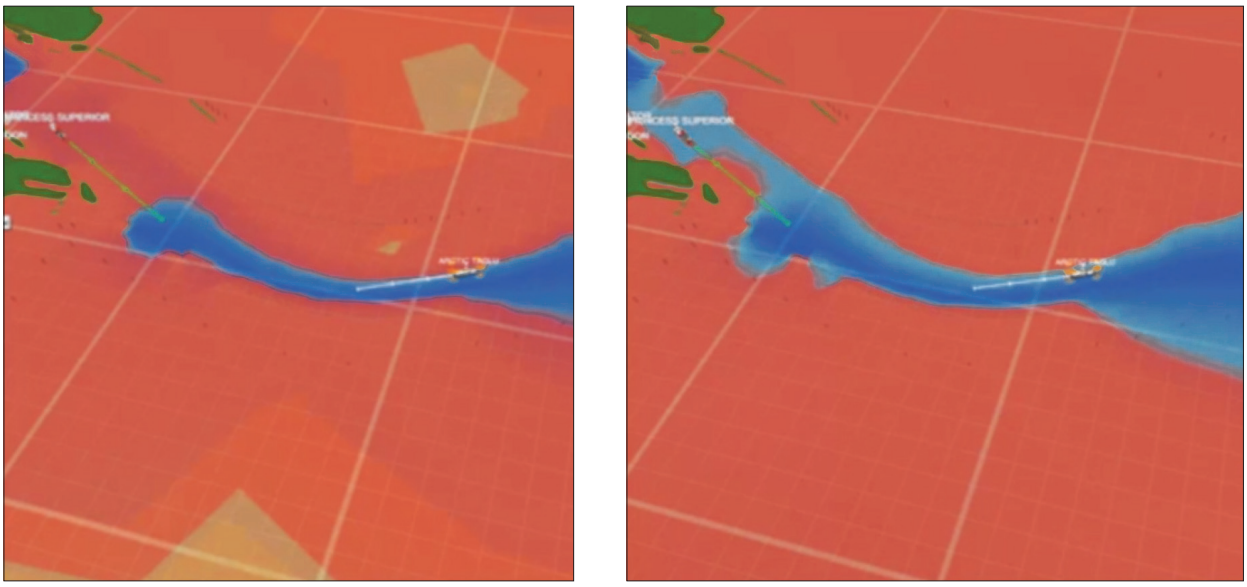


Рис. 3. Пример отображения информации
по изменению навигационной обстановки с изменением уровня воды:
а — при низком уровне воды; *б* — при высоком уровне воды

Часто при следовании судна в подходном канале шлюза и находясь на оси канала, судоводитель может ощущать влияние гидродинамического взаимодействия корпуса судна с подводным рельефом и кромками канала. Это взаимодействие может проявляться как при следовании судна со значительной скоростью, превышающей безопасную, так и при выполнении маневра на малой скорости, поскольку не всегда середина видимой водной поверхности совпадает со средней частью канала, и кроме того, непосредственно в подходном канале шлюза ось канала может быть криволинейной. На подходах к шлюзу 3D ЭНК позволяют определить фактические габариты судового хода применительно к осадке судна, а также участок для того, чтобы вывести судно на ось шлюза заблаговременно.

3D ЭНК позволит судоводителю сориентироваться относительно имеющегося водного пространства при движении судна в шлюз от причальной стенки, когда он находится на крыле ходового мостика. В случае выполнения крутых поворотов при ограниченных габаритах водного пути отдельной задачей является оценка движения кормы. При заходе в шлюз после длительного ожидания на ходу 3D представление навигационной информации позволяет повысить точность регулирования скорости движения судна на основании точного отображения водного пространства, доступного для маневра. Также необходимо принимать во внимание, что при маневрировании на стесненной акватории имеет значение не учет параметров движения судна как такового, а движение судна по конкретным направлениям.

Управление вектором скорости судна. При следовании судна с безопасной скоростью и при отсутствии существенных лимитирующих воздействий внешних факторов направление вектора скорости судна практически всегда незначительно отличается от направления ДП судна. Применительно к управлению судном это означает, что удерживая определенный курс судна, судоводитель может оценить его дрейф и выполнить корректирующие действия, т. е. изменить курс в соответствующую сторону. В этом случае при управлении судном судоводитель может ориентироваться по створам, удерживая их слева или справа по мачте, держать курс на буй, на треть расстояния между буями и др. Однако, когда судно вынуждено значительно снижать скорость ввиду минимальных запасов как по глубине, так и по ширине судового хода, управлять им за счет изменения курса и последующей его корректировки становится сложно, поскольку разница между вектором скорости и ДП будет значительной.

Первоначально судно снижает обороты движителей до минимальных, затем приходится останавливать движители и следовать по инерции. Если в данном случае судно приобретает движение, которое не контролируется судоводителем, то приходится давать кратковременную работу движителям и управлять рулем соответствующим образом. Далее, когда дальнейшее движение становится невозможным, приходится включать движители в работу на задний ход.

При следовании со значительным углом дрейфа нет ориентиров, расположенных таким образом, чтобы на них можно было держать курс или необходимо их большое количество, а это сложно найти особенно при проводке судна ночью. При значительных углах дрейфа и отсутствии надежных проверенных ориентиров судно может быстро выйти за кромку судового хода и сесть на мель, что делает необходимым управление не курсом судна, а вектором скорости, который может изменяться в значительных пределах.

Управление судном на пришлюзовых участках как в подходных каналах с ограниченными габаритами, так и в бьефах водохранилищ, имеющих достаточное пространство для маневрирования ориентирование, является одинаково затруднительным для судоводителя. Ограниченность габаритов требует точного учета и корректирования параметров движения судна, при этом особое внимание следует уделять прохождению участков, где наблюдаются эффекты влияния мелководья [6], [11]. При проводке судов по участкам с ограниченными или предельными габаритами между корпусом судна и рельефом дна проявляются взаимодействия гидродинамического характера, оказывающие влияние на маневрирование судна. Знание судоводителей о таких взаимодействиях могут стать критическими даже при прохождении судном поворотов, когда оно поворачивает

из широкого участка в узкий подходной канал. На участках с достаточными габаритами имеется возможность точно удерживать траекторию движения судна таким образом, чтобы следовать на достаточном расстоянии от навигационных опасностей и одновременно оставлять пространство для маневрирования других судов. Использование 3D ЭНК позволяет выполнять оценку местоположения судна применительно к габаритам водного пути и других судов. В подходных каналах шлюзов, имеющих минимальные габариты, установленное навигационное оборудование обладает достаточной точностью, но на проводку судна начинают оказывать влияние внешние факторы, учет которых за счет соответствующих упреждающих действий будет иметь определяющее значение [6].

Работа движителями на задний ход характерна как для одновинтовых судов, так и для двух- и трехвинтовых, что также требует учета сил, создаваемых за счет их работы. Способность судоводителя контролировать движение судна вперед при работе движителей на задний ход приобретает важное значение. Сложность заключается в том, что по мере работы движителя назад скорость судна начинает резко падать, при этом возможности корректировки движения резко снижаются, поскольку под воздействием боковых сил, обусловленных работой гребного винта, судно будет приобретать все большую угловую скорость при снижении продольной скорости. По мере снижения скорости судна возрастающее влияние на угловую скорость будет оказывать сила от наброса струи от винта в кормовую оконечность судна. Поскольку корпус судна испытывает гидродинамическое взаимодействие с кромками судового хода и отдельными мелями, расположенными в пределах судового хода, влияние силы от наброса струи в кормовую оконечность будет тем сильнее, чем больше сближение кормовой оконечности с формами подводного рельефа.

При отработке движителями на задний ход эффективность использования руля практически минимальная, поэтому для удержания угловой скорости судна в необходимых пределах судоводители перекладывают руль на максимальный угол, кратковременно работая движителями на передний ход на повышенных оборотах. Такой метод работы обеспечивает максимальную силу на руле и минимальное увеличение скорости хода судна, что позволяет обеспечить контролируемое движение судна с минимальной скоростью по требуемой траектории движения. Точная оценка местоположения и движения судна в этих случаях будет особенно затруднительна, поэтому предпочтительнее осуществлять движение судна вперед, а затем назад. Наибольшее затруднение будет вызывать движение судна назад. Это обусловлено тем, что рубки у большинства грузовых судов располагаются в кормовой части так, что судоводитель наблюдает за движением практически всего судна.

При наблюдении за перемещением судна по трехмерной карте появляется возможность визуального контроля за пересечением судном линии буев, ограждающих кромку судового хода. Это обстоятельство является важным для контроля за движением судна, поскольку на местности наблюдение буев может быть затруднено ввиду наличия препятствий (например, другие суда, ограниченная видимость). Наблюдение этого момента на электронной морской навигационной карте визуально может быть затруднено из-за сложности зрительного построения направлений, а также ввиду необходимости периодического изменения масштаба карты или использования других инструментов для задания отображения собственного судна и соответствующей группы навигационных знаков в области просмотра карты.

Показательным примером возможностей визуального ориентирования по 3D ЭНК, а также возможных задач, которые необходимо решать судоводителю при управлении судном на пришлюзовом участке, может служить 3D-изображение Багаевского гидроузла [12] — рис. 4, поскольку оно визуально позволяет оценить соотношения между габаритами русла реки и подходного канала шлюза. Наличие такой информации судоводителем на судне позволит скорректировать курс и скорость судна таким образом, чтобы судно проследовало безопасно из русла реки имеющего значительную ширину, в узкий подходной канал шлюза.



Рис. 4. 3D-изображение Багаевского гидроузла

Контроль движения носовой и кормовой оконечности судна. Обычная практика управления судном по ВВП предполагает оценку бокового уклонения судна и дистанции до точки начала поворота. Оценка бокового уклонения выполняется на основании ориентирования по створам, при их отсутствии — по результатам оценки свободного пространства между бортами судна и соответствующими кромками судового хода. Важное значение имеет оценка бокового уклонения, изменение которого может быть вызвано неточным ориентированием, когда, например, судно уклоняется от линии пути за счет неверного курса или неточного его удержания. По результатам наблюдения за боковым уклонением судоводитель корректирует курс судна соответствующим образом, чтобы уклонение судна стремилось к минимуму. Корректируя курс судна и оценивая изменение бокового уклонения, судоводитель за счет последовательных корректировок курса добивается того, чтобы судно следовало по оси судового хода или параллельно ей. По разнице между направлением оси судового хода и значению курса можно определить угол дрейфа. Таким образом, оценивая боковое уклонение и скорость его изменения, судоводитель в качестве ответной меры корректирует курс судна.

Уклонение судна по перпендикуляру к оси судового хода и угол дрейфа будут определять кратчайшие расстояния от корпуса судна до навигационных опасностей, и, таким образом, навигационную безопасность плавания. Как отмечалось ранее, для компенсации уклонения судна судоводитель предпринимает последовательные действия, которые имеют постепенное влияние на траекторию движения судна [6]. Такое управление оказывается эффективным в большинстве случаев, когда имеются достаточные запасы по ширине и прямолинейные участки достаточной протяженности при отсутствии лимитирующего воздействия гидрометеорологических факторов. При управлении судном на пришлюзовых участках, где ярко выражены такие эффекты, как гидродинамическое взаимодействие с кромками подходного канала и неровностями дна, а также воздействие гидрометеорологических факторов, важное значение приобретает раздельная оценка движения носовой и кормовой оконечностей судна в особенности при прохождении поворотов или выполнении отворотов при расхождении с другими судами.

Как известно, вращательное движение судна осуществляется вокруг вертикальной оси, расположенной в диаметральной плоскости судна или на ее продолжении, называемой *центром вращения* [11]. Положение центра вращение меняется в зависимости от характеристики сил, приложенных к корпусу судна, которые будут в значительной степени определяться движением судна. При движении судна с достаточной скоростью и запасами по габаритам определяющее значение будут иметь управляющие силы, создаваемые движительно-рулевым комплексом судна. В этом случае нет необходимости оценивать отдельно движение носовой и кормовой оконечности, несмотря на то, что угол дрейфа на циркуляции будет больше в кормовой оконечности

и поперечная составляющая вектора скорости будет больше в корме. При снижении оборотов движителей, для создания управляющих сил, необходимо перекладывать руль на большие углы, и по мере снижения скорости судна компенсировать дрейф за счет большего изменения курса судна. Соответственно при визуальной оценке движения судна начинает сказываться необходимость учета поперечных составляющих скорости носовой и комовой оконечности.

Для практики управления судном в такой ситуации при выполнении поворота с одного участка на другой будет иметь значение оценка выхода судна в точку начала поворота с учетом движения носовой оконечности судна, поскольку очевидно, что судоводитель, находясь на ходовом мостике, оценивает движение судна по знакам навигационного оборудования, в первую очередь, плавучим, с определенной ошибкой, которая может быть связана как со смещением плавучего знака в допустимых пределах, так и с ошибкой в оценке дистанции до точки поворота, которая оценивается визуально при сравнении видимой части корпуса судна и положения знака. Наглядное представление о наблюдении за движением судна при использовании 3D ЭНК, позволяющее всесторонне оценить движение носовой оконечности и выход в точку начала поворота за счет как изменения точки и угла обзора, так и масштаба, можно получить по фрагментам 3D ЭНК, представленным на рис. 5 и отображающим выполнение маневров судов при заходе в двухниточный шлюз [13].

а) б)

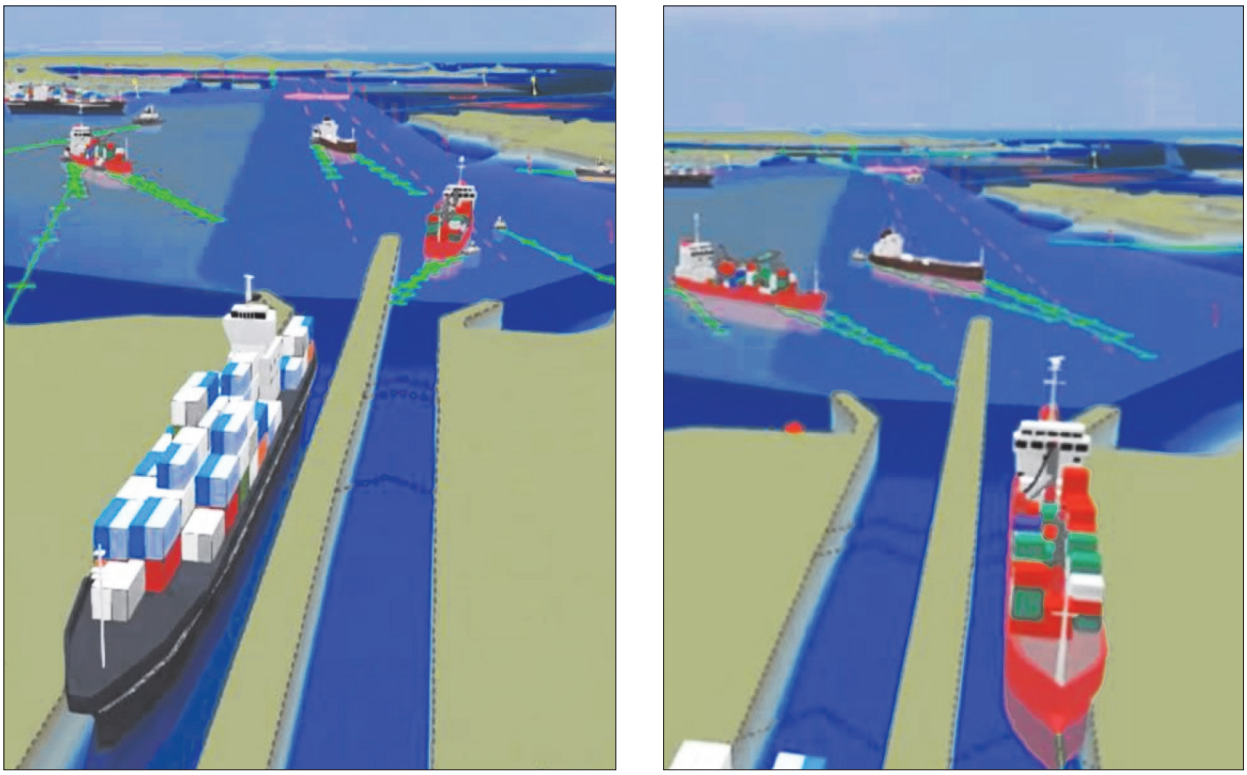


Рис. 5. Фрагменты 3D ЭНК, отображающие выполнение маневров судов при заходе в двухниточный шлюз:
а — при подходе к шлюзу на малом ходу; *б* — в момент начала маневра по выходу на ось шлюза

Точность прохода носовой оконечностью точки начала поворота важна, поскольку на переднем ходу центр вращения находится в пределах четверти длины от форштевня и, таким образом, при уверенности в прохождении потенциальным центром вращения точки начала поворота судоводитель может убедиться в том, что при вращательном движении носовая оконечность пройдет на безопасном расстоянии от навигационных опасностей, которые также могут беспрепятственно наблюдаться по 3D ЭНК.

Оценка движения кормовой оконечности будет иметь значение во избежание зарыскивания в сторону опасных глубин при выполнении поворота и чрезмерного сближения с границами судового хода. Сближение носовой оконечности с одной из кромок судового хода приводит к возникновению силы гидродинамического взаимодействия, правильный учет которой будет оказывать влияние как на прохождение носовой оконечности вблизи области опасных глубин, так и на движение кормовой оконечности. Отрыскивание носовой оконечности будет эквивалентно несвоевременному началу поворота, в результате которого будет наблюдаться уклонение судна в сторону, противоположную повороту.

При прохождении крутых поворотов (рис. 6), а также при следовании из участка, имеющего достаточную ширину, в подходной канал шлюза с минимальными габаритами контроль за движением кормовой оконечности судна будет иметь важное значение для судоводителя [13], поскольку при запоздалом начале поворота стремление точно выйти на середину подходного канала может привести к значительному дрейфу, что увеличивает раскатку кормы. При выходе судна на середину канала важное значение имеет учет дрейфа судна, который, вне зависимости от точности выполнения поворота, будет направлен в сторону внешнего борта циркуляции и, таким образом, будет обуславливать риск сближения с навигационными опасностями кормовой оконечности судна.



Рис. 6. Пример отображения расхождения судов на 3D ЭНК

При заходе судна в шлюз могут выполняться маневры, которые не выполняются судоводителями в обычных условиях. Это относится к шлюзам, по соотношению между габаритами которых и габаритами судов условия можно считать крайне стесненными. При выполнении маневра для захода судна в шлюз, имеющий минимальные запасы по габаритам, важно, чтобы на подходе к шлюзу положение ДП судна находилось на продолжении оси шлюза, а дрейф судна и его угловая скорость были минимальными.

Важное значение приобретает оценка местоположения, движения и контроля траектории движения как для судов с предельно допустимой осадкой, так и для судов с минимальной осадкой, поскольку при движении в стесненных условиях судоводители всех судов ориентируются по знакам навигационного оборудования, обозначающим границы судового хода для судов с предельными осадками. При ориентировании по этим знакам траектории движения многих судов могут проходить в непосредственной близости ввиду ориентирования по одним и тем же знакам. Удаление от знаков навигационного оборудования значительно ослабляет визуальный контроль за траекторией движения судна.

Обсуждение (Discussion)

Анализ отображения информации 3D ЭНК при проводке судов через шлюзы ВВП показал существенные преимущества при контроле за движением судна при следовании по пришлюзовым

участкам, выполнении маневров для оперативного регулирования времени подхода к шлюзу, а также непосредственном выполнении маневров при заходе судна в шлюз. Представление информации в трехмерных электронных навигационных картах дает судоводителю новую информацию, доступную для анализа при предварительном ознакомлении с участком, по которому предстоит проводить судно.

Ориентирование с использованием 3D ЭНК дает возможность заблаговременного регулирования параметров движения судна с учетом фактического влияния лимитирующих внешних факторов и в первую очередь уровня воды, т. е. позволяет принимать упреждающие решения на основании картографической информации. 3D ЭНК снабжает судоводителя информацией, как для планирования маневров в случае необходимости остановиться на судовом ходу, так и для осуществления маневров при движении назад.

Применение 3D ЭНК при управлении судном в стесненных навигационных условиях плавания, характерных для ВВП, позволяет учитывать такие параметры, как фактическая ширина и глубина судового хода, за счет визуального ориентирования по пространству между бортами судна и кромками подходного канала, наблюдаемыми с ходового мостика судна.

Внедрение картографических систем, способных отображать 3D ЭНК и таким образом вырабатывающих новую навигационную информацию, которая может быть использована для принятия решения, предоставляет судоводителю новые возможности для решения задач управления судном, тем самым повышая навигационную безопасность плавания. Навигационная информация, доступная судоводителю при управлении судном при заходе в шлюз, позволяет повысить точность действий как для следования судна по оси шлюза, так и для регулирования скорости судна при заходе в шлюз.

Заключение (Conclusion)

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

3D ЭНК служит источником информации, позволяющим выполнять наблюдения за движением судна визуально и при помощи отображения параметров его движения переходить от управления судном по курсу, при условии незначительного влияния внешних факторов, к управлению судном по скорости с учетом фактического уровня воды, что сложно сделать подобным образом по 2D ЭНК, отображаемым в современных системах отображения электронных навигационных карт и информации, до управления вектором скорости судна, когда влияние внешних факторов возрастает и необходимо точно выдерживать траекторию движения судна. Визуальное наблюдение по 3D ЭНК также дает возможность отдельно оценивать движение носовой и кормовой оконечности, что позволяет избежать управляющих воздействий, предпринимаемых со значительным запасом, когда одна из оконечностей прошла мимо навигационной опасности на достаточном расстоянии, а для проводки другой требуется резкое изменение режима работы движительно-рулевого комплекса.

Основными достоинствами трехмерного отображения являются:

– представление навигационной обстановки вокруг судна, в частности возможность регулировать высоту глаза наблюдателя, позволяет повысить скорость полноту оценки дистанций до ближайших навигационных опасностей;

– повышение полноты контроля за движением судна относительно знаков навигационного оборудования;

– снижение информационной нагрузки за счет освещения подводной обстановки как вокруг собственного судна, так и других судов, находящихся поблизости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев В. И.* Аварийные случаи и транспортные происшествия на водном транспорте и их расследование / В. И. Дмитриев. — М.: Моркнига, 2019. — 279 с.

2. *Ионов С. Е.* Совершенствование способов и методов повышения безопасности и эффективности судоходства на шлюзовых системах: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.22.19 / С. Е. Ионов. — Н. Новгород: ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2013. — 23 с.

3. ГОСТ 26600-98. Знаки навигационные внутренних судоходных путей. Межгосударственный стандарт. — Минск: ИПК «Издательство стандартов», 2002. — 33 с.

4. *Каретников В. В.* Динамика методологии управления судном в узкости при использовании 3D навигационных карт / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, К. И. Ефимов // Морская радиоэлектроника. — 2019. — № 3 (69). — С. 44–49.

5. *Прохоренков А. А.* Использование трехмерных навигационных карт для повышения безопасности судовождения по внутренним водным путям / А. А. Прохоренков // International journal of advanced studies. — 2019. — Т. 9. — № 1. — С. 26–49. DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-26-49.

6. *Шемонаев В. Ю.* Практичні особливості управління суднами при плаванні в обмежених водах та вузкостях // Молодий вчений. — 2020. — № 2 (78). — С. 17–23. DOI: 10.32839/2304-5809/2020-2-78-4.

7. *Katopodes N. D.* Chapter 4-Shallow-Water Approximation / N. D. Katopodes // Free-Surface Flow: Shallow Water Dynamics. — Elsevier Inc., 2019. — Pp. 188–254. DOI: 10.1016/B978-0-12-815487-8.00004-4.

8. *Драчёв В. Н.* Учет циркуляции при плавании в стесненных районах: монография / В. Н. Драчёв. — Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2008. — 98 с.

9. *House D. J.* Appendix A-Controlling elements of ship handling / D. J. House // Ship Handling. Theory and practice. — Elsevier Ltd., 2007. — Pp. 171–187. DOI: 10.1016/B978-075068530-6/50014-4.

10. *Liu T.* An approach to 3D model fusion in GIS systems and its application in a future ECDIS / T. Liu, D. Zhao, M. Pan // Computers & Geosciences. — 2016. — Vol. 89. — Pp. 12–20. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.01.008.

11. *House D. J.* Seamanship Techniques: Shipboard and Marine Operations / D.J. House. — 5th Edition. — Routledge, 2019. — 921 p.

12. Строительство Багаевского гидроузла на р. Дон [Электронный ресурс] / Официальный сайт Федерального агентства морского и речного транспорта. — Режим доступа: http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/rechnoy_flot/infrastrukturnyie_proektyi_na_vnutrennem_vodnom_transporte.html (дата обращения 14.05.2020).

13. *Carral L.* Effect of Inaugurating the Third Set of Locks in the Panama Canal on Vessel Size, Manoeuvring and Lockage Time / L. Carral, J. Tarrío-Saavedra, S. Naya, J. Bogle, R. Sabonge // Journal of Navigation. — 2017. — Vol. 70. — Is. 6. — Pp. 1205–1223. DOI: 10.1017/S0373463317000285.

REFERENCES

1. Dmitriyev, V. I. *Avariynyye sluchai i transportnyye proisshestviya na vodnom transporte i ikh rassledovaniye.* M.: Morkniga, 2019.

2. Ionov, S. Ye. Sovershenstvovaniye sposobov i metodov povysheniya bezopasnosti i effektivnosti sudokhodstva na shlyuzovykh sistemakh. Abstract of PhD diss. N. Novgorod: FBOU VPO «VGAVT», 2013.

3. GOST 26600–98. Znaki navigatsionnyye vnutrennikh sudokhodnykh putey. Mezhgosudarstvennyy standart. Minsk: IPK Izdatel'stvo standartov, 2002.

4. Karetnikov, V. V., A. A. Prokhorenkov, and K. I. Efimov. "Dynamics of ship handling methodology in narrows by using 3D navigation charts." *Marine Radio-electronics* 3(69) (2019): 44–49.

5. Prokhorenkov, Andrei Aleksandrovich. "Use of three-dimensional navigation charts to improve inland waterways navigational safety." *International journal of advanced studies* 9.1 (2019): 26–49. DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-26-49.

6. Shemonayev, Volodymyr. "Practical ship handling during maneuvering in straitened and narrow waters." *Young Scientist* 2(78) (2020): 17–23. DOI: 10.32839/2304-5809/2020-2-78-4.

7. Katopodes, Nikolaos D. "Chapter 4-Shallow-Water Approximation." *Free-Surface Flow: Shallow Water Dynamics*. Elsevier Inc., 2019. 188–254. DOI: 10.1016/B978-0-12-815487-8.00004-4.

8. Drachev, V. N. *Uchet tsirkulyatsii pri plavanii v stesnennykh rayonakh. Monografiya.* Vladivostok: MGU im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2008.

9. House, D. J. "Appendix A-Controlling elements of ship handling." *Ship Handling. Theory and practice*. Elsevier Ltd., 2007. 171–187. DOI: 10.1016/B978-075068530-6/50014-4.

10. Liu, Tao, Depeng Zhao, and Mingyang Pan. "An approach to 3D model fusion in GIS systems and its application in a future ECDIS." *Computers & Geosciences* 89 (2016): 12–20. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.01.008.

11. House, D. J. *Seamanship Techniques: Shipboard and Marine Operations*. 5th Edition. Routledge, 2019.

12. Stroitel'stvo Bagayevskogo gidrouzla na r. Don. Web. 14 May 2020 <http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/rechnoy_flot/infrastrukturnyie_proektyi_na_vnutrennem_vodnom_transporte.html>.

13. Carral, Luis, Javier Tarrío-Saavedra, Salvador Naya, Johnny Bogle, and Rodolfo Sabonge. "Effect of inaugurating the third set of locks in the Panama Canal on vessel size, manoeuvring and lockage time." *The Journal of Navigation* 70.6 (2017): 1205–1223. DOI: 10.1017/S0373463317000285.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Каретников Владимир Владимирович — доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *kaf_svvp@gumrf.ru*, *spguwc-karetnikov@yandex.ru*	**Karetnikov, Vladimir V.** — Dr. of Technical Sciences, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation e-mail: *kaf_svvp@gumrf.ru*, *spguwc-karetnikov@yandex.ru*
Прохоренков Андрей Александрович — кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *a.a.prokhorenkov@mail.ru*, *kaf_svvp@gumrf.ru*	**Prokhorenkov, Andrei A.** — PhD, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *a.a.prokhorenkov@mail.ru*, *kaf_svvp@gumrf.ru*
Лысенко Юрий Николаевич — доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *ur.lysenko001@ya.ru*, *kaf_svvp@gumrf.ru*	**Lysenko, Yuriy N.** — Associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *ur.lysenko001@ya.ru*, *kaf_svvp@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 18 мая 2020 г.
Received: May 18, 2020.

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

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-551-566

SEISMIC SURVEY IN TRANSIT ZONE. KRAB SYSTEM FULL-SCALE TESTS (STAGE 2)

D. A. Ilinskiy, K. A. Roginskiy, O. Y. Ganzha

P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

It is emphasized that the Russian complex of "KRAB-400" seismic bottom stations was developed for hydrocarbon survey on the continental shelf of the Russian Federation within the framework of import substitution program. The tests carried out on a limited sample of 10% of the complex bottom stations in the first stage have revealed unavailability of the complex for further tests. This fact has dictated the necessity to develop procedures for hardware integrated check to identify engineering faults. The second stage of full-scale tests performed on the basis of the developed integrated check procedures is described in the paper. The test procedures to validate the key parameters of bottom stations are explained. They include the adjustment of seismic signal source, accuracy assessment for seismic station timer, identity evaluation for bottom station seismic channels, assessment of station displacement on the seabed with respect to the shipboard launch point, analysis of station compass and tiltmeter indications on the seabed, definition of hydrophone channel optimum gain. The technology of seismic profile mapping using MultiChannel Seismic (CDP method) at test range is offered. The performed tests have revealed that the overall reject rate of stations by the various parameters (failed hydrophones, reversed polarity of connection, channels nonidentity, failure to meet timer specifications) is 9.18% of total number of stations. This reject rate is unacceptable for the field trials. Regardless of hardware engineering deficiencies the second stage of tests has validated the general system availability to gain high-quality seismic data. Hardware performance is rated at the level of the best world-class products. The processed seismic data has enabled evaluating the accuracy of the obtained results, developing recommendations for designer to enhance reliability and efficiency of the stations ready for pilot testing at one of the licensed areas of the continental shelf of the Russian Federation.

Keywords: transition zones, import substitution, seismic survey, autonomous seismic bottom station, CDP time section.

For citation:
Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Seismic survey in transit zone. KRAB system full-scale tests. Stage 2." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 551–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-551-566.

УДК 550.834.08

СЕЙСМОРАЗВЕДКА В ТРАНЗИТНОЙ ЗОНЕ. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ КРАБ (ЭТАП 2)

Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Москва, Российская Федерация

Отмечается, что для разведки углеводородов на континентальном шельфе Российской Федерации в рамках программы импортозамещения был разработан отечественный комплекс сейсмических донных станций «КРАБ-400». Испытания первого этапа, проведенные на ограниченной выборке 10 % донных станций комплекса, показали неготовность коплекса к циклу дальнейших испытаний. В этой связи возникла необходимость создания методики комплексной проверки аппаратуры для выявления технологических недостатков. В статье дано описание второго этапа натурных испытаний на основе разработанной

методики комплексной проверки. Раскрыты методы проверки основных параметров донных станций. Методика проверки включала в себя подбор параметров источника сейсмических сигналов, оценку точности хода часов сейсмических станций, оценку идентичности сейсмических каналов донных станций, оценку смещения положения станции на дне относительно точки сброса с борта судна, анализ показания компаса и наклономера станций на дне, определение оптимальной величины усиления канала гидрофона. Показана технология построения сейсмического профиля по методу отраженных волн в модификации общей глубинной точки на опытном полигоне. Проведенные испытания показали, что общий процент брака станций по различным параметрам (нерабочие гидрофоны, обратная полярность подключения, неидентичность каналов, несоответствие часов требованиям технического задания) составляет 9,18 % от общего числа станций. Данный процент брака является недопустимым при проведении опытно-методических работ. Несмотря на технические недостатки аппаратуры, в целом второй этап проведения испытаний показал, что система работопригодна и может обеспечить получение качественного сейсмического материала. Технические характеристики оборудования находятся на уровне мировых образцов. По результатам обработки сейсмических данных была проведена оценка качества полученных результатов, даны рекомендации разработчику по повышению надежности и работоспособности станций в целях подготовки их к проведению опытно-промышленных испытаний на одном из лицензионных участков континентального шельфа Российской Федерации.

Ключевые слова: транзитные зоны, импортозамещение, сейсморазведка, автономные сейсмические донные станции, временной разрез ОГТ.

Для цитирования:
Ильинский Д. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Натурные испытания системы КРАБ (этап 2) / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 551–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-551-566.

Введение (Introduction)

В связи с санкционной политикой ряда европейских стран и нарастающим интересом отечественных компаний-недропользователей по освоению континентального шельфа Российской Федерации была разработана программа по импортозамещению промышленного оборудования для освоения шельфовых месторождений. В статье дано описание второго этапа натурных испытаний отечественной системы сейсмических донных станций (СДС) — «КРАБ», разработанной в рамках программы импортозамещения в акватории Черного моря на базе Южного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук.

Для исследования был использован комплекс СДС «КРАБ», доработанный по результатам первого этапа испытаний [1]. Была разработана методика и программа проверки элементов комплекса на соответствие требованиям технического задания. Методика проверки включала в себя подбор параметров источника сейсмических сигналов, оценку точности хода часов сейсмических станций, оценку идентичности сейсмических каналов донных станций, оценку смещения положения станции на дне относительно точки сброса с борта судна, анализ показания компаса и наклономера станций на дне, определение оптимальной величины усиления канала гидрофона. Проведенная на первом этапе проверка случайной выборки сорока СДС, по тестируемым параметрам показала, — процент брака составляет 9,18 %, что является недопустимым при проведении полевых работ. Были построены сейсмические профили по методу отраженных волн в модификации общей глубинной точки [2]–[4], полученные результаты обработаны и выданы замечания разработчику для устранения перед проведением натурных испытаний на одном из лицензионых участках континентального шельфа Российской Федерации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Актуальность полномаштабного тестирования системы «Краб» и методические рекомендации для его проведения.

Проведенные на первом этапе [1] испытания ограниченной выборки, состоящей из сорока СДС, что составляет 10 % комплекса «КРАБ-400», показали практически полную неготовность комплекса не только к промышленным, но даже к натурным испытаниям. Работа спуско-подъем-

ных устройств (СПУ) не могла обеспечить корректную расстановку СДС по профилю. Механизмы СПУ не отвечали требованиям техники безопасности к работам на палубе судна. По результатам постановки СДС на этом этапе были получены сейсмические данные недостаточного качества для проведения производственных работ. Применение ортогонально ориентированных геофонов, корректно работающих при отклонениях от горизонтальной оси донной станции на дне не более 20°, требует тщательной процедуры постановки. Разработанное в составе комплекса СПУ не позволяло реализовать это условие. В результате при постановке станций на двух профилях процент брака сейсмического материала в среднем составил 25 %.

Следует отметить, что при работе на каменистых участках дна, характерных для рельефа опытного полигона, принципиальная постановка станции в горизонтальном положении не представляется возможной. В связи с этим на втором этапе было принято решение применить ручной метод постановки СДС, который позволит уменьшить процент брака, вызванный неправильным положением станций на дне. Испытания СПУ, разработанного в составе комплекса, наглядно показали, что автоматизация этого процесса может осуществляться только при помощи очень сложных устройств [5] (https://www.inapril.com/automation/), защищенных патентами [6].

Первый этап выявил существенную неидентичность СДС по величине усиления канала гидрофона, несоблюдение полярности его подсоединения, несоответствие положения осей геофона положению осей электронного компаса, а также плохую юстировку компаса и инклинометра. Поэтому актуальным является вопрос разработки методик тестирования элементов системы, проведение тестирования, выявление критических параметров с указанием источника неидентичности и составление дефектной ведомости. Для подтверждения работоспособности оборудования данный этап испытаний должен завершиться постановкой двух линейных профилей и получением качественных сейсмических данных.

Проверка СДС «КРАБ» на идентичность.

Второй этап натурных испытаний комплекса «КРАБ» проходил на базе Южного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. К испытаниям было представлено 176 СДС. Отсутствие специального лабораторного прецезионного оборудования для проведения тестирования сейсмических каналов [7], [8] обусловило необходимость разработки методики испытаний, максимально приближенной к реальной работе устройств на дне. Станции были подготовлены к работе и группами по 16 шт. устанавливались на погружную технологическую площадку (ПТП) — рис. 1. На ПТП они были сориентированы в одном направлении по положению разъемов и зафиксированы во избежание их возможного смещения при погружении в воду. Глубина моря в районе погружения станций составила 8 м. Для проверки на идентичность проводилось по шестьдесят излучений пневматическим источником с интервалом 5 с для каждой из групп станций.

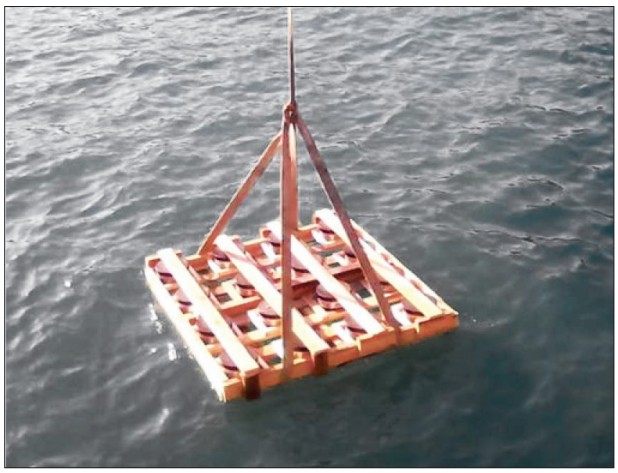


Рис. 1. Погружная техническая площадка
с шестнадцатью донными станциями

Для анализа данные для каждой станции нарезались по 5 с от начала времени срабатывания каждого излучения. Были получены сейсмограммы общей точки приема для каждой компоненты (три компоненты геофона — *X*, *Y*, *Z* и гидрофон *H*). На рис. 2 для СДС с заводским номером № 444 и номерами излучений 10–30 показан пример сейсмограммы общей точки приема четырехкомпонентной записи. Здесь и далее приняты следующие условные обозначения: *H* — канал гидрофона; *Z* — вертикальная компонента геофона; *X* и *Y* — горизонтальные ортогональные компоненты геофона. На вертикальной шкале показаны номера излучений. Горизонтальная шкала дана в секундах от момента каждого излучения. Видна хорошая повторяемость и стабильность работы пневмоисточника.

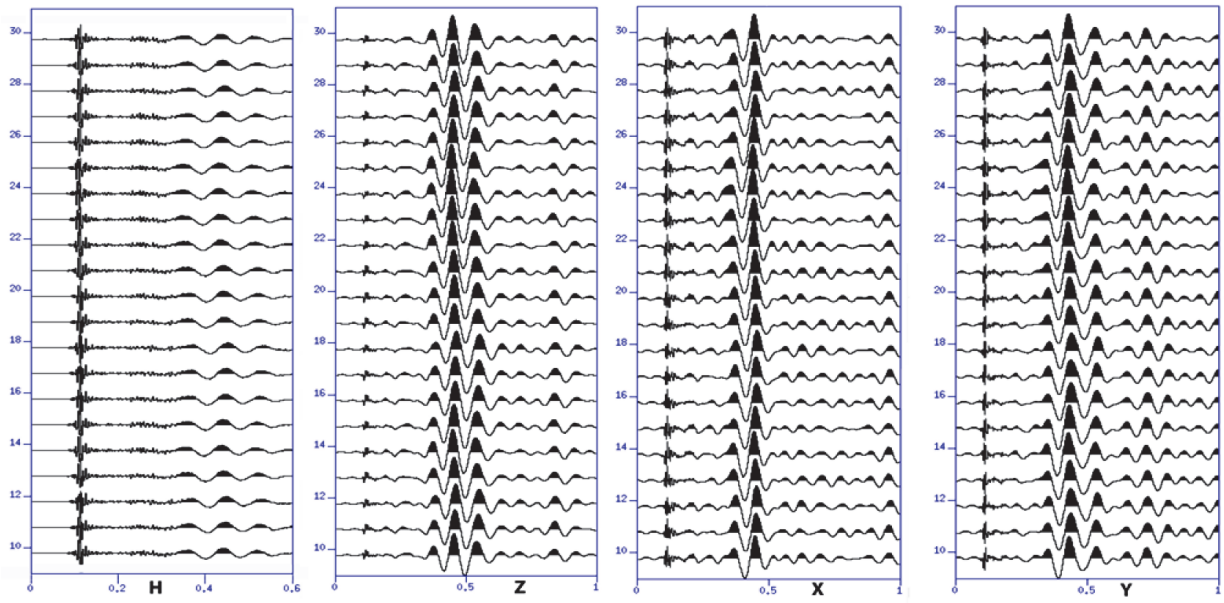


Рис. 2. Сейсмограммы общей точки приема для станции № 444 для четырех компонент: *H*, *Z*, *X*, *Y*

Данные для гидрофона приведены с автоматической регулировкой усиления, длина окна которой составляет 0,2 с для демонстрации низкочастотной компоненты поля в последующих вступлениях, и не видна без регулировки усиления из-за большого перепада амплитуд между первыми вступлениями и последующими. Для геофонов не наблюдается такого перепада амплитуд и поэтому сейсмограммы общей точки приема для этих каналов даны без регулировки амплитуд.

Опытные испытания и результаты (Pilot Tests and Results)

Подбор параметров сейсмического источника. При подготовке к работе была выполнена оптимизация объема пневмоисточника и его заглубление. Анализ показал, что заглубление 2 м и объем 0,6 л являются оптимальными параметрами.

Первичная обработка всех сейсмограмм общей точки приема показала хорошую повторяемость и стабильность работы пневмоисточника. Пример стабильности приведен на рис. 2.

Оценка точности хода часов СДС. Перед началом работы СДС производится настройка термостатированного генератора внутренних часов станции с использованием секундных импульсов PPS, получаемых от системы GPS. При работе станции относительное отклонение точности хода часов не должно превышать гарантированной величины 5×10^{-9}. Одна станция показала небольшое превышение отклонения точности хода часов $5{,}8 \times 10^{-9}$ по сравнению с требованиями технического задания, а две станции показали существенное отклонение $5{,}6 \times 10^{-8}$ и $-1{,}1 \times 10^{-7}$. Данные этих станций были забракованы.

Оценка идентичности сейсмических каналов. Оценка идентичности — это комплексная проверка системы «КРАБ» на одинаковое усиление каналов между различными СДС, проверка полярности подключения геофонов и гидрофонов, отсутствие каналов без сейсмических данных. Результатом проверки является «Дефектная ведомость», передаваемая разработчику для устране-

ния недостатков. После получения сейсмограмм общей точки приема для каждой станции и каждой компоненты они объединялись и сортировались по излучениям, полученные сейсмограммы общего пункта излучения подвергались анализу. Рассмотрим процесс анализа на примере данных шестнадцати станций одного из тестовых измерений (условно пронумеруем станции от 1 до 16 в соответствии с позициями на ПТП).

На рис. 3 показана сейсмограмма общей точки излучения для канала гидрофона. Номера позиций станций «КРАБ» даны на вертикальной шкале слева. Горизонтальная шкала показывает секунды с момента излучения. На рис. 3, *а* показаны трассы, отнормированные на общий максимум. На рис. 3, *б* представлены трассы, отнормированые на максимальное значение в каждой трассе.

Анализ данных показывает:

– канал гидрофона СДС № 16 в нерабочем состоянии;
– на каналах СДС № 2, 4–11, 13, 14 сейсмограммы идентичны;
– усиление канала СДС № 12 не соответствует остальным станциям;
– на каналах СДС № 1 и № 15 имеются фазовые сдвиги;
– запись на канале СДС № 3 отличается от запией нормальных каналов.

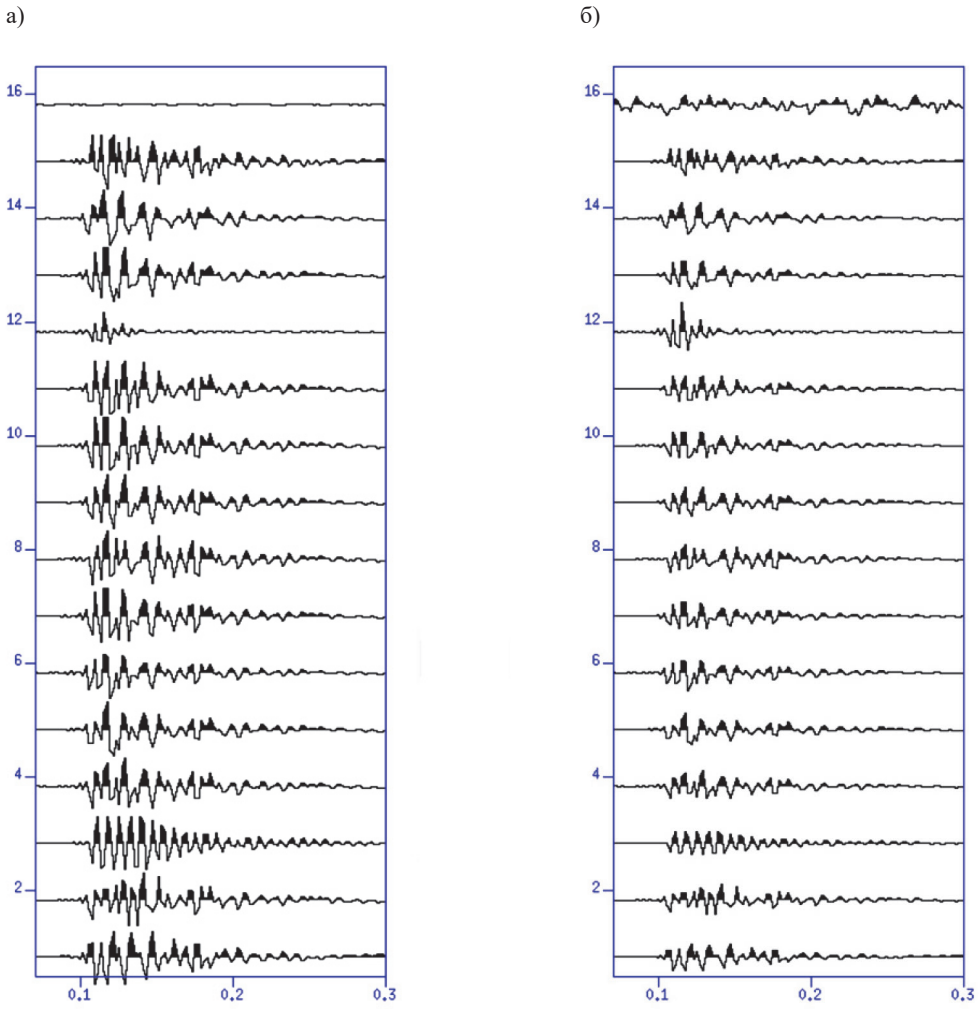


Рис. 3. Сейсмограмма общего пункта взрыва для группы испытаний каналов станции № 7:
а — канал гидрофона; *б* — излучение № 16
Условные обозначения:
по горизонтали — время в секундах; по вертикали — номер позиции СДС на ПТП

На рис. 4 показана выборка из одиннадцати идентичных трасс с хорошей амплитудно-фазовой идентичностью и одинаковым коэффициентом усиления гидрофона для излучения № 26.

Величина коэффициента усиления была установлена равной 41 на соответствующих СДС. На рис. 5 показаны данные канала гидрофона для СДС с номерами каналов станций № 1, 2 и 15. Канал № 2 взят как пример идентичной записи. Каналы станций № 1 и 15 имеют перевернутую фазу по отношению к другим станциям при сохранении формы записи. При монтаже СДС не соблюдена полярность подключения гидрофона к усилителю.

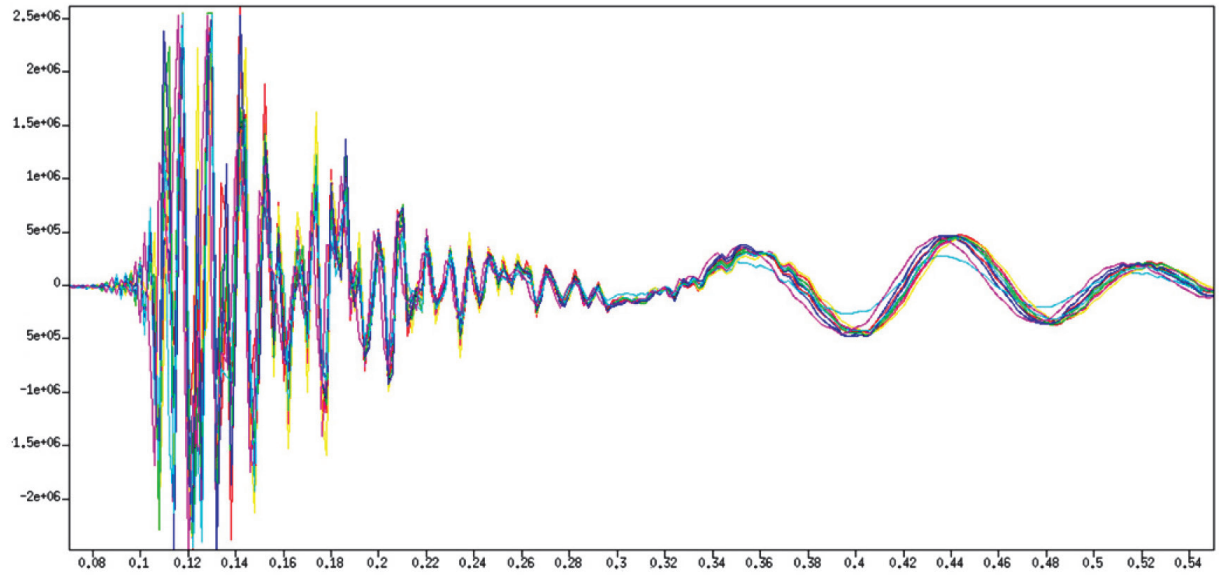


Рис. 4. Сейсмограммы гидрофона для СДС № 2, 4–11, 5, 13, 14
Условные обозначения:
по горизонтали — время в секундах (с); по вертикали — напряжение в мкВ

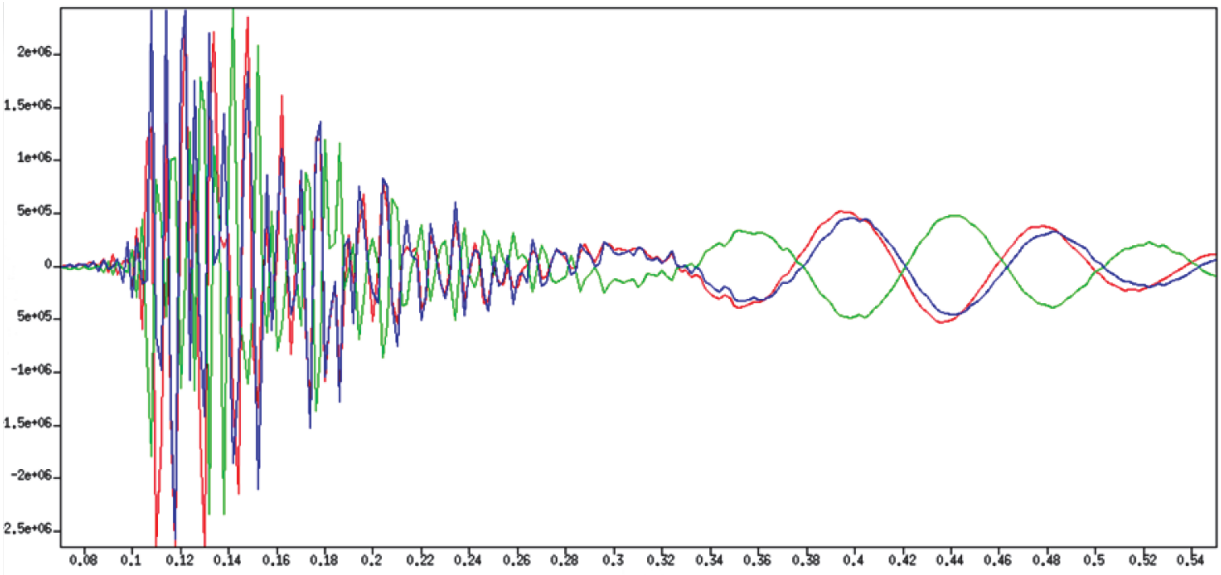


Рис. 5. Сейсмограммы гидрофона для СДС № 1, 2 и 15
Условные обозначения:
СДС № 1 — красная линия; СДС № 2 — зеленая линия; СДС № 15 — синяя линия;
по горизонтали — время в секундах (с); по вертикали — напряжение в мкВ

Аналогичным образом были проанализированы данные записей СДС всех групп испытаний. В результате тестирования 176 станций было выявлено следующее:

– на пяти СДС гидрофоны не работают по разным причинам (2,8 %);

– на шести СДС гидрофоны подключены с обратной полярностью (3,5 %);

– три СДС показали неидентичность канала гидрофона (1,75 %);

– две СДС показали несоответствие часов требованиям технического задания (1,1 %).

Общий процент брака составил 9,18 %, что является недопустимым при промышленном использованиии комплекса.

Постановка СДС по линейному профилю. Неудачная конструкция СПУ [1] выявила сложность создания устройств для механизации спуско-подъема СДС при транзитных сейсмических работах с целью уменьшения доли ручного труда. Необходимость правильной постановки станций для опытно-промышленных испытаний привела к разработке новой методики раскладки СДС. Ключевыми моментами для обепечения оптимальной постановки станций являлись:

– обеспечение спуска станций в воду в «свободном» режиме без натяжения несущего кабель-троса;

– недопущение протяжки гирлянды станций по дну возникшим натяжением несущего кабель-троса;

– обеспечение постановки СДС в точки, соответствующие заранее подготовленным координатам профиля [9].

Отработка методики постановки производилась с использованием двадцати СДС на двух линейных профилях с борта НИС «Парус». Точки постановки станций на профиле были заранее рассчитаны и загружены в навигационный компьютер на мостике судна, в который приходили сигналы DGPS. На рис. 6 показана постановка СДС на профилях через 50 и 25 м соответственно, далее выполнялся отстрел профиля длиной 2,4 км пневмоисточником с застрелами по 700 м от каждого конца профиля. В начале и конце линии расстановки станций были установлены концевые буи с грузами.

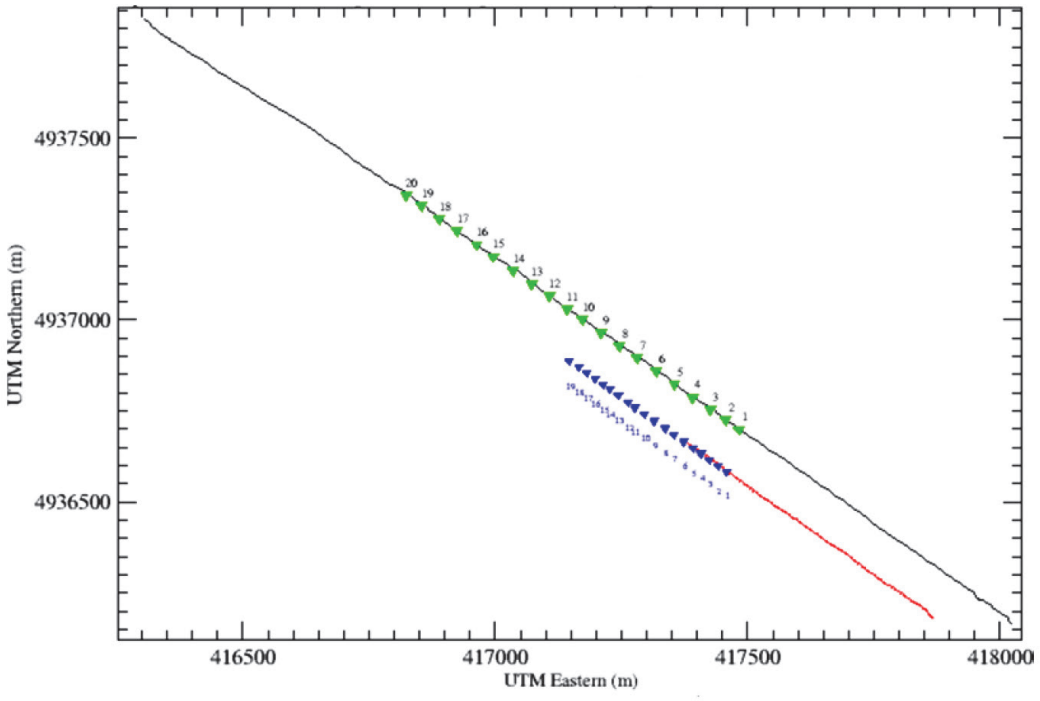


Рис. 6. Планируемое положение 20 СДС
Условные обозначения:
зеленые треугольники — профиль 1 (расстояние 50 м);
синие треугольники — профиль 2 (расстояние 25 м);
черная линия — отстрел на профиле 1; красная линия — отстрел на профиле 2

Технология постановки станций заключалась в следующем. Судно шло по навигационному компьютеру и выходило на линию профиля заранее, до достижения первой точки постановки

концевого буя. За 1 мин до достижения точки постановки первого концевого буя с кормы судна выбрасывался норвежский буй на фале, соединенном с грузом концевого буя. В момент достижения точки постановки концевого буя по команде с мостика с кормы выбрасывался груз концевого буя, а привязанный к нему несущий фал линии начинал вручную вытравливаться в воду. В момент достижения судном точки сброса первой станции она сбрасывалась по команде инженера-гидрографа. По достижении следующей точки постановки станции процедура повторялась и так до последней станции, после которой через 100 м выбрасывался груз и второй концевой буй.

Целью расстановки стала проверка способа постановки станций на дно в более жестких условиях, в отличие от предыдущего теста, при расстоянии между станциями, равном 25 м. При той же скорости судна 3 уз необходимо проводить постановку станций в два раза чаще — каждые 16 с. В данном случае глубина места постановки станций по профилю больше, чем расстояние между ними, и скорость движения судна по профилю больше, чем скорость свободного падения станции в воде. Это создает ситуацию, когда предыдущая станция еще не достигла дна, а следующая за ней уже находится в воде. Главной целью этой расстановки является проверка правильности раскладки станций на дне и оценка качества полученных данных.

Отстрел профилей с помощью пневмоисточника. В качестве источника был использован один сейсмический источник, разработанный ООО «Пульс» [10], с объемом рабочей камеры 1,2 л и с глубиной подвеса пушки 4 м. Излучения проводились при давлении 130 бар, средней скорости судна 3,86 уз и расстоянием между каждым излучением 10 м. Излучения проводились каждые 5 с с привязкой по времени излучения к соответствующему импульсу GPS приемника. Точное время излучения и его координаты фиксировались.

На первом профиле было проведено 241 излучений сейсмического источника, общая длина линии отстрела составила 2389 м, включая застрелы с обоих концов по 700 м. Отстрел профиля занял 20 мин. На втором профиле было проведено 76 излучений. Общая длина отстрела составила 760 м, включая отстрел с одной строны 250 м. Продолжительность отстрела составила 7 мин (рис. 6).

Подъем станций со дна. Подъем станций осуществлялся тем же способом, что и на первом этапе натурных испытаний [1], на следующий день после постановки станций и отработки пневмоисточником. На первом профиле после подъема на борт первых пяти станций обнаружился зацеп ведущего фала станций из-за неоднородности дна. Было принято решение остановить подъем и вызвать водолазов для решения проблемы зацепа несущего фала. Выяснилось, что несущий кабель-трос сделал круговую петлю вокруг камня-скалы на дне моря. После освобождения от зацепа подъем оставшихся на дне станций прошел без проишествий. Подъем СДС на втором профиле был выполнен в штатном режиме. Таким образом подтвердились существенные недостатки постановки СДС гирляндным методом в районах, для которых характерны препятствия на дне.

Смещение положения СДС на дне относительно точки сброса по преплоту. Анализ смещения СДС по отношению точки сброса производился по водной волне [11]. На рис. 7 приведены графики отклонения СДС от точек, определяемых преплотом для обоих профилей. На профиле 1 в среднем сдвиг равен 65 м, что свидетельствует о систематической ошибке при расстановке станций. На профиле 2 в среднем сдвиг равен 0 м, что свидетельствует об отсутствии систематической ошибки при расстановке станций.

Причина образования систематической ошибки состояла в постоянной задержке порядка 83 мс. Эта величина была определена путем сравнения сейсмограм с теоретическими модельными расчетами времени прихода водной волны. Задержка была вызвана двумя причинами: задержкой срабатывания пневмоисточника 33 мс и 50 мс постоянной задержкой, возникающей при работе аппаратуры СДС.

После устранения систематической ошибки отклонения от преплота составляют менее 15 м, что укладывается в стандарты промышленных работ.

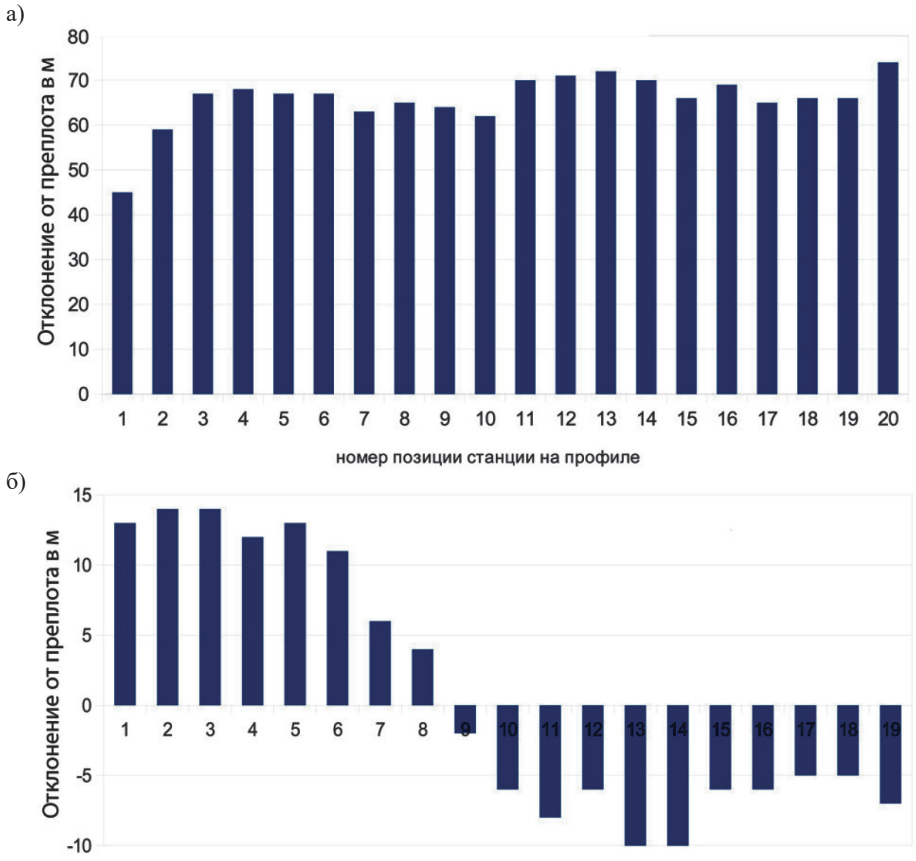


Рис. 7. Статистика сдвига положения станций на дне относительно преплота:
а — профиль 1 — расстояние между СДС 50 м;
б — профиль 2 — расстояние между станциями 25 м

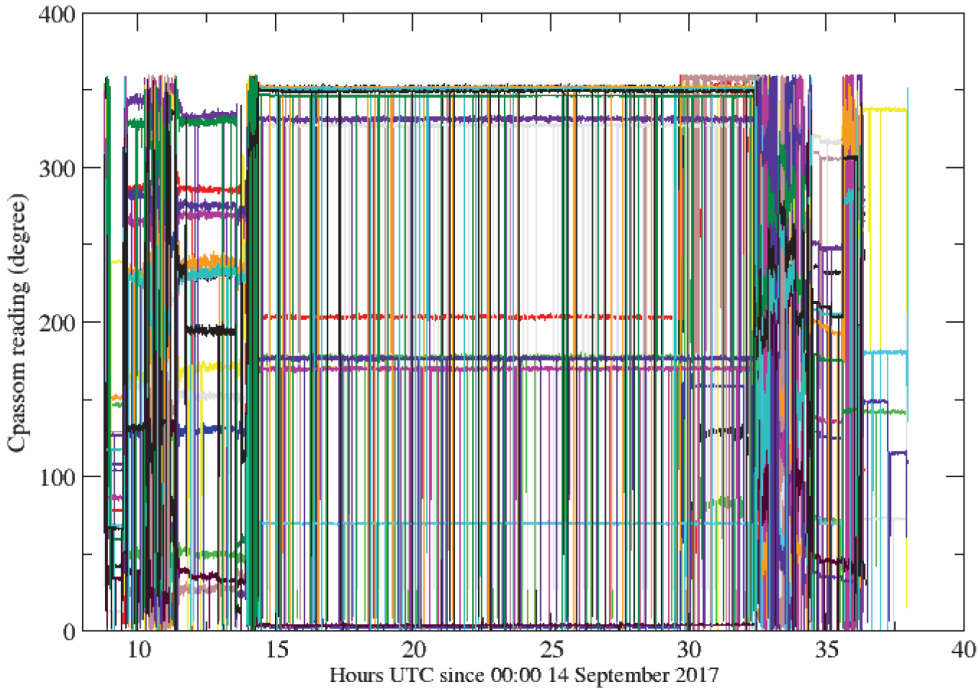
Анализ данных показаний компаса и наклонов донных станций (крена и дифферента). На рис. 8 показаны данные, полученные на станциях по измерениям азимута (см. рис. 8, *а*) и углов крена (см. рис. 8, *б*) цифровыми датчиками. Данные дифферента имеют такой же вид, что и данные крена. Большое количество ложных измерений затрудняет интерпретацию данных и требует специального математического обеспечения для обработки записанных значений и получения нужной информации об азимуте, угле крена и дифференте станции.

В тестовом режиме все данные приходилось выводить на графики и вручную снимать правильные показания компаса, крена и дифферента. Среднее значение наклона станций на профилях составило 3,3 град. Максимальное отклонение от горизона было 12,2 град., что не превышает допустимой величины 20 град. для геофонов DX-20 (http://geospace-ufa.ru/catalog/geofony/gs20dx.html). У четырех СДС отсутствовали данные измерения компаса и инклинометров из-за исчерпанности памяти для записи этих измерении. Новая методика постановки станций полностью себя оправдала для постановки 20 СДС, и был получен 100 % результат по качеству данных. Все станции были поставлены в горизонтальное положение с учетом допустимых наклонов.

Определение оптимального усиления канала гидрофона. Оценка усиления канала гидрофона проводилась по сводным монтажам сейсмограмм общего пункта приема для канала гидрофона без регулировки усиления и с его выравниванием. На монтаже с автоматической регулировкой усиления видно, что все гидрофоны работали. На монтаже без регулировки видно, что на позициях № 4, 7, 15 коэффициент усиления 6 амплитуды сигнала заметно меньше, в отличие от остальных, где коэффициент усиления 41.

На рис. 9 показаны сейсмограммы самых ближних удалений 0–10 м от источника для 20 станций профиля 1 на канале гидрофона. На рис. 9, *б* все трассы распределены по позициям станции на ТПП, на рис. 9, *а* те же сейсмограммы для станций на позициях № 4, 7, 15 с уменьшенным усилением гидрофона, на рис. 9, *в* сейсмограммы для всех станций на ТПП. Видно, что три станции с уменьшенным усилением не дают перегрузку на ближних удалениях и не искажают форму полученного сигнала от пушки, в то же время все остальные каналы показывают сильную перегрузку сигнала и искажение его формы вследствие того, что выбранный коэффициент усиления 41 оказался завышенным для работы с пушкой конкретной конфигурации и усиление канала гидрофона следует уменьшить.

а)



б)

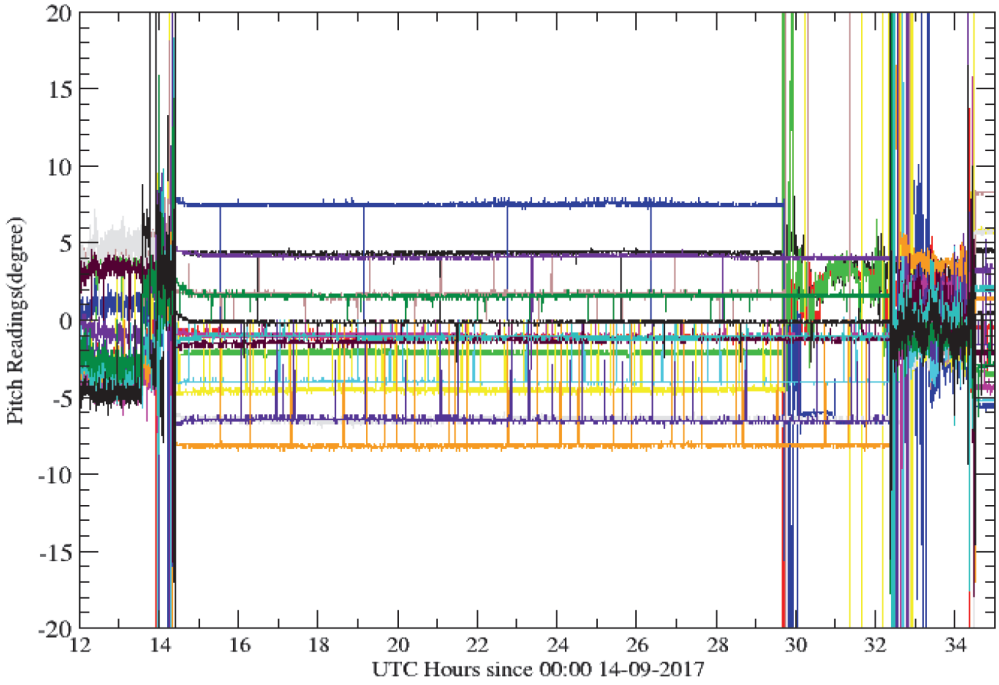
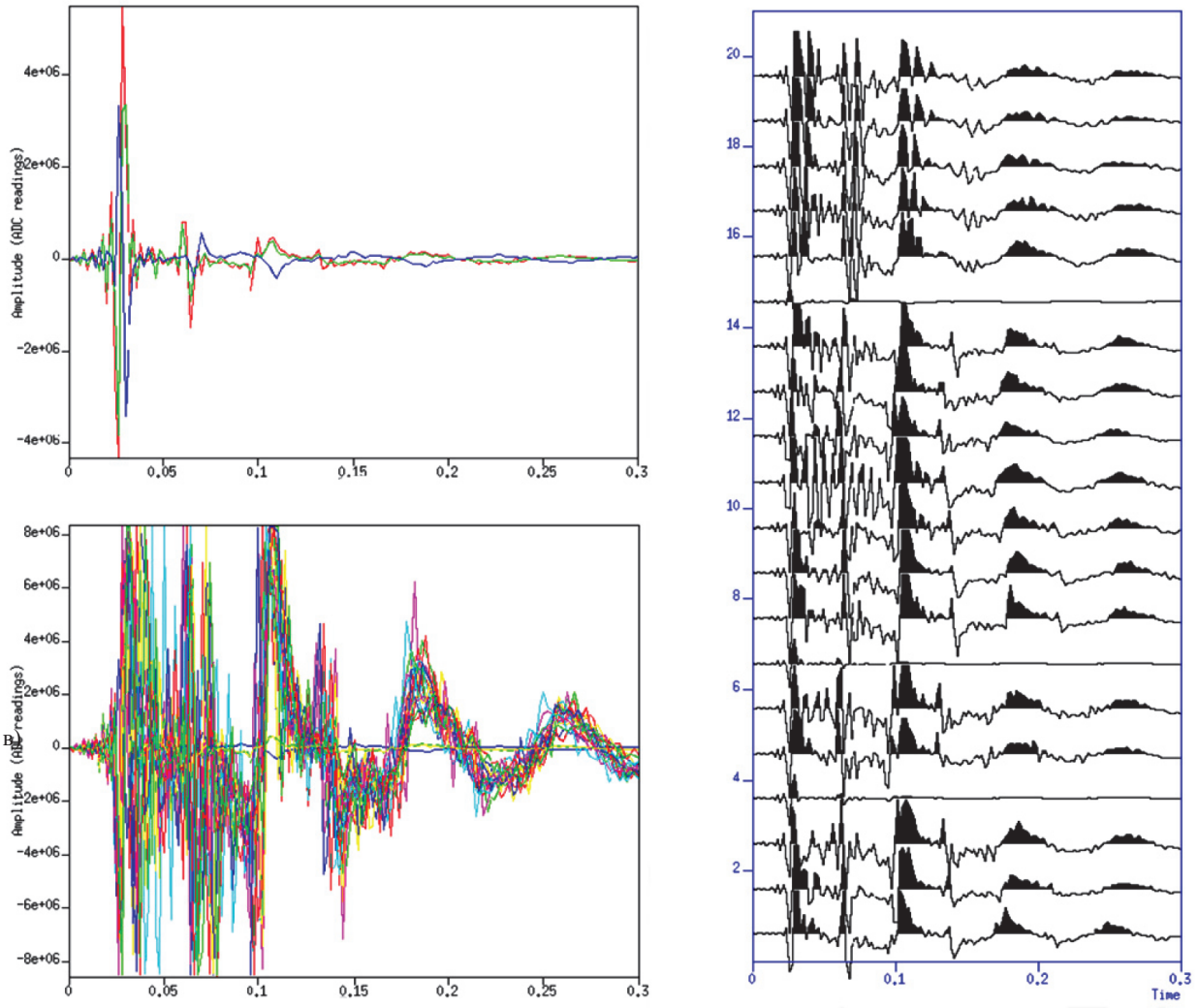


Рис. 8. Примеры записи данных азимута (*а*) и углов крена (*б*)

а) б)



в)

Рис. 9. Сейсмограммы ближних удалений канала гидрофона для профиля 1
Условные обозначения:
а — сейсмограммы для станций на позициях № 4, 7, 15
с уменьшенным коэффициентом усиления;
б — трассы распределены по позициям станции на ТПП;
в — сейсмограммы всех станций на ТПП

Оценка качества полученых сейсмических данных. На рис. 10 представлена суперсборка данных каналов гидрофона (см. рис. 10, *а*) и вертикального геофона (см. рис. 10, *б*), отсортированных по удалению источник-приемник. Видна хорошая однородность данных и даже без суммирования по методу общей глубинной точки [12], [13] видны мощные отражения во времени 2,2, 2,6 и 3,2 с. Для горизонтальных компонент *X*, *Y* суперсборки не рассчитывались, так как азимут СДС на дне был различный, и суперсборка не имеет смысла без поворота оси *X* вдоль профиля [14].

Для общего контроля качества на профилях 1 и 2 были сделаны суммарные разрезы по методу общей глубинной точки (ОГТ) [3]. Вычисление положения точек ОГТ производилось с шагом 15 м. На рис. 11, *б* показано продольное положение точек ОГТ в локальной системе координат для профиля 1. Координата *X* ОГТ для наглядности смещена с 0 до 5 м. Точки ОГТ показаны черным цветом, положение СДС на профиле показано красными треугольниками, а координаты срабатывания сеисмического источника показаны зелеными точками.

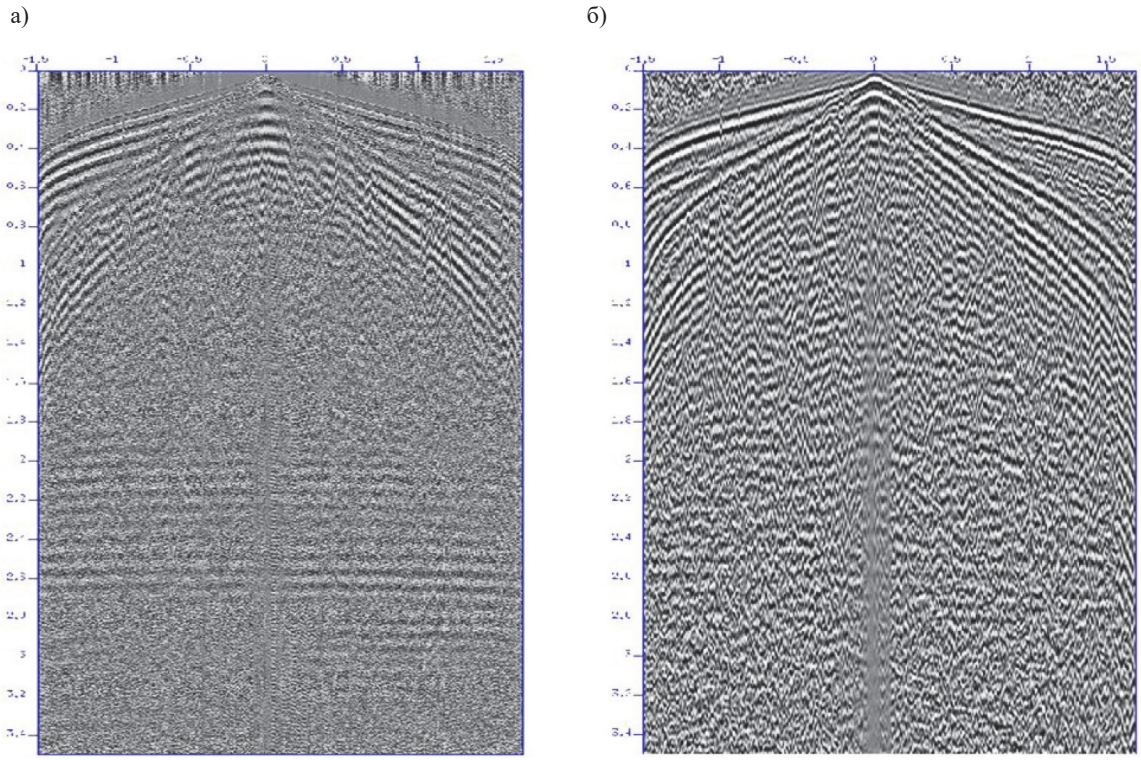


Рис. 10. Суперсборки каналов *H* (*а*) и *Z* (*б*) для первого профиля

На рис. 11, *а* представлена полученная кратность изображения для точек ОГТ вдоль профиля. Кратность по краям изображения поднимается от 0 до 60 и затем в середине изображения сохраняется на этом значении..

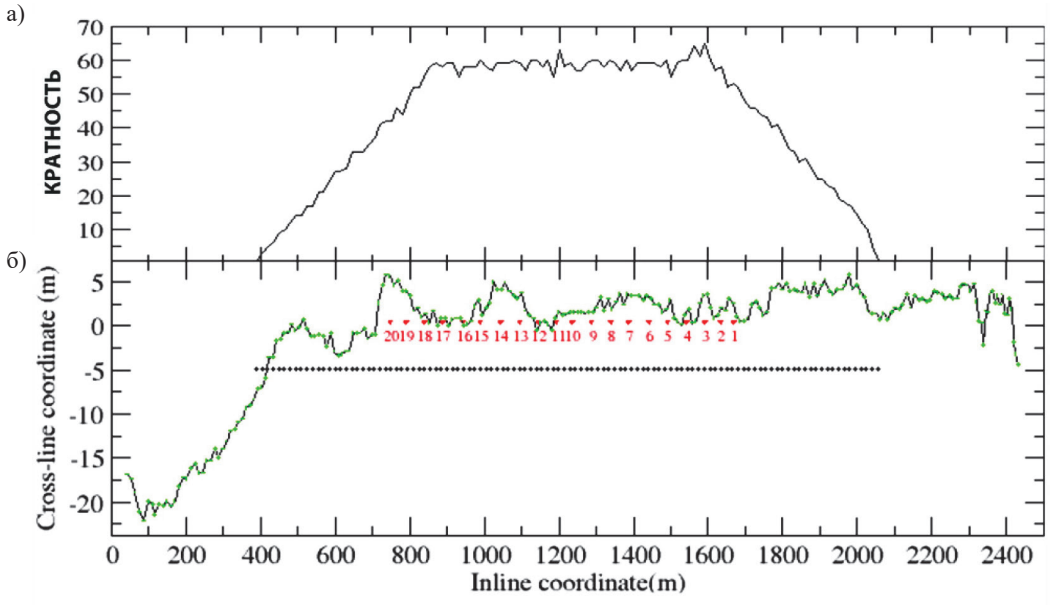
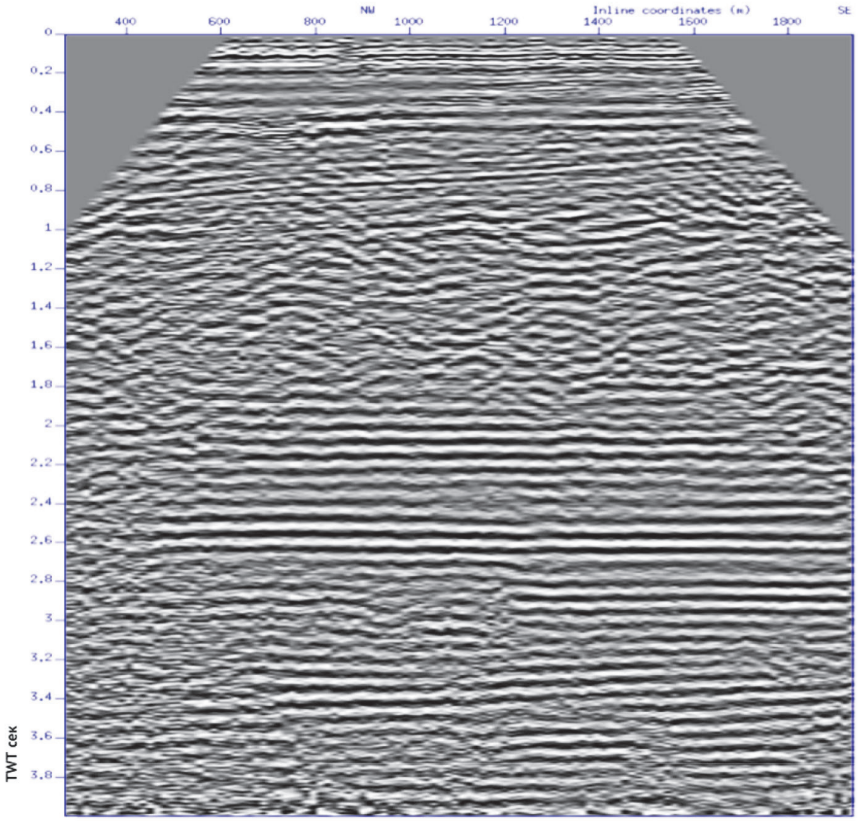


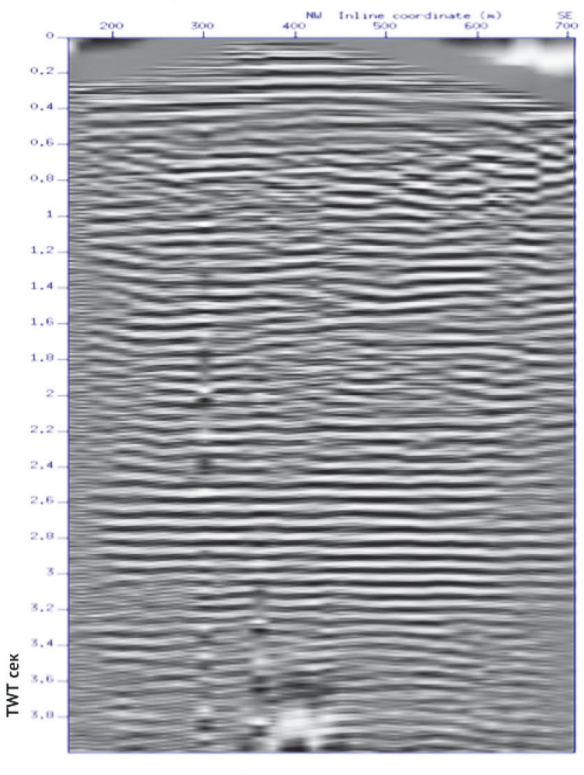
Рис. 11. Изменение кратности вдоль профиля (*а*) и положение точек ОГТ в локальной системе координат (*б*)

На рис. 12 представлены финальные временные разрезы ОГТ для канала гидрофона, рассчитанные для обоих профилей. На рис. 12, *в* приведена кривая интервальных скоростей, полученных при подборе скоростей суммирования для изображения профиля 1.

а)



б)



в)

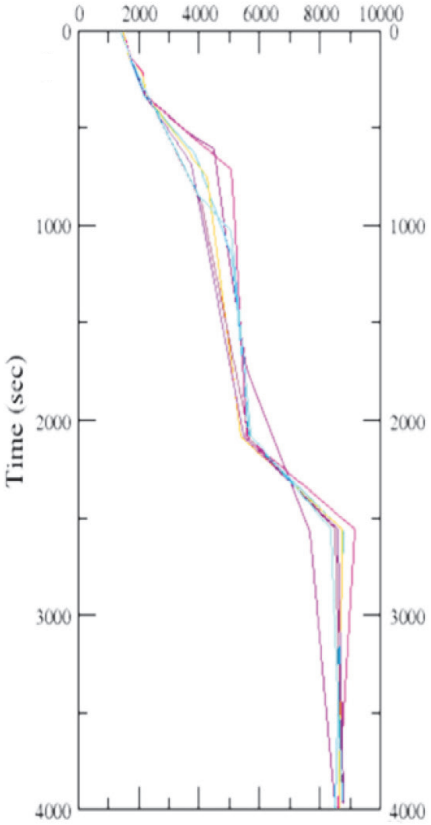


Рис. 12. Временные разрезы для канала гидрофона на профиле 1 (*а*) и профиле 2 (*б*) и интервальная скорость суммирования для профиля 1 (*в*)

Обсуждение (Discussion)

Работа по созданию промышленного образца системы донных станций гирляндной постановки на дно для сейсмических работ в транзитной зоне была выполнена с выявлением следующих технологических недостатков:

1. Низкое качество монтажа станций и калибровки гидрофонов. Необходимо предусмотреть программное изменение усиления предварительного усилителя гидрофона.

2. Часы правильно синхронизируются, показывая верное время, но 5 % из них показали превышение пределов допуска, записанного в ТЗ комплекса «КРАБ».

3. Имеется постоянная дополнительная задержка записи сейсмических данных в память регистратора около 50 мс во всех станциях комплекса «КРАБ», которую надо учитывать при обработке данных.

4. Коэффициент усиления гидрофонов выбран неправильно. Необходимо уменьшить аналоговый коэффициент усиления гидрофона в 20 раз. Этот вывод подтверждается по результатам работы всех испытаний с сейсмическим источником.

5. При надлежащем использовании ручной технологии постановки СДС удается поставить станции на дно с допустимым уклонением станции от горизонтали на ровном дне. При постановке станций с 50-метровым интервалом и с 25-метровым интервалом удается получить 100 % качественных данных на всех компонентах геофона на всех поставленных станциях. Измерители наклонов (угол измерения крена и дифферента) показывают хорошую корреляцию с проверкой качества данных на вертикальных и горизонтальных геофонах.

6. Ограниченная память для хранения данных компаса и наклономеров не позволяет надежно регистрировать их показания. Огромное количество неверных показаний необходимо как-то фильтровать или на уровне сбора данных, или на этапе обработки с помощью дополнительного материального обеспечения. Необходимо увеличить память для сбора данных азимута, крена и дифферента станций.

7. Получен временной разрез на профилях из двадцати и девятнадцати станций с маленьким сейсмическим источником — пушкой объемом 1,2 л. Помимо поверхностных границ получены и более глубинные изображения среды, до 3,3 с двойного времени пробега, проведена оценка скоростного разреза.

8. Разъем СДС для зарядки станций и обмена данными требует существенной доработки.

9. Спускоподъемное устройство должно быть сконструировано на гидравлическом приводе.

10. Программное обеспечение комплекса требует отладки и доработки.

Выводы (Conclusion)

1. Впервые в России за последние 30 лет разработано и изготовлено сейсмическое оборудование для транзитных зон. Технические характеристики оборудования находятся на уровне мировых образцов. Разработана методика тестирования комплекса, позволившая выявить недостатки аппаратуры. Второй этап натурных испытаний показал, что комплекс работопригоден и способен обеспечить получение качественного сейсмического материала, однако необходимы серьезные доработки для вывода комплекса «КРАБ» на промышленные работы.

2. Система «КРАБ» является копией буксируемых систем постановки автономных донных сейсмометров, ей присущи все недостатки этой системы, которые заключаются в применении ручного труда при постановке и подъеме СДС на борт. При этом гирляндный метод постановки СДС плохо или вообще неприменим в районах с препятствиями на дне.

3. Лучшим решением является не копирование западных систем, а разработка своих собственных, основанных на новых инновационных принципах.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема 0149-2019-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ильинский Д. А.* Сейсморазведка в транзитной зоне. Натурные испытания системы «КРАБ» (этап 1) / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 289–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-289-301.

2. *Левин И. С.* Основные параметры системы наблюдений при проведении сейсморазведочных работ методом отраженных волн / И.С. Левин // Труды Кольского научного центра РАН. — 2019. — Т. 10. — № 6-1. — С. 162–167. DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.022.

3. *Dondurur D.* Acquisition and Processing of Marine Seismic Data / D. Dondurur. — Elsevier Inc., 2018. — 606 p.

4. *Monk D. J.* Survey Design and Seismic Acquisition for Land, Marine, and In-between in Light of New Technology and Techniques / D. J. Monk. — Society of Exploration Geophysicists, 2020. — 214 p. DOI: 10.1190/1.9781560803713.

5. *Beaudoin G.* Field design and operation of a novel deepwater, wide-azimuth node seismic survey / G. Beaudoin, A. A. Ross // The Leading Edge. — 2007. — Vol. 26. — Is. 4. — Pp. 494–503. DOI: 10.1190/1.2723213.

6. Пат. 8172480 B2 США, МПК B63B21/66. Node storage, deployment and retrieval system / J. N. Thompson, J. L. Laws, L. E. Berges; заяв. и патентообл. Fairfield Industries Incorporated, Sugar Land, TX (US). — № US 2011 FO176875A1; заявл. 30.06.2008; опубл. 21.07.2011.

7. *Wielandt E.* Measuring seismometer nonlinearity on a shake table / E. Wielandt, M. Zumberge // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2013. — Vol. 103. — Is. 4. — Pp. 2247–2256. DOI: 10.1785/0120120325.

8. *Ringler A. T.* Laboratory tests of three Z-land fairfield nodal 5-Hz, three-component sensors / A. T. Ringler, R. E. Anthony, M. S. Karplus, A. A. Holland, D. C. Wilson // Seismological Research Letters. — 2018. — Vol. 89. — Is. 5. — Pp. 1601–1608. DOI: 10.1785/0220170236.

9. *Матвеев И. А.* Особенности проведения многокомпонентных сейсмических исследований в транзитной зоне в условиях предельного мелководья арктических морей / И. А. Матвеев, А. В. Зимовский, Д. Г. Куома, О. В. Клепиков // Вестник Пермского университета. Геология. — 2017. — Т. 16. — № 4. — С. 382–392. DOI: 10.17072/psu.geol.16.4.382.

10. *Крутов А. Л.* ООО «СИ Технолоджи» – новации, достижения, внедрение / А. Л. Крутов, И. В. Леонтьев // Нефть. Газ. Новации. — 2019. — № 9 (226). — С. 75–79.

11. *Непрочнов Ю. П.* Методика обработки и интерпретации записей донных сейсмографов при глубинном сейсмическом зондировании в океане / Ю. П. Непрочнов, О. Ю. Ганжа, И. А. Ильин // Океанология. — 2005. — Т. 45. — № 3. — С. 458–467.

12. *Медведев С. Н.* Технология обработки отраженных волн на записях донных сейсмостанций / С. Н. Медведев // Технологии сейсморазведки. — 2016. — № 2. — С. 92–99. DOI: 10.18303/1813-4254-2016-2-92-99.

13. *Жижикин А. А.* Сравнительный анализ идеологии цифровой обработки разнообъектных малоглубинных сейсморазведочных исследований на месторождениях твердых полезных ископаемых / А. А. Жижикин // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 16.; ГИ УрО РАН. — Пермь, 2018. — С. 200–203. DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.54.

14. *Zhu Y.* A least squares method based on quaternions to derive absolute orientation of geophones with AHRS / Y. Zhu, J. Lin, F. Zhao, Z. Chen, F. Sun, H. Lv // Journal of Geophysics and Engineering. — 2018. — Vol. 15. — Is. 6. — Pp. 2614–2624. DOI: 10.1088/1742-2140/aadd2f.

REFERENCES

1. Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. “Seismic survey in the transit zone. Full-scale tests of the KRAB system. Stage 1.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 289–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-289-301.

2. Levin, Ilya Sergeevich. “The main parameters of the observation system during seismic decreasing work by the method of reflected waves.” *Trudy Kol’skogo nauchnogo tsentra RAN* 10.6-1 (2019): 162–167. DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.022.

3. Dondurur, Derman. *Acquisition and Processing of Marine Seismic Data*. Elsevier Inc., 2018.

4. Monk, David J. *Survey Design and Seismic Acquisition for Land, Marine, and In-between in Light of New Technology and Techniques*. Society of Exploration Geophysicists, 2020. DOI: 10.1190/1.9781560803713.

5. Beaudoin, Gerard, and Allan A. Ross. “Field design and operation of a novel deepwater, wide-azimuth node seismic survey.” *The Leading Edge* 26.4 (2007): 494–503. DOI: 10.1190/1.2723213.

6. Thompson J. N., Laws J. L., Berges L. E. US 8172480 (B2), IPC B 63 B35/04. Node storage, deployment and retrieval system. USA, assignee. Publ. 21 Jul. 2011.

7. Wielandt, Erhard, and Mark Zumberge. "Measuring seismometer nonlinearity on a shake table." *Bulletin of the Seismological Society of America* 103.4 (2013): 2247–2256. DOI: 10.1785/0120120325.

8. Ringler, Adam T., R. E. Anthony, M. S. Karplus, A. A. Holland, and D. C. Wilson. "Laboratory tests of three Z-land fairfield nodal 5-Hz, three-component sensors." *Seismological Research Letters* 89.5 (2018): 1601–1608. DOI: 10.1785/0220170236.

9. Matveev, I. A., A. V. Zimovskiy, D. G. Kuoma, and O.V. Klepikov. "Characteristics of Conducting the Multi-Component Seismic Prospecting in the Transition Zone in Conditions of Very Shallow Water of Arctic Seas." *Bulletin of Perm University. Geology* 16.4 (2017): 382–392. DOI: 10.17072/psu.geol.16.4.382.

10. Krutov, A. L., and I. V. Leontiev. "OOO SI Technology: Innovations, Achievements and Application." *Oil. Gaz. Novation* 9(226) (2019): 75–79.

11. Neprochnov, Yu. P., O. Yu. Ganja, and I. A. Ilin. "Methods for processing and interpretation of bottom seismograph records of deep seismic sounding in the ocean." *Oceanology* 45.3 (2005): 431–440.

12. Medvedev, S. N. "Reflections data processing technique for obs records." *Seismic Technologies* 2 (2016): 92–99. DOI: 10.18303/1813-4254-2016-2-92-99.

13. Zhizhikin, A. A. "Sravnitel'nyi analiz ideologii tsifrovoi obrabotki raznoob"ektnykh maloglubinnykh seismorazvedochnykh issledovanii na mestorozhdeniyakh tverdykh poleznykh iskopaemykh." *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov: sb. nauch. tr.* Vol. 16. Perm', 2018. 200–203. DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.54.

14. Zhu, Yadongyang, Jun Lin, Fa Zhao, Zubin Chen, Feng Sun, and Hao Lv. "A least squares method based on quaternions to derive absolute orientation of geophones with AHRS." *Journal of Geophysics and Engineering* 15.6 (2018): 2614–2624. DOI: 10.1088/1742-2140/aadd2f.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильинский Дмитрий Анатольевич —
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт океанологии им. П. П. Ширшова
Российской академии наук
117997, Российская Федерация, г. Москва,
Нахимовский проспект, 36
e-mail: *dilinskiy61@mail.ru*

Рогинский Константин Александрович —
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт океанологии им. П. П. Ширшова
Российской академии наук
117997, Российская Федерация, г. Москва,
Нахимовский проспект, 36
e-mail: *roginskiy@list.ru*

Ганжа Олег Юрьевич —
главный специалист
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт океанологии им. П. П. Ширшова
Российской академии наук
117997, Российская Федерация, г. Москва,
Нахимовский проспект, 36
e-mail: *ganzhaoy@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilinskiy, Dmitry A. —
PhD,
Senior Research Scientist
P. P. Shirshov Institute
of Oceanology of Russian
Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospekt,
Moscow, 117997,
Russian Federation
e-mail: *dilinskiy61@mail.ru*

Roginskiy, Konstantin A. —
PhD,
Senior Research Scientist
P. P. Shirshov Institute
of Oceanology of Russian
Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospekt,
Moscow, 117997,
Russian Federation
e-mail: *roginskiy@list.ru*

Ganzha, Oleg Y. —
Chief Specialist
P. P. Shirshov Institute
of Oceanology of Russian
Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospekt,
Moscow, 117997,
Russian Federation
e-mail: *ganzhaoy@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 24 мая 2020 г.
Received: May 24, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-567-575

A MODEL OF RATIONAL PLACEMENT OF RECEIVING ANTENNAS OF POSITIONAL SONAR SYSTEMS IN THE INTERESTS OF DISPATCHING GEOSPATIAL PROCESSES

S. N. Potapychev[1,2] , V. V. Malyj[1,3], Y. A. Ivakin[1,2]

[1] — Concern OCEANPRIBOR JSC, St. Petersburg, Russian Federation
[2] — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, Russian Federation
[3] — Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, Russian Federation

The main features of an efficiency evaluation of positional (stationary and autonomous) sonar systems at the design stage and deciding on the coordinates of the antenna installation site based on modeling and visualization of the expected surveillance zones using intelligent geographic information systems are considered in the paper. The issues of intellectual decision support for the rational spatial distribution of receiving antennas are considered. The influence of the information support quality of geographic information systems on the calculations accuracy of expected surveillance zones of the sonar systems under the various hydrological and acoustic conditions is assessed. A new performance indicator in the form of spatial volume of the expected surveillance zone is proposed. A method for solving the optimization problem of finding the maximum volume of the illuminated space as a coordinates function of the antenna placement within a given observation area, with fixed technical characteristics of the monitoring system and given noise conditions, acoustic characteristics of the detection object and the observation time has been developed. The proposed approach to selecting the rational variant of the receiving antennas location of positional hydroacoustic facilities and systems in the interests of dispatching geospatial processes using as a mean of intelligent support the modern hardware and software complex realizing the specified selection by such efficiency indicator as volume of illuminated space, in the conditions of a two-dimensionally inhomogeneous model of medium, close to real hydrological-acoustic conditions, allows to increase the accuracy of assessing the illumination efficiency of underwater environment of positional hydroacoustic means and systems and significantly reduce the design and development time as compared with the traditional approach, requiring expensive field observation over a long period of time.

Keywords: sonar system, surveillance zone, hydrological-acoustic conditions, inhomogeneous marine medium, intelligent geoinformation system, digital cartographic data, spatial data, volume of the observation zone.

For citation:
Potapychev, Sergei N., Vladimir V. Malyj, and Yan A. Ivakin. "A model of rational placement of receiving antennas of positional sonar systems in the interests of dispatching geospatial processes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.3 (2020): 567–575. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-567-575.

УДК 681.1.003

МОДЕЛЬ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН ПОЗИЦИОННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В ИНТЕРЕСАХ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

С. Н. Потапычев[1,2], В. В. Малый[1,3], Я. А. Ивакин[1,2]

[1] — АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, Российская Федерация
[3] — ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Изложены основные особенности оценки эффективности позиционных (стационарных и автономных) гидроакустических систем на этапе проектирования и принятия решения по координатам места

установки приемных антенн на основе моделирования и визуализации ожидаемых зон наблюдения с использованием интеллектуальных геоинформационных систем. Рассмотрены вопросы интеллектуальной поддержки принятия решений по рациональному пространственному размещению приемных антенн данных средств с использованием специализированных программно-информационных средств и геоинформационных систем. Выполнена оценка влияния качества информационного обеспечения геоинформационных систем на точность расчетов ожидаемых зон наблюдения гидроакустических систем в различных гидролого-акустических условиях. Предложен новый показатель эффективности в виде пространственного объема ожидаемой зоны наблюдения. Разработан метод решения оптимизационной задачи поиска максимума объема освещаемого пространства как функции координат размещения антенны в пределах заданного района наблюдения при фиксированных технических характеристиках системы наблюдения и заданных помеховых условиях, акустических характеристиках объекта обнаружения и времени наблюдения. Предложенный подход к выбору рационального варианта размещения приемных антенн позиционных гидроакустических средств и систем в интересах диспетчеризации геопространственных процессов с использованием в качестве средства интеллектуальной поддержки современного аппаратно-программного комплекса, реализующего указанный выбор по такому показателю эффективности, как объем освещаемого пространства, в условиях двумерно-неоднородной модели среды, близких к реальным гидролого-акустическим условиям, позволяет повысить точность оценки эффективности освещения подводной обстановки позиционных гидроакустических средств и систем и существенно сократить сроки проектирования и разработки по сравнению с традиционным подходом к решению данной задачи, требующим дорогостоящих натурных исследований в течение длительного периода времени.

Ключевые слова: гидроакустическая система, зона наблюдения, гидролого-акустические условия, неоднородная морская среда, интеллектуальная геоинформационная система, цифровые картографические данные, пространственные данные, объем зоны наблюдения.

Для цитирования:
Потапычев С. Н. Модель рационального размещения приемных антенн позиционных гидроакустических средств в интересах диспетчеризации геопространственных процессов / С. Н. Потапычев, В. В. Малый, Я. А. Ивакин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 567–575. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-567-575.

Введение (Introduction)

Гидроакустические средства и системы (ГАС) широко применяются при решении задач информационного обеспечения поисково-спасательных операций, ведения рыбного промысла, а также охраны объектов морской экономической деятельности, которые в дальнейшем понимаются как *геопространственные процессы* согласно данным источников [1], [2]. При этом большую роль в решении этих задач играют позиционные ГАС (ПГАС), антенные системы которых в течение длительного времени (автономные ГАС) или до конца срока эксплуатации (стационарные ГАС) располагаются в фиксированном месте с заданными координатами (λ_0, φ_0) и на определенной глубине h_0.

В настоящее время помимо моностатических ПГАС с одиночной антенной (работающих в активном или в пассивном режимах), широкое применение находят также активные системы с разнесенным излучением и приемом (так называемые бистатические и мультистатические гидролокационные системы — (БГЛС) и (МлГЛС) соответственно). Проектирование таких систем и принятие решения по рациональному выбору места установки антенн стационарных или автономных ГАС в заданном районе наблюдения представляет собой достаточно сложную задачу с точки зрения оценки достигаемой эффективности освещения подводной обстановки. Причем в бистатических и мультистатических системах это касается размещения как приемных, так и излучающих антенн.

Эффективность освещения подводной обстановки ГАС зависит от многих факторов. При этом одними из основных являются конкретные гидролого-акустические условия (ГАУ) в месте установки антенн в данный момент времени, определяемые вертикальным распределением скорости звука (ВРСЗ), глубиной моря, рельефом дна и т. д. Именно поэтому возникает интеллектуальная задача выбора рационального пространственного размещения приемных антенн ПГАС, которая решается с использованием специализированных программно-информационных средств и гео-

информационных систем (ГИС). Качество их реализации оказывает непосредственное влияние на точность результатов расчета ожидаемых зон наблюдения (ЗН) в различных ГАУ, а в конечном итоге, и на эффективность применения ПГАС. Раскрытие особенностей указанного влияния позволяет конкретизировать его суть и предложить комплексный показатель для оценки эффективности наблюдения гидроакустических систем в различных ГАУ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Задача оптимального выбора пространственных координат (λ_0, φ_0) и глубины размещения приемных антенн ПГАС (h_0) представляется исключительно сложной, так как ГАУ в различных районах Мирового океана обладают значительной изменчивостью одновременно в пространстве и во времени (месяц, сезон). Оценка эффективности проектируемых ГАС обычно производится с помощью специальных программных средств (систем гидроакустических расчетов (СГАР) или имитационных моделирующих аппаратно-программных комплексов (АПК)).

В традиционных СГАР обычно используется наиболее простая и распространенная на данный момент модель плоскослоистой неоднородной среды с ровным дном. В этом случае оценка эффективности производится либо путем расчета так называемой *ожидаемой дальности действия ГАС*, одинаковой для всех направлений наблюдения при фиксированной глубине объекта обнаружения, либо путем расчета, построения и визуализации так называемой *зоны наблюдения* (обнаружения) в вертикальной плоскости в координатах «дальность – глубина», также одинаковой во всех направлениях наблюдения. Таким образом, традиционный подход к решению данной задачи требует либо приближенных оценок для средних по району и сезону ГАУ, реализуемых, как правило, с помощью СГАР с упрощенными моделями плоскослоистой среды с ровным дном, либо дорогостоящих натурных исследований в течение длительного периода времени (минимум года). Для совершенствования данного процесса (создания и разработки ПГАС), с целью сокращения затрачиваемого времени и уменьшения затрат перспективным, необходимо использование интеллектуализированных ГИС с базами данных по характеристикам дна и среднестатистическим ВРСЗ для различного времени наблюдения (месяц, сезон) или данных оперативной океанологии.

В наиболее совершенных современных АПК используется более сложная модель двумерно-неоднородной среды с переменным рельефом дна и изменяющимся ВРСЗ по трассе распространения. Это позволяет рассчитывать и визуализировать близкие к реальным трехмерные ЗН ГАС и любые их проекции или разрезы в произвольном направлении и на любом горизонте. В общем случае зона наблюдения (обнаружения) морского подводного объекта для ГАС, работающего в соответствующем режиме, строится относительно координат (места размещения) приемной антенны ГАС (λ_0, φ_0, h_0) и определяет пространственную область в координатах «пеленг – дистанция – глубина» (α, r, h), при входе в которую подводный объект определенного класса может быть обнаружен с заданной вероятностью правильного обнаружения, в пределах которой выполняется условие

$$P_{\text{ПО}}(\alpha, r, h) \geq P^*_{\text{ПО}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ПО}}(\alpha, r, h)$ — вероятность правильного обнаружения (ВПО) объекта в зависимости от дистанции, глубины и направления наблюдения;

r — горизонтальное расстояние до объекта наблюдения;

h — глубина (погружения) объекта наблюдения;

α — пеленг на объект наблюдения;

$P_{\text{ПО}}{}^*$ — заданное (нормативное) значение ВПО объекта наблюдения.

Современные средства визуализации ожидаемых зон наблюдения ГАС позволяют отображать в виде цветовой гаммы произвольные значения ВПО в зависимости от пространственных координат. Однако, как правило, принято рассматривать границы ЗН с фиксированным значением вероятности правильного обнаружения $P_{\text{ПО}} = 0{,}9$. В целом общий вид ожидаемой ЗН ГАС определяется рабочей характеристикой приемника-обнаружителя и соответствующей сложной пространственной зависимостью входного отношения сигнал / помеха. В условиях зональной структуры поля ЗН ГАС

может представлять собой сложную совокупность несвязанных областей акустической освещенности и зон тени.

На рис. 1 приведен пример результатов расчета и построения ожидаемой ЗН для низкочастотной мультистатической гидролокационной системы (МлГЛС) с тремя приемниками, удаленными от излучателя на b = 60 км, в условиях Баренцева моря (глубина моря в районе до 275 м) в зимний период (январь), при размещении антенн на глубине h = 60 м с использованием модели двумерно-неоднородной морской среды (180 направлений расчета относительно излучателя и относительно каждого из приемников), а именно:

– рельеф дна и переменные по трассе ВРСЗ для направления 0° от излучателя (рис. 1, *а*);

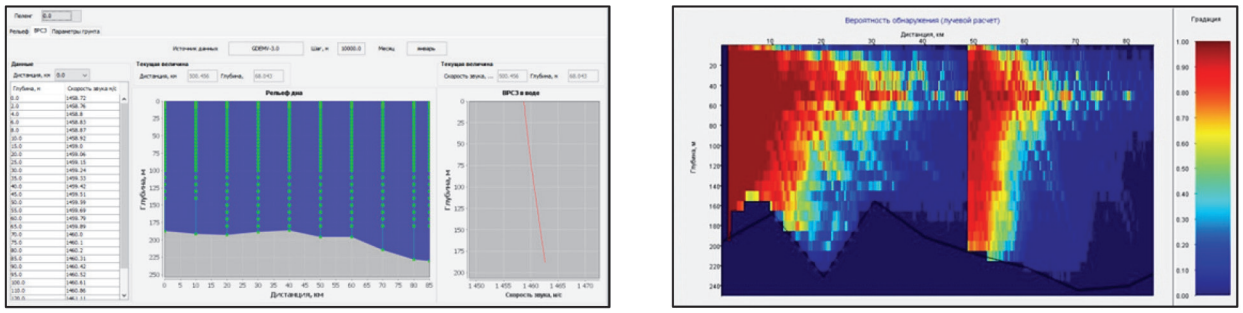
– вертикальный разрез ЗН по направлению 39° от излучателя для произвольных значений ВПО $0 \le P_{\text{ПО}}(r,\ h) \le 1$ (рис. 1, *б*);

– вид ожидаемой ЗН на горизонте h = 80 м (с нанесением на карту) для фиксированного значения порога ВПО $0{,}9 \le P_{\text{ПО}}(r, \alpha) \le 1$ (рис. 1, *в*);

– вид ожидаемой ЗН в полярных координатах на горизонте h = 80 м для произвольных значений ВПО $0 \le P_{\text{ПО}}(r,\ \alpha) \le 1$ (рис. 1, *г*).

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что для точной оценки эффективности ПГАС, особенно низкочастотных БГЛС и МлГЛС дальнего действия (с разнесением излучателя и приемников на значительные расстояния), необходима строгая привязка рассчитываемых ожидаемых ЗН к карте района с учетом точных координат установки излучателя и приемных антенн, реального рельефа дна и переменных в пространстве ВРСЗ с заданной сеткой по географическим координатам.

а) б)



в) г)

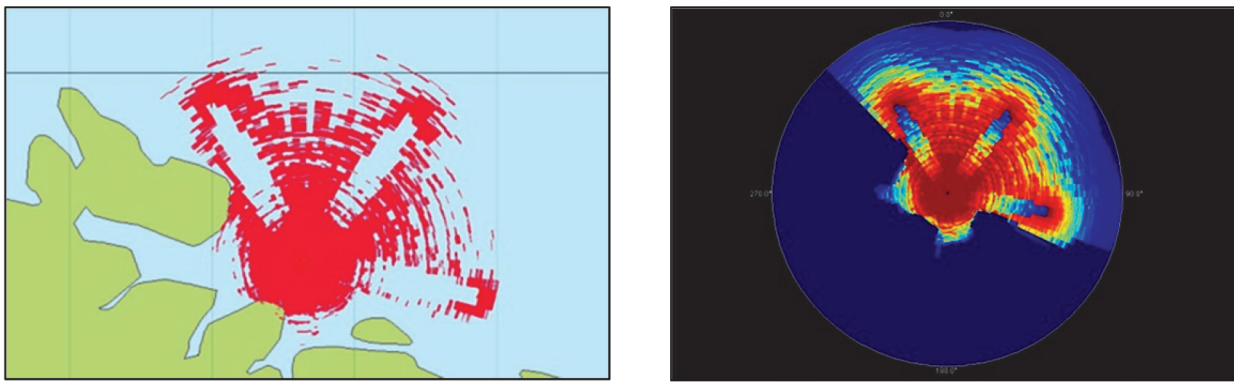


Рис. 1. Результаты расчета ожидаемой ЗН МлГЛС
с использованием данных моделирования в ГИС:
а — рельеф дна и переменные по трассе ВРСЗ для направления 0° от излучателя;
б — вертикальный разрез ЗН по направлению 39° от излучателя
для произвольных значений ВПО $0 \le P_{\text{ПО}}(r, h) \le 1$;
в — вид ожидаемой ЗН на горизонте h = 80 м (с нанесением на карту)
для фиксированного значения порога ВПО $0{,}9 \le P_{\text{ПО}}(r, \alpha) \le 1$;
г — вид ожидаемой ЗН в полярных координатах на горизонте h = 80 м
для произвольных значений ВПО $0 \le P_{\text{ПО}}(r, \alpha) \le 1$

В настоящее время созданы имитационные моделирующие аппаратно-программные комплексы [3]–[11], предназначенные для оценки эффективности любых интегрированных систем подводного наблюдения (ИСПН). В частности, программно-аппаратный комплекс имитационного моделирования и оценки эффективности системы подводного наблюдения (СПН) предназначен для моделирования динамики функционирования СПН различного назначения и конфигурации в различных тактических ситуациях, гидролого-акустических условиях и помехо-сигнальной обстановке с применением морских ГИС, в том числе распределенных позиционных (стационарных и автономных) активно-пассивных гидроакустических СПН, работающих в различных режимах, включая бистатический и мультистатический режимы гидролокации.

Одной из предполагаемых целей моделирования является интеллектуальная поддержка процесса синтеза проектируемой ИСПН путем последовательной оценки эффективности различных вариантов ее построения. В первую очередь это касается позиционной (прежде всего стационарной) составляющей системы наблюдения, для обоснования наиболее целесообразного и рационального состава, координат расстановки антенных устройств и основных технических решений, а также анализа возможного (необходимого) наращивания элементов мобильной составляющей системы в целях достижения требуемых показателей эффективности освещения подводной обстановки. При этом предлагается использовать в качестве основного показателя эффективности освещения подводной обстановки ПГАС не традиционные ожидаемые дальности действия, не площадь ожидаемой ЗН на заданном горизонте, не площадь вертикального разреза ЗН в координатах «дальность-глубина» в одном из направлений наблюдения, а объем освещаемого пространства, соответствующий заданному порогу ВПО.

Результаты (Results)

Обобщенный алгоритм расчета объема пространственной зоны обнаружения для заданного значения порога ВПО и заданных границ глубин погружения подводного объекта реализован в программно-аппаратном комплексе имитационного моделирования и оценки эффективности системы подводного наблюдения в виде отдельной задачи (подпроекта). При этом интеллектуальная поддержка принятия решений на базе ИГИС (в процессе создания и проектирования СГАС) заключается в информационном обеспечении метода решения оптимизационной задачи поиска максимума объема освещаемого пространства как функции координат размещения антенны $V_{\text{ЗН}}(\lambda_0, \varphi_0, h_0)$ в пределах заданного района наблюдения при фиксированных технических характеристиках ГАС, помеховых условиях, заданных акустических характеристиках объекта обнаружения и времени наблюдения. Постановку задачи выбора оптимального варианта размещения приемных антенн позиционных ГАС в интересах диспетчеризации геопространственных процессов можно представить как постановку соответствующей оптимизационной задачи (2)–(4).

При этом оптимизационная задача может решаться как в общем случае:

$$V_{\text{ЗН}}(\lambda_0, \varphi_0, h_0) \to \max_{\lambda_0,\varphi_0,h_0} \{V_{\text{ЗН}}(\lambda_0,\varphi_0,h_0)\}, \tag{2}$$

так и в случае уже выбранных координат места установки антенн путем изменения только их глубины h_0:

$$V_{\text{ЗН}}(\lambda_0, \varphi_0, h_0) \to \max_{h_0} \{V_{\text{ЗН}}(h_0)\}\Big|_{\lambda_0,\varphi_0=\text{ const}}. \tag{3}$$

Данный подход может быть использован прежде всего для автономных ГАС, период работы которых ограничен промежутком времени порядка 1–3 месяца (сезон), когда ГАУ (ВРСЗ) можно приближенно считать неизменными. В случае стационарных ГАС, срок эксплуатации которых рассчитан на длительный период, измеряемый годами, а, порой, и десятилетиями, необходим учет сезонного изменения ГАУ (прежде всего ВРСЗ) путем осреднения объема ожидаемой зоны наблюдения для четырех сезонов ($N = 4$) или 12 месяцев ($N = 12$).

$$V_{\text{ЗН}}(\lambda_0, \varphi_0, h_0) \to \max_{h_0} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{N} V_{\text{ЗН}_i}(h_0)}{N} \right\}\Bigg|_{\lambda_0, \varphi_0 = \text{const}} . \quad (4)$$

Решение такой задачи оптимизации обеспечивает наилучший вариант размещения приемных антенн позиционных гидроакустических средств в интересах диспетчеризации пространственных процессов. Таким образом, для обоснования оптимальной конфигурации размещения антенн системы подводного наблюдения при использовании системы гидроакустических расчетов, интегрированной в ИГИС и встроенной в АПК имитационного моделирования, при расчете показателей эффективности вида V_0 (объем освещаемого пространства) и S_0 (площадь сечения освещаемого пространства), возможно решение отдельной задачи обоснования (поиска и выбора) наиболее рационального варианта построения системы, обеспечивающего максимизацию искомого объема V_0 или площади S_0.

Пример расчета суммарного объема освещаемого пространства и сечения освещаемого пространства приведен на рис. 2. Для определения показателей эффективности стационарной СПН более высокого уровня, связанных с анализом накопленных вероятностей обнаружения и слежения, потребуется включение стохастической составляющей для маневрирования объектов наблюдения и проведения соответствующего имитационного моделирования.

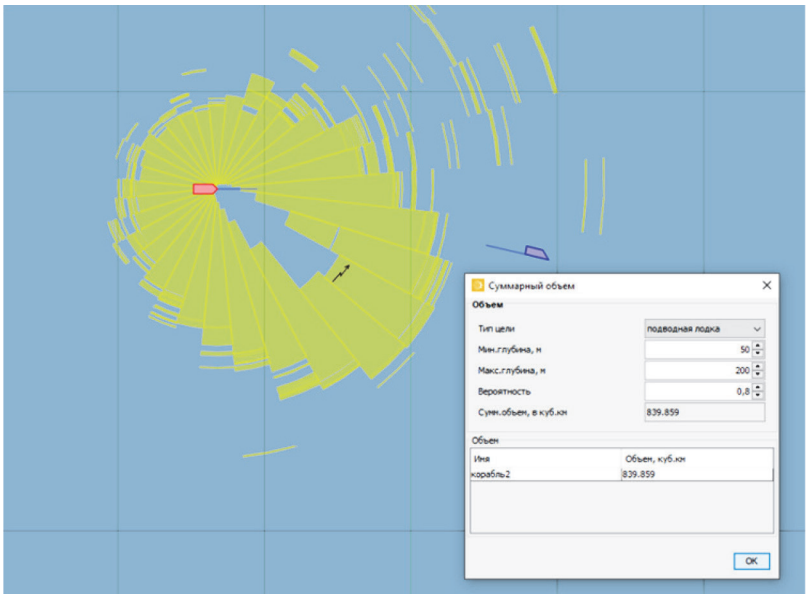


Рис. 2. Пример расчета суммарного объема V_0
или площади сечения S_0 освещаемого подводного пространства

Таким образом, основной особенностью перспективных систем проектирования позиционных гидроакустических средств и систем является возможность многоуровневой обработки геопространственных данных, характеризующих наблюдателя, объекты наблюдения и среду, а также диспетчеризируемые геопространственные процессы. При этом наиболее развитыми возможностями по многоуровневой обработке геопространственных данных обладают интеллектуализированные географические информационные системы.

Обсуждение (Discussion)

В результате проведенных исследований предложен новый показатель эффективности для позиционных ГАС при решении задачи обнаружения подвижных подводных объектов, а именно объем освещаемого пространства, соответствующий заданному порогу ВПО. Данный показа-

тель может быть использован для решения оптимизационной задачи поиска максимума объема освещаемого пространства как функции координат размещения антенны $V_{ЗН}(\lambda_0, \varphi_0, h_0)$ в пределах заданного района наблюдения при фиксированных технических характеристиках ГАС, помеховых условиях, заданных акустических характеристиках объекта обнаружения и времени наблюдения. При этом интеллектуальная поддержка принятия решений (в процессе создания и проектирования ПГАС) реализуется на базе ИГИС и заключается в информационном обеспечении в виде цифровых карт района наблюдения, баз данных по рельефу дна и среднестатистическим ВРСЗ для различных временных периодов.

Алгоритм расчета объема освещаемого пространства и метод решения оптимизационной задачи поиска максимума его значения для различных координат приемных антенн внедрен в аппаратно-программный комплекс и проверен в процессе компьютерного имитационного моделирования функционирования ИСПН различной конфигурации для различных районов Мирового океана. Предлагаемый метод поддержки принятия решений по рациональному размещению антенн позиционных ГАС в интересах повышения эффективности освещения подводной обстановки представляется достаточно важным и актуальным для организаций, занимающихся вопросами моделирования, проектирования и разработки позиционных гидроакустических систем.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на внедрение данного метода в системах поддержки принятия решения для операторов мобильных (корабельных) ГАС, включая перспективные СГАР и системы автоматизированного управления при решении задачи оптимального выбора глубины размещения опускаемых и буксируемых антенн.

Выводы (Summary)

1. Предлагаемый подход к выбору рационального варианта размещения приемных антенн позиционных ГАС в интересах диспетчеризации геопространственных процессов с использованием в качестве средства интеллектуальной поддержки современного АПК, реализующего указанный выбор по такому показателю эффективности, как объем освещаемого пространства, в условиях двумерно-неоднородной модели среды, близких к реальным ГАУ, позволяет повысить точность оценки эффективности освещения подводной обстановки ПГАС и существенно сократить сроки проектирования и разработки по сравнению с традиционным подходом к решению данной задачи, требующим дорогостоящих натурных исследований в течение длительного периода времени.

2. Для совершенствования (сокращения, упрощения, удешевления) процесса размещения приемных антенн позиционных ГАС в интересах диспетчеризации геопространственных процессов в качестве средств автоматизированного обоснования проектных решений, перспективным представляется использование интеллектуальных ГИС с базами данных по дну и среднестатистическим ВРСЗ для различного времени наблюдения (месяц, сезон). Это позволит обеспечить качественный рост возможностей диспетчеризации геопространственных процессов в подводной среде.

3. Предложенный показатель эффективности ОПО в виде объема освещаемого пространства и метод оптимизации выбора глубины размещения приемных антенн ГАС в дальнейшем могут быть использованы в системах поддержки принятия решения для операторов мобильных (корабельных) ГАС при решении задачи оптимального выбора глубины размещения опускаемых и буксируемых антенн.

Благодарности (Acknowledgements)

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №18-07-00437).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ивакин Я. А.* Интеллектуальная поддержка принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов морского транспорта / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 857–869. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-857-869.

2. *Ивакин Я. А.* Модель поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев, Р. Я. Ивакин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 842–855. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-842-855.

3. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки / Под общ. ред. чл.-кор. РАН Р. М. Юсупова и д-ра техн. наук В. В. Поповича. — СПб: Наука, 2013. — 284 с.

4. *Попович В. В.* Моделирование гидроакустических полей на основе интеллектуальной геоинформационной системы / В. В. Попович [и др.] // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2009. — № 4. — С. 37–44.

5. *Гучек В. И.* Системы мониторинга на основе ИГИС / В. И. Гучек, В. И. Ермолаев, В. В. Попович // Оборонный заказ. — 2012. — № 2 (21). — С. 58–61.

6. *Ермолаев В. И.* Использование геопространственных данных при управлении морской распределенной системой наблюдения / В. И. Ермолаев // Материалы 8-й конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ–2014). — СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. — С. 270–276.

7. *Ермолаев В. И.* Индикаторы тактической обстановки для операторов гидроакустических средств / В. И. Ермолаев [и др.] // Морская радиоэлектроника. — 2017. — № 3 (61). — С. 28–33.

8. *Ермолаев В. И.* Применение интеллектуальных геоинформационных систем при проектировании гидроакустических средств / В. И. Ермолаев // Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. — 2016. — С. 446–450.

9. *Ermolaev V.* Modeling of Search Actions Under the Conditions of Variable Environment Properties / V. Ermolaev // Information Fusion and Geographic Information Systems (IF AND GIS 2013). — Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. — Pp. 107–117. DOI: 10.1007/978-3-642-31833-7_7.

10. *Ermolaev V.* Geoinformational Support of Search-Efforts Distribution Under Changing Environmental Conditions / V. Ermolaev, S. Potapichev // Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS'17). — Springer, Cham, 2018. — Pp. 153–164. DOI: 10.1007/978-3-319-59539-9_12.

11. *Malyj V.* Modeling of Surveillance Zones for Bi-static and Multi-static Active Sonars with the Use of Geographic Information Systems / V. Malyj // Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS'17). — Springer, Cham, 2018. — Pp. 139–152. DOI: 10.1007/978-3-319-59539-9_11.

REFERENCES

1. Ivakin, Yan A., and Sergei N. Potapychev. "Decision-making intelligent support at dispatching geospatial processes of marine transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.4 (2018): 857–869. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-857-869.

2. Ivakin, Yan A., Sergei N. Potapychev, and Roman Y. Ivakin. "A model for supporting the scheduling of geospatial processes of the water transport based on the situational management." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 842–855. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-842-855.

3. Yusupov, R. M., and V. V. Popovich, eds. *Intellektual'nye geograficheskie informatsionnye sistemy dlya monitoringa morskoi obstanovki*. SPb: Nauka, 2013.

4. Popovich, V. V., V. I. Ermolaev, Y. B. Leontyev, and O. V. Smirnova. "Modelirovanie gidroakusticheskikh polei na osnove intellektual'noi geoinformatsionnoi sistemy." *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii* 4 (2009): 37–44.

5. Guchek, V. I., V. I. Ermolaev, and V. V. Popovich. "Sistemy monitoringa na osnove IGIS." *Oboronnyi zakaz* 2(21) (2012): 58–61.

6. Ermolaev, V. I. "Ispol'zovanie geoprostranstvennykh dannykh pri upravlenii morskoi raspredelennoi sistemoi nablyudeniya." *Materialy 8-i konf. «Informatsionnye tekhnologii v upravlenii» (ITU-2014)*. SPb: AO «Kontsern «TsNII «Elektropribor», 2014. 270–276.

7. Yermolaev, V. I., N. S. Karishnev, V. V. Popovich, and S. N. Potapychev. "Indicators of tactical situation (situational awareness) for hydroacoustic equipment operators." *Marine Radio electronics* 3(61) (2017): 28–33.

8. Ermolaev, V. I. "Primenenie intellektual'nykh geoinformatsionnykh sistem pri proektirovanii gidroakusticheskikh sredstv." *Regional'naya informatika i informatsionnaya bezopasnost' Sbornik trudov. Sankt-Peterburgskoe obshchestvo informatiki, vychislitel'noi tekhniki, sistem svyazi i upravleniya.* SPb: SPIIRAS, 2016. 446–450.

9. Ermolaev, Victor. "Modeling of Search Actions Under the Conditions of Variable Environment Properties." *Information Fusion and Geographic Information Systems (IF AND GIS 2013).* Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. 107–117. DOI: 10.1007/978-3-642-31833-7_7.

10. Ermolaev, Victor, and Sergey Potapichev. "Geoinformational Support of Search-Efforts Distribution Under Changing Environmental Conditions." *Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS'17).* Springer, Cham, 2018. 153–164. DOI: 10.1007/978-3-319-59539-9_12.

11. Malyj, Vladimir. "Modeling of Surveillance Zones for Bi-static and Multi-static Active Sonars with the Use of Geographic Information Systems." *Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS'17).* Springer, Cham, 2018. 139–152. DOI: 10.1007/978-3-319-59539-9_11.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Потапычев Сергей Николаевич —
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»
198226, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 46
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 39
e-mail: *potapychev@mail.ru*

Малый Владимир Владимирович —
доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»
198226, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 46
ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»
197045, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Ушаковская наб. 17/1
e-mail: *v_malyj@rambler.ru*

Ивакин Ян Альбертович —
доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»
198226, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 46
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39
e-mail: *yan_a_ivakin@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Potapychev, Sergei N. —
PhD,
senior researcher
Concern OCEANPRIBOR JSC
46 Chekalovskiy Av., St. Petersburg, 198226, Russian Federation
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS)
39 14th liniya V.O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation
e-mail: *potapychev@mail.ru*

Malyj, Vladimir V. —
Dr. of Technical Sciences, professor,
leading researcher
Concern OCEANPRIBOR JSC
46 Chekalovskiy Av., St. Petersburg, 198226, Russian Federation
Kuznetsov Naval Academy
17/1 Ushakovskaya Naberezhnaya Str., St Petersburg, 197045, Russian Federation
e-mail: *v_malyj@rambler.ru*

Ivakin, Yan A. —
Dr. of Technical Sciences, professor,
leading researcher
Concern OCEANPRIBOR JSC
46 Chekalovskiy Av., St. Petersburg, 198226, Russian Federation
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS)
39 14th liniya V.O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation
e-mail: *yan_a_ivakin@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 16 марта 2020 г.
Received: March 16, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-576-582

MEASUREMENT OF ICE THICKNESS IN THE SEA PORT WATER AREA USING PICOR-ICE DEVICE

N. T. Nichiporenko[1], B. N. Sivachenko[1], A. D. Zerkal'[2]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation
[2] — JSC "Financial Industrial Company "ESTRA", Mytishchi, Moscow region, Russian Federation

A difficult ice situation had developed during the winter navigation of 2017/2019 in the waters of the seaport of St. Petersburg, near the St. Petersburg oil terminal and in the Golden Gate area of the St. Petersburg sea channel. Large and small ships had been getting stuck in the channel with fast ice and icebreakers and tugboats had been having to free the ice channel. The use of radar equipment for remote measurement of the ice thickness in the channel with fast ice had helped to solve this problem.

In the winter navigation of 2017/2019 in the water area of Saint Petersburg marine port the series of telemetering of ice thicknesses was executed from the boards of sea vessels and ice-breakers. Researches of ice thickness, conducted with using «PikoR-ICE» radar device, are considered. Measurements, conducted on the channels with fast ice and at port berths, are explored. Of greatest interest are measurements of ice thickness in the area of the Golden gate and Petersburg Oil Terminal, where ballast bulkers and dry-cargo ships were often stuck. The measured thickness of pressed ice is 140-200 cm. Overcoming such ice thicknesses is only possible for the powerful icebreaker fleet. Information about measuring the ice thicknesses is studied on the courses of training of marine navigators on ice courses to the program of the Arctic Polar Code at the Admiral Makarov Training Center. Taking into account the opinion of navigators, it has been decided that such measuring device of ice thickness is needed on ships board in Polar waters and it is advisable to know the ice thicknesses along the vessel route at distances of 5-10 cbl with using the flying apparatus.

Keywords: radar, drifting ice, fast ice, device for measuring the ice thickness, flying apparatus.

For citation:
Nichiporenko, Nikolay T., Boris N. Sivachenko, and Andrei D. Zerkal'. "Measurement of ice thickness in the sea port water area using PicoR-ICE device." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.3 (2020): 576–582. DOI:10.21821/2309-5180-2020-12-3-576-582.

УДК 621.396.969.33

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА НА АКВАТОРИИ МОРСКОГО ПОРТА С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА «ПИКОР-ЛЕД»

Н. Т. Ничипоренко[1], Б. Н. Сиваченко[1], А. Д. Зеркаль[2]

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — ООО «ФПК ЭСТРА», г. Мытищи, Московская обл., Российская Федерация

Рассмотрена сложившаяся сложная ледовая обстановка в зимний период 2017–2019 г. на акватории морского порта Санкт-Петербург в районе Петербургского нефтяного терминала и в районе Золотых ворот Санкт-Петербургского морского канала, когда большие и малые морские суда застревали в ледовом припайном канале и освобождать ледовый канал приходилось с использованием ледоколов и буксиров. Решить указанную задачу помогло использование специального радиолокационного оборудования по дистанционному измерению толщины льдов в припайном ледовом канале. Отмечается, что в порту Санкт-Петербург при постановке танкеров к причалам № 3 и № 4 ПНТ на Санкт-Петербургский морской канал выбрасывается (выталкивается) большое количество битого льда, снега, сморозей и др. При отрицательных температурах наружного воздуха балластные и балкеры в грузу, танкеры, следующие по морскому каналу, застревают в ледовом канале и требуется помощь мощных ледоколов и буксиров для дальнейшего движения судов, соответственно, увеличиваются затраты времени и происходит блокирование (остановка) работы морского канала.

Исследованы проведенные измерения толщин льда с борта транспортных судов и ледоколов в зимнюю навигацию 2017–2019 гг. на акватории морского порта Санкт-Петербург с использованием радарного прибора «Пикор-Лед», который позволяет вести записи отраженных сигналов для последующего просмотра профиля ледового покрова с привязкой к координатам при использовании приемоиндикатора GPS / ГЛОНАСС. Подчеркивается, что программное обеспечение позволяет свести географические координаты с вычислением толщин слоев. Исследованы измерения, которые проводились на ледовых припайных каналах и у причалов порта. Наибольший интерес показали измерения толщины льда в районе «Золотых ворот» и Петербургского нефтяного терминала, где часто застревали балластные балкеры и сухогрузы. Отмечается, что измеренная толщина напрессованного льда составила 140–200 см. С учетом мнения судоводителей принято решение о том, что на борту судна необходим ледоизмеритель «Пикор-Лед», но при этом желательно знать толщины льдов по ходу судна на расстояниях 5–10 кбт с использованием летательного аппарата.

Ключевые слова: радар, лед, припай, измерение толщины льда, БПЛА.

Для цитирования:
Ничипоренко Н. Т. Измерение толщины льда на акватории морского порта с помощью прибора «Пикор-Лед» / Н. Т. Ничипоренко, Б. Н. Сиваченко, А. Д. Зеркаль // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 576–582. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-576-582.

Введение (Introduction)

В зимний период с 2017–2019 гг. на акватории морского порта Санкт-Петербург в районе Петербургского нефтяного терминала (ПНТ) и в районе Золотых ворот Санкт-Петербургского морского канала сложилась сложная ледовая обстановка. Большие и малые морские суда застревали в ледовом припайном канале и освобождать ледовый канал приходилось с использованием ледоколов и буксиров. Решить указанную задачу помогло использование специального радиолокационного оборудования по дистанционному измерению толщины льдов в припайном ледовом канале. В порту Санкт-Петербург при постановке танкеров к причалам № 3 и № 4 ПНТ на Санкт-Петербургский морской канал выбрасывается (выталкивается) большое количество битого льда, снега, сморозей и др. При отрицательных значениях температуры наружного воздуха балластные и балкеры в грузу, танкеры, следующие по морскому каналу, застревают в ледовом канале. Требуется помощь мощных ледоколов и буксиров для дальнейшего движения судов. При этом увеличиваются затраты времени и происходит блокирование (остановка) работы морского канала.

Измерители толщины льда, как правило, используют подповерхностную радиолокацию, излучают сверхширокополосные сигналы малой и средней мощности, обычно в пределах единиц Вт [1]–[3]. Суть метода ППР состоит в излучении электромагнитных импульсов в изучаемую среду и регистрации сигналов, отраженных от границ физически разнородных слоев и локальных неоднородностей [4], [5]. Анализ материалов научно-практических конференций «Георадар–2004» и в последующие 2017–2020 гг. подтверждает бурное развитие и применение методов и аппаратуры георадиолокации в различных отраслях народного хозяйства [6]:

– в строительстве;

– в геологоразведочных работах;

– для зондирования горных пород, полярных ледников и др.

Исследования толщины льдов в порту Санкт-Петербург проводились с использованием радарного прибора «Пикор-Лед». Измерения проводились на ледовых припайных каналах и у причалов порта. Наибольший интерес показали измерения толщины льда в районе «Золотых ворот» и Петербургского нефтяного терминала, где часто застревали балластные балкеры и танкеры. Предполагаемая толщина напрессованного льда могла составлять более метра.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В указанный период с борта ряда проходящих судов, ледоколов, буксиров были выполнены серии дистанционных измерений толщин льдов. Часть измерений проводилась с использованием носового центрального клюза с опусканием измерительного прибора на высоту 50–80 см над поверхностью льда, а также с бортов транспортных судов и ледоколов.

Авторами настоящего исследования были выполнены экспериментальные измерения толщины льдов при следовании по морскому каналу. Была выполнена проверка возможности использования для контроля толщины льда георадаров различных производителей. Рассматривались РИТЛ «Аквамарин» [7] и георадары ЛОГИС серии «Око» [8] и др. [9], [10]. Приборы сравнивались по критериям параметров точности, диапазону измеряемых величин, масса-габаритным характеристикам, а также доступности. В результате сравнения был выбран контрольно-индикационный прибор «Пикор-Лед»(ледомер, георадар), который серийно производится компанией «ФПК “ЭСТРА”» [11].

Радиоледомер «Пикор-Лед» является геофизическим прибором, предназначенным для подповерхностного зондирования и мониторинга непрозрачных сред: льда, снега, дорожного покрытия, грунтов и т. д. На основании полученных данных прибор позволил вычислять толщины слоев зондируемых сред, обнаруживать и вычислять расстояния до неоднородностей в средах [3]. Знание толщины льдов и снега необходимо многим хозяйствующим субъектам: рыбакам, полярникам, ученым и др. Прибор позволяет вести записи отраженных сигналов для последующего просмотра профиля ледового покрова с привязкой к координатам при использовании приемоиндикатора GPS / ГЛОНАСС. Программное обеспечение дает возможность свести географические координаты с вычислением толщин слоев. Прибор имеет мобильное исполнение, позволяющее проводить измерения в движении с высоты 50 … 80 см (рис. 1 и 2). В качестве проверки правильности работы прибора можно использовать ледобур и мерную линейку.



Рис. 1. Внешний вид измерителя толщины льда «Пикор-Лед»



Рис. 2. Переносной вариант

В течение двух навигаций 2017–2019 гг. проводились инструментальные измерения толщины льдов в ледовом припайном канале на его оси и по бровкам ледового канала.

Результаты (Resalts)

С помощью измерителя толщины льда «Пикор-Лед», работающего в диапазоне радиочастот около 1,0 ГГц, удалось выполнить измерения толщины льда на ледоколах и транспортных судах во время их плавания в указанных районах порта. Толщина льда по бровкам ледового канала в отдельных местах в районе ПНТ и «Золотых ворот» составляла 140–200 см при известной толщине припайного льда в восточной части Финского залива 20–30 см.

Обсуждение (Discussions)

Информация об измерении толщин льдов была тщательно изучена на курсах повышения квалификации судоводительского состава и ледовых курсах по программе «Полярного кодекса ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова». Мнения судоводителей разделились следующим образом:

– измеритель толщины льда должен устанавливаться на носу, на планшире судна. При этом такой измеритель толщины льда необходим на ледоколах и транспортных судах, работающих в ледовых условиях;

– необходимы также летательный аппарат и канал связи в реальном масштабе времени для передачи данных о толщине льдов на дистанциях 5–10 кбт от борта судна.

Использование радиоледомера «Пикор-Лед» на судне можно реализовать практически без изменения типовой комплектации прибора. Антенный модуль можно опустить на требуемую высоту подвеса, порядка 1–2 м (достаточную для выполнения измерений и безопасную при столкновениях с торосами). При этом корпус антенного модуля выполнен на основе ударопрочного герметичного кейса IP67. Работа программы и питание прибора осуществляются на стандартном ноутбуке на базе ОС Windows, соединяемом с антенным модулем с помощью длинного USB-кабеля. Информация с экрана ноутбука может передаваться на ходовой мостик (или другому пользователю) в режиме удаленного рабочего стола по беспроводному радиоканалу.

Использование радиоледомера «Пикор-Лед», технические характеристики которого приведены в таблице, на летательном аппарате типа квадрокоптера или беспилотном вертолете без существенных доработок возможно только при дальности действия беспроводного радиоканала связи и прямой видимости оператора БПЛА (беспилотного летательного аппарата). При этом необходимо либо вести полет БПЛА на высоте 1–2 м, что опасно из-за возможных столкновений с поверхностью льда, торосами, либо вести полет на безопасной высоте и опускаться на высоту 1–2 м для измерений льда в точке. Выполнение работ на большей дальности (например, полет по заданному маршруту) возможно только в режиме записи данных измерений с их просмотром по возвращении.

Технические параметры ледомера «Пикор-Лед»

Технические параметры	Антенный модуль «Пикор-2»	Антенный модуль «Пикор-3»
Измеряемая толщина (глубина зондирования): – льда – снега	 5 … 200 см 5 … 300 см	 5 … 300 см 5 … 450 см
Центральная частота	1700 МГц	1200 МГц
Точность измерений	1–2 см	1–2 см
Разрешающая способность (минимальный размер объекта)	3 см	5 см
Число измерений в секунду (в зависимости от настроек)	65	65
Диаметр площади обследования	50 см	50 см
Совместимость с операционной системой ПК	Windows 7, 8, 10 Android (через удаленный рабочий стол)	Windows 7, 8, 10 Android (через удаленный рабочий стол)
Совместимость формата данных с другими Программами	RadExplorer, GeoScan через MatLab конвертер	RadExplorer, GeoScan через MatLab конвертер

Еще одним вариантом использования прибора «Пикор-Лед» является проведение ледовой разведки акватории порта и предполагаемых маршрутов судов. Данная функция возлагается на капитана конкретного ледокола или на отдельную службу. Такая ледовая разведка может выполняться на базе судна на воздушной подушке либо плавающего снегоболотохода. Для обследования труднопроходимых наслоений льда, сморозей, торосов может дополнительно использоваться недорогой мультикоптер с полезной нагрузкой в виде радиоледомера.

Далее представлены примеры результатов экспериментальных измерений льда.

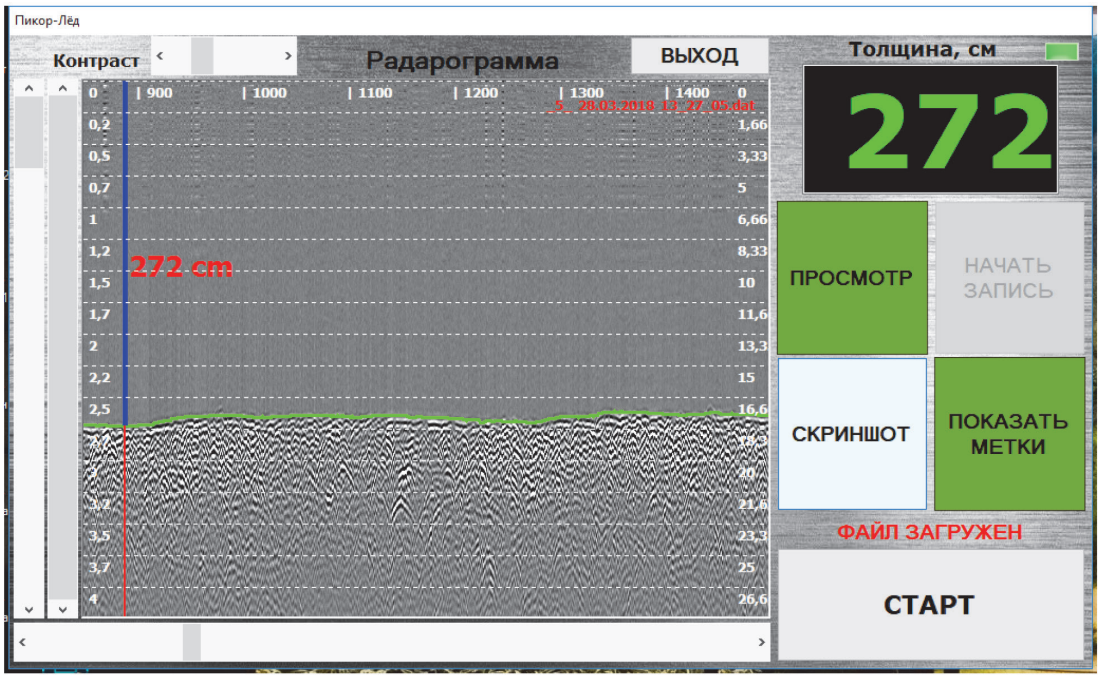


Рис. 3. Радарограмма измерения толщины льда на бровках ледового канала в районе Петербургского нефтяного терминала и Золотых ворот

Как видно из рис. 3 бровка ледового припайного канала набита мелкобитым льдом до толщины 2,7 м, что приводит к застреванию в ледовом канале балластных судов.

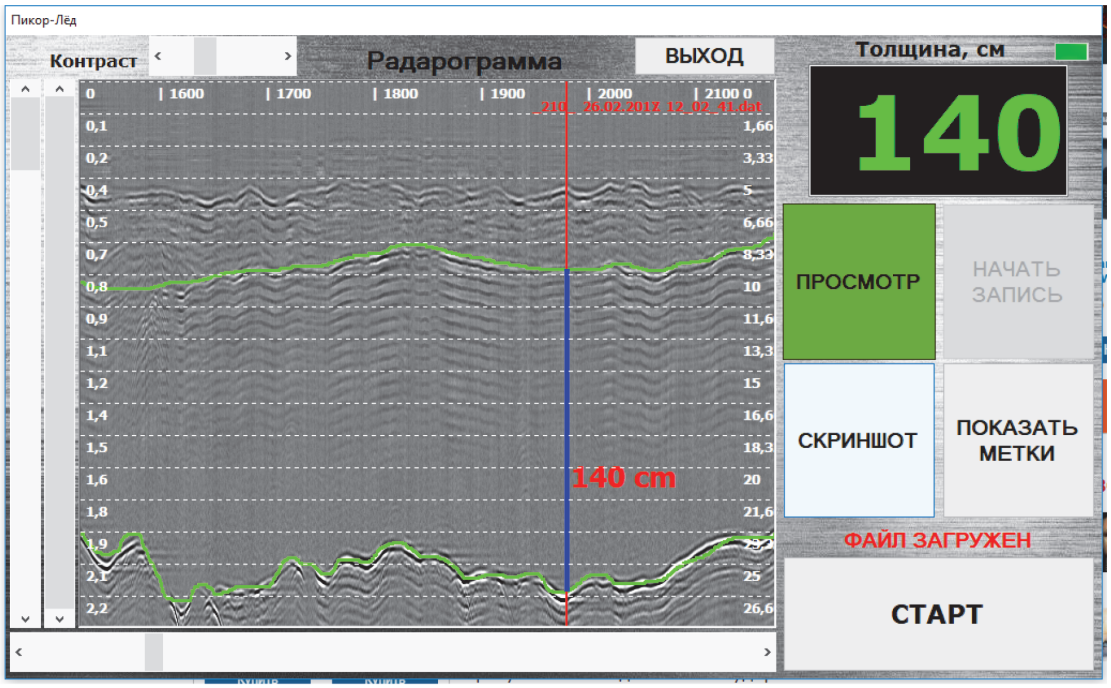


Рис. 4. Радарограмма измерения толщины льда в района Петербургского нефтяного терминала

Из радарограммы (рис. 4) видно, что толщина льда на оси ледового канала составляет примерно 140 см.

Заключение (Conclusion)

При измерении толщин льдов при следовании по оси канала в районе ПНТ и «Золотых ворот» максимальные значения достигали 1,4 м, а по бровкам канала до 2,7 м. Преодолеть такие толщины льдов только под силу мощному ледокольному флоту. Из этого следует очень важный вывод: после постановки с помощью портового ледокола и буксиров балластных танкеров на причалы ПНТ-3 и ПНТ-4 необходимо освежить ледовый припайный канал с помощью одного или нескольких проходов мощного ледокола типа «Ермак», «Мурманск», «Владивосток», которые обеспечивают ледовые операции в зимнюю навигацию в нашем порту.

Благодарности (Acknowledgements)

Особая благодарность курсанту 6-го курса факультета навигации и связи ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова Юлии Ивановне Венковой за сбор, обработку и подготовку материалов для настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по радиолокации: в 2 кн. / Под ред. М. И. Сколника; пер. с англ. под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. С. Вербы. — М.: Техносфера, 2015. — Кн. 2. — 1351 с.

2. *Афанасьев В. В.* Судовые радиолокационные системы / В. В. Афанасьев [и др.]. — СПб.: Веленара, 2009. — 365 с.

3. *Abreu R.D.* RADAR Sea Ice Signatures: An Operational Primer / R.D. Abreu // Proceedings of a workshop on mapping and archiving of sea ice data – the expanding role of radar. — Ottawa, Canada, 2000. — WMO/TD № 1027. — Pp. 85–94.

4. Пат. 2526222 Российская Федерация, МПК G01B 15/02. Способ радиолокационного определения толщины льда / В. Б. Белянский [и др.]; заяв. и патентообл. ОАО «Конструкторское бюро «Аметист». — № 2013105669/28; заявл. 12.02.2013; опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23. — 9 с.

5. Георадары ЛОГИС, ОКО [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.rusgeocom.ru (дата обращения: 11.12.19).

6. *Семейкин Н. П.* Георадиолокационные исследования пресных речных льдов. Измерение толщины льда // Доклад на междунар. научно-практ. конф. по георадиолокации «Георадар 2004» [Электронный ресурс] / Н. П. Семейкин [и др.]. — Режим доступа: http://www.geotech.ru/about/stati/georadiolokacionnye_issledovaniya_presnyh_rechnyh_ldov_izmerenie_tolwiny_lda/ (дата обращения: 20.11.19).

7. Компания «ЭЛЕМЕНТАВИА» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.elementavia.ru (дата обращения: 03.11.19).

8. Пергам инжиниринг. Георадары RD-1100; RD-1500 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.pergam.ru (дата обращения 10.11.19).

9. *Comfort G.* Ice Thickness Prediction: a Comparison of Various Practical Approaches / G. Comfort, R. Abdelnour // Proceedings 17th CRIPE Workshop on River Ice. — 2013. — Pp. 329–342.

10. *Yu Y.* Comparison of thin ice thickness distributions derived from RADARSAT Geophysical Processor System and advanced very high resolution radiometer data sets / Y. Yu, R.W. Lindsay // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2003. — Vol. 108. — Is. C12. DOI: 10.1029/2002JC001319.

11. Технические параметры георадара «Пикор» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ledomer.ru (дата обращения: 02.03.18).

REFERENCES

1. Skolnika, M. I., ed. *Spravochnik po radiolokatsii. V 2 kn.* M.: Tekhnosfera, 2015. Book 2.

2. Afanas'ev, V. V., A. N. Marinich, A.V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. *Sudovye radiolokatsionnye sistemy.* SPb.: Velenara, 2009.

3. Abreu, R. D. "RADAR Sea Ice Signatures: An Operational Primer." *Proceedings of a workshop on mapping and archiving of sea ice data – the expanding role of radar.* Ottawa, Canada, 2000. WMO/TD № 1027. 85–94.

4. Belyanskii, V. B., V. S. Speranskii, O.E. Tkachenko, and L. B. Khanin. RU 2 526 222 C1, IPC G01B 15/02. Sposob radiolokatsionnogo opredeleniya tolshchiny l'da. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Aug. 2014.

5. Georadary LOGIS, OKO. Web. 11 Dec. 2019 <www.rusgeocom.ru>.

6. Semeikin, N.P. "Georadiolokatsionnye issledovaniya presnykh rechnykh l'dov. Izmerenie tolshchiny l'da." *Doklad na mezhd. nauchno-prakt. konf. po georadiolokatsii «Georadar 2004»*. Web. 20 Nov. 2019 <http://www.geotech.ru/about/stati/georadiolokacionnye_issledovaniya_presnyh_rechnyh _ldov_izmerenie_tolwiny_lda/>.

7. ELEMENTAVIA Company. Web. 3 Nov. 2019 <https://elementavia.com/>.

8. Pergam — authorized distributor. Web. 10 Nov. 2019 <https://www.pergam.ru/en/>.

9. Comfort, George, and Razek Abdelnour. "Ice Thickness Prediction: A Comparison of Various Practical Approaches." *Proceedings 17th CRIPE Workshop on River Ice*. 2013. 329–342.

10. Yu, Y., and R.W. Lindsay. "Comparison of thin ice thickness distributions derived from RADARSAT Geophysical Processor System and advanced very high resolution radiometer data sets." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 108.C12 (2003). DOI: 10.1029/2002JC001319.

11. PicoR GPR. Web. 2 Mar. 2018 <http://ledomer.ru/en/>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ничипоренко Николай Тимофеевич —
доктор 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*

Сиваченко Борис Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *sbn1@mail.ru*, *fkt_pt@gumrf.ru*

Зеркаль Андрей Дмитриевич —
руководитель проекта по разработке ледомера
ООО «ФПК ЭСТРА»
41014, Российская Федерация, Московская обл., г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, 16/19, оф. 228
e-mail: *a@ledomer.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nichiporenko, Nikolay T. —
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: *fkt_pt@gumrf.ru*

Sivachenko, Boris N. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: *sbn1@mail.ru*, *fkt_pt@gumrf.ru*

Zerkal', Andrei D. —
Ice thickness meter project manager
JSC "Financial Industrial Company "ESTRA"
16/19 Very Voloshinoi Str., Moscow region, Mytishchi, 41014, Russian Federation
e-mail: *a@ledomer.ru*

Статья поступила в редакцию 4 мая 2020 г.
Received: May 4, 2020.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-583-590

USING OXYGEN INSTEAD OF AIR AS AN OXIDIZER OF MARINE FUEL FOR SHIP POWER PLANTS

V. Ye. Leonov, A. A. Gurov

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

The atmospheric air used to burn any organic carbon-containing fuel contains two main macrocomponents by volume: 79.03 % nitrogen and 20.92 % oxygen, the rest is carbon dioxide, argon, xenon, krypton, ozone, helium, hydrocarbons in the amount of 0.05 %. In the process of fuel oxidation, nitrogen is an inert substance, does not support the process of fuel oxidation, and at high temperatures and pressures in the combustion chamber, nitrogen is oxidized by oxygen with the formation of highly toxic nitrogen oxides. To increase the degree of oxidation of marine fuel in the fuel-air mixture, a high coefficient of excess air is maintained, which leads to an even greater increase in the mass of nitrogen. In the combustion chamber, the nitrogen contained in the fuel-air mixture is heated to 850-1000 ° C, which leads to unproductive consumption of marine fuel. The dimensions and metal consumption of the ship power plant (SPP) are therefore high. An alternative solution for air replacement with oxygen, used as an oxidizing agent in the ship power plants is proposed in the paper. This decision has been stimulated by a number of technical advantages in replacing air with oxygen, namely, reducing the metal consumption of the SPP, reducing marine fuel consumption, reducing the emission of carbon dioxide, which is the main component of «greenhouse» gases — harmful toxic components, in particular, the complete elimination of nitrogen oxides with exhaust gases of the ship power plant. As a result of this proposal implementation the economic and environmental problems of maritime transport can be solved. Using a specially developed computer program, the calculations of the SPP energy efficiency have been made; they have showed that in the case of replacing air with oxygen, the SPP efficiency increases by 25%, which, accordingly, leads to reducing marine fuel cost and reducing the harmful toxic components emission, in particular, carbon dioxide, which is the main component of "greenhouse" gases. Based on the analysis of scientific, technical, patent materials and our own scientific research, the process of obtaining oxygen on the alternative basis from water and carbon dioxide is of scientific and practical interest. Two schemes for obtaining oxygen from water and carbon dioxide, including heterogeneous catalytic processes, plasma-chemical installations, are proposed.

Keywords: oxygen, carbon dioxide, air, consumption, marine fuel, ship deadweight, load, ship hull, environment protection.

For citation:
Leonov, Valeriy Ye., and Anatolii A. Gurov. "Using oxygen instead of air as an oxidizer of marine fuel for ship power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 583–590. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-583-590.

УДК 656. 61. 052 (075. 8)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИСЛОРОДА В КАЧЕСТВЕ ОКИСЛИТЕЛЯ СУДОВОГО ТОПЛИВА ВМЕСТО ВОЗДУХА ДЛЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В. Е. Леонов, А. А. Гуров

Херсонская Государственная морская академия, Херсон, Украина

Атмосферный воздух, используемый для сжигания любого органического углеродсодержащего топлива, содержит в своем составе два основных макрокомпонента, % объмн.: азот — 79,03, кислород — 20,92. Концентрация микрокомпонентов: диоксида углерода, аргона, ксенона, криптона, озона,

гелия, углеводородов, составляет в сумме 0,05. В процессе окисления судового топлива азот является инертным веществом, не принимающим участие в процессе окисления топлива, а при высоких значениях температур и давления в камере сгорания азот окисляется кислородом с образованием высокотоксичных оксидов азота. Для повышения степени окисления судового топлива в топливовоздушной смеси поддерживается высокий коэффициент избытка воздуха, что приводит к еще большему увеличению массы азота. В камере сгорания азот, содержащийся в топливовоздушной смеси, нагревается до 800–1000 °С, что приводит к непроизводительному расходу судового топлива. Габариты и металлоемкость судовой энергетической установки вследствие этого высокие. Предлагается альтернативное решение по замене воздуха, используемого в качестве окислителя в судовых энергетических установках, кислородом. Это решение стимулировано следующими техническими преимуществами при замене воздуха кислородом, а именно: снижением металлоемкости СЭУ, снижением расхода судового топлива, уменьшением выделения диоксида углерода — основного компонента «парниковых» газов, — вредных токсичных компонентов, в частности полного исключения оксидов азота с отработанными газами судовой энергетической установки. В результате реализации данного предложения могут быть решены экономические и экологические проблемы морских грузоперевозок. Проведены расчеты тепловых балансов энергетической эффективности судовой энергетической установки, которые показали, что в случае замены воздуха кислородом эффективность судовой энергетической установки повышается на 25 %, что, соответственно, приводит к снижению расхода судового топлива и снижению эмиссии вредных токсичных компонентов, в частности диоксида углерода — основного компонента «парниковых» газов. На основании выполненного анализа научно-технических, патентных материалов и собственных научно-исследовательских работ научный и практический интерес представляет процесс получения кислорода на альтернативной основе из воды и диоксида углерода. Предложены две схемы получения кислорода из воды и диоксида углерода, включающие гетерогенно-каталитические процессы и плазмохимические установки.

Ключевые слова: кислород, диоксид углерода, воздух, расход, судовое топливо, дедвейт судна, нагрузка, корпус судна, защита, экология.

Для цитирования:
Леонов В. Е. Использование кислорода в качестве окислителя судового топлива вместо воздуха для судовых энергетических установок / В. Е. Леонов, А. А. Гуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 583–590. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-583-590.

Введение (Introduction)

Процесс транспортировки грузов, как и всякий производственный процесс, связан с затратами живого и овеществленного труда. Размер этих затрат (в денежном выражении), приходящихся на единицу выполненной морским транспортом работы, называется *себестоимостью транспортировки грузов*. В себестоимости морских грузоперевозок доля финансовых расходов на судовое топливо составляет 70–75 % [1] и [2]. В общем потреблении мировых углеводородных ресурсов на долю морского транспорта приходится более 15 % и она имеет устойчивую тенденцию к росту, следуя, соответственно, развитию техногенных систем. При сжигании одной условной единицы массы (УЕМ) судового углеводородного топлива расходуется примерно 20 УЕМ атмосферного воздуха, при этом выделение диоксида углерода — основного компонента «парниковых» газов — увеличивается более чем в три раза по сравнению с расходом судового топлива.

Эксплуатация морского транспорта как составной части техногенных систем приводит к следующим негативным последствиям:

– исчерпывание невозобновляемых ресурсов углеводородного происхождения;

– удорожание стоимости морских грузовых перевозок;

– интенсивное загрязнение морской, окружающей среды;

– стремительное развитие планетарного «парникового» эффекта.

В последнее время Международной морской организацией (IMO) принят ряд Резолюций, направленных на снижение расхода судового топлива, повышение коэффициента энергетической эффективности судна, уменьшение эмиссии оксидов серы, диоксида углерода с отработанными газами судовых энергетических установок (СЭУ) [3]–[6].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящее время практически все техногенные системы используют для процессов окисления (сгорания) атмосферный воздух (в целом эта доля превышает 99 %): спектр довольно широкий: от газовой плитки на кухне до СЭУ, авиационных двигателей [7]–[10]. В то же время дефицит кислорода, содержащегося в атмосферном воздухе, на планете относится к глобальным экологическим проблемам.

Атмосферный воздух с небольшой степенью погрешности включает в себя два основных макрокомпонента: приблизительно, % объемн.: азот — 79,03, кислород — 20,92, остальное приходится на диоксид углерода, аргон, ксенон, криптон, озон, гелий, углеводороды, в сумме — 0,05. В СЭУ для процессов окисления (сгорания) топлива расходуется только кислород, содержащийся в исходном воздухе, и то не полностью (в отработанных газах СЭУ остаточная концентрация кислорода колеблется в пределах 4,5–8,5 % объемн.), азот в данном случае является инертным газом. При условии сгорания судового дизельного топлива в СЭУ — 25–35 атм., температуре 800–1000 °С в цилиндрах двигателя из азота и кислорода воздуха образуются оксиды азота, которые оказывают отрицательное влияние на воздушный бассейн, морскую, окружающую среду и приводят к новым проблемам, т. е. к необходимости нормирования оксидов азота в отработанных газах и очистке отработанных газов СЭУ от оксидов азота [1] и [2].

Поскольку в случае использования воздуха для окисления судового топлива, азот выступает в качестве инертного газа, на его нагрев (до 800–1000 ºС), компримирование (до 25–35 атм.) расходуется значительный объем энергоресурсов (судового дизельного топлива). Причем во всех конструкциях СЭУ предусмотрен избыток воздуха по сравнению с теоретическим (стехиометрическим) для того, чтобы повысить степень окисления (сгорания) судового дизельного топлива. Согласно практическим данным, для сжигания одной тонны судового дизельного топлива требуется подать в СЭУ 14–20 т атмосферного воздуха (для упрощения примем 20 т).

Результаты (Results)

Для оценки эффективности техногенных систем принят термин «коэффициент полезного действия» (КПД), который описывается уравнением [2] :

$$\eta = G_{\text{ЦП}} / G_{\text{ЦП+0}} \cdot 100\ \%, \quad (1)$$

где $G_{\text{ЦП}}$ — масса природно-ресурсного потенциала, превращенного в целевую продукцию, усл. т/т;

$G_{\text{ЦП + 0}}$ — масса природно-ресурсного потенциала, превращенного в целевую продукцию и отходы, усл. т/т.

По оценкам экспертов, только 15–25 % исходного природно-ресурсного потенциала преобразуется в целевую продукцию, а основная доля — 75–85 % в материальные и энергетические отходы, побочные вещества и соединения, потери теплоты материальных потоков. Примем КПД судовой энергетической установки 25 %. Тогда при сжигании одной тонны судового дизельного топлива (СДТ) в потоке атмосферного воздуха может быть предложена следующая структура распределения расхода СДТ (т, %):

1. На производство полезной работы — 0,25 т, 25 %.

2. При сжигании СДТ в СЭУ на организацию цикла «нагрев – компримирование – дросселирование – охлаждение азота, содержащегося в атмосферном воздухе и в отработанных газах СЭУ» — 0,25 т, 25 %;

3. На образование материальных и энергетических отходов при сжигании СДТ в СЭУ — 0,5 т, 50 %.

Выполним расчеты тепловых балансов, согласно пп. 2, в двух вариантах:

– при использовании в качестве окислителя воздуха;

– при использовании в качестве окислителя кислорода.

Расчеты выполнены согласно уравнению

$$Q = c_{\text{р}} m \Delta T. \quad (2)$$

Примем среднемассовую температуру в цилиндре двигателя, равной 800 °С, расход воздуха 20 т/т СДТ, в том числе 4,2 — кислород и 15,8 — азот, расход только кислорода 4,2 т/т СДТ.

Теплоемкость $c_р$, Дж/моль·К, для кислорода и азота определяли по уравнению, приведенному в работе [11] :

$$c_р = a + bT + cT^{-2}. \quad (3)$$

Значения констант (a, b, c) даны в работе [11]; T — принятая температура, К.

Рассчитываем теплоемкость $c_р$, Дж/моль·К, :

– для азота $c_р^{N2} = 27{,}87 + 0{,}00427 \cdot (800 + 273) = 32{,}45$;

– для кислорода – $c_р^{O2} = 31{,}46 + 0{,}00339 \cdot (800+273) + (–3770) \cdot (800+273)^{–2} = 35{,}097$.

Для удобства расчетов переведем размерность теплоемкости $c_р$, Дж/моль·К, в Дж/г·К.

В результате получим: $c_р^{N2} = 25{,}96$ Дж/г·К ; $c_р^{O2} = 24{,}58$ Дж/г·К.

Определим необходимое количество теплоты:

– в случае использования воздуха $Q_{возд} = (24{,}58 \cdot 4{,}2+25{,}96 \cdot 15{,}8)\Delta T_{возд} = 513{,}41\Delta T_{воздух}$;

– в случае использования кислорода $Q_{O2} = 24{,}58 \cdot 4{,}2\Delta T_{O2} = 103{,}24\Delta T_{O2}$.

В итоге получим, что необходимое количество теплоты в случае использования воздуха в $513{,}41\Delta T_{возд} / 103{,}24\Delta T_{O2} \approx 5$ раз больше, чем в случае использования только кислорода, это справедливо, поскольку $\Delta T_{возд} = \Delta T_{O2}$.

В конечном результате, при замене воздуха в СЭУ на кислород в качестве окислителя СДТ структура распределения расхода СДТ изменится следующим образом, т, %:

– на производство полезной работы — 0,50 т, 50 %;

– при сжигании СДТ в СЭУ на организацию цикла «нагрев – компримирование – дросселирование, охлаждение» отработанных газов СЭУ — 0,05 т, 5 %;

– на образование материальных и энергетических отходов при сжигании СДТ в СЭУ — 0,45 т, 45 %.

Таким образом, если вместо воздуха использовать кислород, то доля совершенной полезной работы увеличится на 25 % и составит 50 %, в то время как на воздухе только 25 %, т. е. вклад в полезную работу СЭУ увеличится в два раза. Кроме этого, будет полностью исключена эмиссия (выделение) оксидов азота. В случае использования кислорода нагрузка на СЭУ по окислителю снизится с 20 т (в случае использования атмосферного воздуха) до 4,2 т (в случае использования кислорода), т. е. практически в 5 раз, а это приведет к снижению габаритов СЭУ, тепловых потерь, расхода СДТ. При всех положительных характеристиках в случае использования кислорода необходимо ответить на два вопроса:

1) как экономически целесообразно получить кислород;

2) как обеспечить взрывобезопасность процесса при использовании кислорода.

Известны освоенные в промышленности способы получения кислорода из атмосферного воздуха:

1-й способ — низкотемпературное разделение атмосферного воздуха;

2-й способ — разделение атмосферного воздуха в присутствии цеолитных катализаторов;

3-й способ — разделение атмосферного воздуха с помощью селективных синтетических полимерных мембран.

Предлагаемая реализация на морском транспорте состоит в следующем. По одному из ранее приведенных способов в стационарных установках, расположенных на берегу, получают кислород. По первому способу жидкий кислород загружают в специальные танки на борту судна с последующим его использованием в качестве окислителя вместо воздуха. По второму и третьему способам полученный газообразный кислород вначале сжижают и жидкий кислород загружают в специальные танки на борту судна с последующим его использованием в качестве окислителя вместо воздуха.

Недостатки способов получения кислорода:

1) высокие материальные и энергетические затраты при получении кислорода из воздуха;

2) низкая концентрация кислорода (50–60 %) в продуктовой реакционной смеси (2-й и 3-й способы);

3) высокие эксплуатационные и капитальные затраты;

4) большой срок окупаемости (более пяти лет) вложенных первоначальных капитальных затрат;

5) отрицательное воздействие на окружающую среду установок по разделению воздуха;

6) низкая кратность запаса ресурсов атмосферного воздуха.

Заявка на изобретение № U 201903694 «Способ получения кислорода» от 10.04.2019 г. по вопросу производства кислорода новым техническим способом в настоящее время находится на рассмотрении и согласовании.

Задача, которая заложена в предлагаемом новом техническом решении, заключается в следующем:

а) заменить воздух, используемый во всех окислительных процессах, в частности, в СЭУ, на кислород;

б) создать новую технологию получения кислорода из диоксида углерода и воды.

Предлагаемый способ ориентирован на использование в качестве исходного сырья для получения кислорода воды (H_2O) и / или диоксида углерода (CO_2). Необходимо отметить, что в этих продуктах глубокого окисления высокое содержание кислорода, соответственно, в воде — 88,8 % масс., в CO_2 — 72,7 % масс., а в атмосферном воздухе лишь около 21 %.

Способ получения кислорода из воды предусматривает следующие стадии:

– получение из воды химически обессоленной воды (ХОВ);

– нагрев, испарение ХОВ, перегрев пара до температуры 200 ± 10 °С;

– подача перегретого пара на катализатор селективного дегидрирования третьего поколения;

– каталитическое дегидрирование ХОВ с получением кислорода;

– нагрев катализатора до температуры 300 ± 10 °С;

– десорбция водорода с поверхности катализатора;

– компримирование, хранение и использование кислорода в качестве окислителя, а водорода — в качестве экологически чистого судового топлива.

Технология получения кислорода из диоксида углерода включает диссоциацию диоксида углерода на составляющие: кислород и углерод / углеродсодержащее соединение с помощью плазмохимической струи в потоке инертного газа (при температуре 5 000–7 000 К) и гетерогенно-каталитической сопряженной реакции с выделением кислорода:

– интенсивная «закалка» нагретого газового потока до 20–30 °С;

– селективное разделение на цеолитных катализаторах системы «углерод / углеродсодержащее соединение – инертный газ»;

– компримирование и ожижение кислорода;

– загрузка сжиженного кислорода в емкости с последующей откаткой в емкости на судне.

Что касается второго вопроса в части опасности использования кислорода в качестве окислителя судового топлива, то, безусловно, опасность возгорания, взрыва и пожара в случае использования кислорода вместо атмосферного воздуха возрастает. Необходимо отметить, что подобные вопросы обеспечения безопасности в случае использования кислорода в качестве окислителя в промышленном масштабе уже решены, примером является производство ацетилена высокотемпературным пиролизом природного газа на Новомосковском, Невинномысском, Северодонецком ПО «Азот».

Обсуждение (Discussion)

При проектировании и постройке судна значительную часть расчетов, наряду с остойчивостью, прочностью корпуса и т. п., занимают расчеты нагрузок, которые, собственно, и несет на себе корпус судна, оставаясь на плаву по определенную грузовую марку. При этом в зависимости от типа

и назначения судна большое значение имеет соотношение веса судна порожнем к скорости судна. В случае, если водоизмещение судна складывается из собственной массы судна и его грузоподъемности (массы полезного груза), то в собственную массу судна порожнем входят:

– корпус судна, оборудованный инвентарем и запасными частями; готовая к эксплуатации СЭУ с инвентарем и запасными частями; вода в котлах, трубопроводах, насосах, конденсаторах, охладителях;

– топливо во всех эксплуатационных трубопроводах;

– диоксид углерода и рассол или другие эксплуатационные материалы в холодильных установках и противопожарных системах;

– остаточная вода в льялах и цистернах, которая не может быть удалена насосами, а также сточные воды и влага.

При этом необходимо обратить внимание на вес собственно СЭУ и сопутствующих при этом дополнительных запасов и оборудования. Облегчение веса судна порожнем за счет СЭУ дает возможность увеличить вес полезного груза (дедвейта) при других неизменных характеристиках судна.

Грузоподъемность судна и эксплуатационная скорость — важнейшие экономические характеристики, которые должны быть гарантированы заводом-изготовителем при постройке, так как нарушение характеристик наказывается договорными штрафами. Валовая грузоподъемность — дедвейт судна — включает все массы, которые не относятся к водоизмещению судна порожнем, а именно:

– собственно груз (включая почту);

– экипаж и пассажиры с багажом;

– все эксплуатационные материалы (запасы топлива, смазочные материалы, масла, котельная питательная вода) в цистернах для запасов;

– судовые запасы, такие как краски, керосин, дерево, смола, канаты;

– запасы для экипажа и пассажиров (питьевая вода, вода для мытья и провизия);

– оборудование для крепления грузов, такое как деревянные упоры, брезенты и мачты, продольные полупереборки для сыпучих грузов;

– специальное оборудование у особых типов судов, например, промысловое оборудование (сети, тросы, тралы).

Отношение водоизмещения судна порожнем к водоизмещению в полном грузу зависит главным образом от типа судна, района плавания, скорости судна и от конструкции корпуса. Так, например, водоизмещение грузового судна порожнем с нормальной эксплуатационной скоростью (14–16 уз) без ледовых подкреплений составляет примерно 25 % водоизмещения в полном грузу. Если грузовое судно имеет полное водоизмещение 15 тыс. т, то водоизмещение порожнем составляет примерно 3 тыс. т, а его дедвейт примерно 8 тыс. т. Отношение массы СЭУ к полному водоизмещению определяется скоростью судна, типом двигателя (дизельная, паротурбинная, дизель-электрическая установка и т. д.), а также типом судна.

Повышение скорости судна при одинаковом типе установки всегда ведет к увеличению мощности двигателя и, следовательно, к увеличению указанных ранее отношений. У судов с дизельной установкой масса двигателя больше, чем у судов с установками других типов. Поскольку к СЭУ относятся также вспомогательные механизмы для производства электрической энергии и силовые установки холодильников, масса энергетических установок пассажирских, рефрижераторных и промысловых судов больше, чем масса установок обычных грузовых судов такого же водоизмещения. Так, масса СЭУ грузовых судов составляет 5–10 %, пассажирских — 10–15 %, рыболовных — 15–20 %, буксиров и ледоколов, как правило, 20–30 % полного водоизмещения.

Отношение дедвейта к полному водоизмещению (коэффициент использования водоизмещения по дедвейту) лучше всего характеризует экономичность грузовых судов, без учета влияния скорости судна. У буксиров и ледоколов дедвейт определяет в первую очередь дальность плавания (длительность рейса), так как у судов этих типов он расходуется главным образом на топливные

материалы и запасы. Максимальный коэффициент использования водоизмещения по дедвейту имеют грузовые суда и танкеры (60–70 %), минимальный — буксиры и ледоколы (10–30 %).

Разработанные технические решения предполагают увеличение дедвейта судна при неизменности водоизмещения, снижение массы энергетической установки, а это, в свою очередь, возможно при установке на судне СЭУ, работающей на кислороде, в качестве составной части топливной системы. Для ледоколов, буксиров, пассажирских судов, дедвейт, конечно, не имеет особого значения, однако новый тип СЭУ также окажет положительное влияние на охрану морской окружающей среды. Для грузовых судов, будь то танкер или сухогруз, увеличение массы полезного груза за счет снижения массы СЭУ будет иметь весомое значение для повышения экономических показателей и рентабельности морских грузоперевозок.

Выводы (Summary)

В результате выполненной работы при использовании в качестве окислителя судового дизельного топлива кислорода вместо воздуха могут быть решены следующие проблемы:

1) снижение расхода судового дизельного топлива вследствие повышения доли использования полезной работы в два раза;

2) снижение эмиссии токсичных компонентов с отработанными газами СЭУ в соответствии со снижением расхода судового дизельного топлива;

3) снижение массы и габаритов СЭУ;

4) снижение тепловых потерь СЭУ в соответствии с уменьшением массы и габаритов судовой энергетической установки;

5) полностью исключены выбросы оксидов азота с отработанными газами СЭУ;

6) в качестве исходного сырья для получения кислорода рекомендуется использовать воду и диоксид углерода, имеющие высокий индекс кратности запасов (более чем 10^{12}) и большую концентрацию кислорода в своем составе (в 3,5 раза для диоксида углерода и в 4,3 раза для воды больше по сравнению с атмосферным воздухом).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леонов В. Е.* Пути повышения эффективности морских грузоперевозок : моногр. / В. Е. Леонов, В. И. Дмитриев. — М.: МОРКНИГА, 2019. — 299 с.

2. *Леонов В. Е.* Экология и охрана окружающей среды: учеб. пособие / В. Е. Леонов, А. В. Ходаковский; под ред. д-ра техн. наук, проф. В. Е. Леонова. — Херсон: ИЦ ХГМА, 2016. — 348 с.

3. MEPC 65/INF.17 IMO Model Course on Energy-Efficient Operation of Ships. — London: World Maritime University, 2013. — 61 p.

4. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency Operational indicator (EEOI). — London: IMO, 2009. — 75 p.

5. *Tran T. A.* Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships / T. A. Tran // Journal of Marine Science: Research & Development. — 2017. — Vol. 7. — Is. 6. — Pp. 243. DOI: 10.4172/2155-9910.1000243.

6. *Пивоваров Л. А.* Разработка плана управления энергоэффективностью судна (ПУЭЭС) для танкеров / Л. А. Пивоваров // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Современные информационные и инновационные технологии на транспорте» — MINTT–2013. — Херсон: ИЦ ХГМА, 2013. — Т. 1. — С. 73–77.

7. *Laursen A.* Availability of elements for heterogeneous catalysis: Predicting the industrial viability of novel catalysts / A. Laursen, J. Sehested, Ib. Chorkendorff, P. C. K. Vesborg // Chinese Journal of Catalysis. — 2018. — Vol. 39. — Pp. 16–26. DOI: 10.1016/S1872-2067(17)62979-6.

8. *Winnes H.* Reducing GHG emissions from ships in port areas / H. Winnes, L. Styhre, E. Fridell // Research in Transportation Business & Management. — 2015. — Vol. 17. — Pp. 73–82. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.008.

9. *Rehmatulla N.* The Implementation of Technical Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Measures in Shipping / N. Rehmatulla, J. Calleya, T. Smith // .Ocean Engineering. — 2017. — Vol. 139. — Pp. 184–197. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.029.

10. *Zhmur V. N.* Ways to increase economic energy efficiency and environmental safety of sea freight / V. N. Zhmur, V. Ye. Leonov // American Scientific Journal. — 2018. — Vol. 19. — Pp. 15–21.

11. *Пилипенко А. Т.* Краткий справочник по химии / А. Т. Пилипенко, И. Т. Гороновский, Ю. П. Назаренко, Е.Ф. Некряч; под общ. ред. акад. АН УССР А. Т. Пилипенко. — Киев: Наукова думка, 1987. — 830 с.

REFERENCES

1. Leonov, V. E., and V. I. Dmitriev. *Puti povysheniya effektivnosti morskikh gruzoperevozok. Monografiya*. M.: MORKNIGA, 2019.

2. Leonov, V. E., and A. V. Khodakovskii. *Ekologiya i okhrana okruzhayushchei sredy. Uchebnoe posobie*. Edited by V.E. Leonov. Kherson: Izdatel'stvo KhGMA, 2016.

3. *MEPC 65/INF.17 IMO Model Course on Energy-Efficient Operation of Ships*. London: World Maritime University, 2013.

4. *Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency Operational indicator (EEOI)*. London: IMO, 2009.

5. Tran, T. A. "Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships." *Journal of Marine Science: Research & Development* 7.6 (2017): 243. DOI: 10.4172/2155-9910.1000243.

6. Pivovarov, L. A. "Razrabotka plana upravleniya energoeffektivnost'yu sudna (PUEES) dlya tankerov." *Sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye informatsionnye i innovatsionnye tekhnologii na transporte» – MINTT-2013*. Vol. 1. Kherson: ITs KhGMA, 2013. 73–77.

7. Laursen, Anders B. "Availability of elements for heterogeneous catalysis: Predicting the industrial viability of novel catalysts." *Chinese Journal of Catalysis* 39 (2018): 16–26. DOI: 10.1016/S1872-2067(17)62979-6.

8. Winnes, Hulda, Linda Styhre, and Erik Fridell. "Reducing GHG emissions from ships in port areas." *Research in Transportation Business & Management* 17 (2015): 73–82. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.008.

9. Rehmatulla, Nishatabbas, John Calleya, and Tristan Smith. "The implementation of technical energy efficiency and CO2 emission reduction measures in shipping." *Ocean Engineering* 139 (2017): 184–197. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.029.

10. Zhmur, V. N., and V. Ye. Leonov. "Ways to increase economic energy efficiency and environmental safety of sea freight." *American Scientific Journal* 19 (2018): 15–21.

11. Pilipenko, A. T., I. T. Goronovskii, Yu. P. Nazarenko, and E. F. Nekryach. *Kratkii spravochnik po khimii*. Edited by A.T. Pilipenko. K: Naukova dumka, 1987.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонов Валерий Евгеньевич —
доктор технических наук, профессор
Херсонская государственная морская академия
73000, Украина, Херсон, пр. Ушакова, 20
e-mail: *leonov_v_e@i.ua*

Гуров Анатолий Андреевич —
доцент, капитан дальнего плавания
Херсонская государственная морская академия
73000, Украина, Херсон, пр. Ушакова, 20
e-mail: *anatoliygurov7@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonov, Valeriy Ye. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Kherson State Maritime Academy
20 Ushakova Avenue, Kherson, 73000, Ukraine
e-mail: *leonov_v_e@i.ua*

Gurov, Anatolii A. —
Associate professor, sea captain
Kherson State Maritime Academy
20 Ushakova Avenue, Kherson, 73000, Ukraine
e-mail: *anatoliygurov7@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 30 октября 2019 г.
Received: October 30, 2019.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-591-605

HYBRID ELECTRICITY SYSTEMS OF VESSELS 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

Reduction of the resources consumption for generating the electric power, improving the parameters of a vessel electric network is one of the purposes of sea transport development. A direction of researches is hybridization of generation sources and the electric energy accumulation devices. The given concept is based on division or simultaneous use of several various energy sources, the choice and combination of which are intended for improving the power systems parameters. The overwhelming majority of modern sea-crafts use the systems of distribution of an alternating current. However, with introduction of power electronic converters into the power supply systems, the direct current networks with integration of sources and devices for accumulating electric energy, connected to a distributed DC bus, are increasingly being used in the fleet. This direction is one of the decisions for fuel consumption minimization, especially, for the vessels demanding high degree of maneuverability and various running cycles. The possibilities of a ship hybrid electric power system are defined in the paper. Comparison of various architectures of the given system is performed. The block diagram of the hybrid electric power system is considered. Formulas for calculating static load are given. The equations describing electromagnetic processes of the asynchronous electric motor as the propulsion electric motor are written down. The device for accumulating electric energy is considered. The calculation of the energy released by the propulsion electric motor during braking or reverse, which can be directed both to the braking resistor and stored in special systems of electric energy storage. The computer model of considered hybrid electric power installation on the basis of computer program SimInTech is made.

Keywords: propulsion electric installation, system with distributed DC bus, auxiliary fleet vessels, electric power storage devices, SimInTech.

For citation:
Romanovskiy, Victor V., Vladimir A. Malishev, and Artem S. Bezhik. "Hybrid electricity systems of vessels with dc-grid system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 591–605. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-591-605.

УДК 621.315:621.3.025

СУДОВЫЕ ГИБРИДНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ 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

Отмечается, что целью развития морского транспорта является сокращение потребления ресурсов, затрачиваемых на генерирование электроэнергии и улучшение параметров электрической сети. Направлением данного исследования является гибридизация источников генерирования и устройств накопления электрической энергии. Данная концепция основана на разделении или одновременном использовании нескольких различных источников энергии, выбор и комбинация которых предназначены для улучшения параметров энергетических систем. Подчеркивается, что подавляющее большинство современных морских судов используют системы распределения переменного тока. Однако с внедрением силовых

электронных преобразователей в энергосистемы сети постоянного тока с интеграцией источников и устройств накопления электрической энергии, подключенных к распределенной шине постоянного тока, все чаще находят применение на флоте. Отмечается, что данное направление является одним из решений для минимизации расхода топлива в особенности для судов, требующих высокой степени маневренности и разнообразных рабочих циклов. В статье определены возможности судовой гибридной электроэнергетической системы. Выполнено сравнение различных архитектур данной системы. Рассмотрена блок-схема гибридной электроэнергетической системы. Приведены формулы для расчета статической нагрузки. Записаны уравнения, описывающие электромагнитные процессы асинхронного электродвигателя в качестве гребного электродвигателя. Рассмотрено устройство накопления электрической энергии. Выполнен расчет энергии, выделяемой гребным электрическим двигателем при торможении или реверсе, которая может направляться как на тормозной резистор, так и запасаться в специальных системах накопления электрической энергии. Составлена компьютерная модель рассматриваемой гибридной электроэнергетической установки на базе компьютерной программы SimInTech. Сняты графики изменения напряжения на распределенной шине постоянного тока и токов гребного электрического двигателя в процессе изменения частоты вращения гребного винта.

Ключевые слова: гребная электрическая установка, система с распределенной шиной постоянного тока, суда вспомогательного флота, устройства накопления электроэнергии, SimInTech.

Для цитирования:
Романовский В. В. Судовые гибридные электроэнергетические системы 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. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 591–605. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-591-605.

Введение (Introduction)

Сокращение потребления ресурсов, затрачиваемых на генерирование электроэнергии и улучшение параметров электрической сети является одним из направлений развития морского транспорта [1]. Одно из решений при проектировании современных судов заключается в повышении эффективности и оптимальном управлении энергетической / движительной системами с целью уменьшения потребления топлива [2], [3]. Текущим направлением исследований является гибридизация источников генерирования и устройств накопления энергии (УНЭ) с целью обеспечения конкурентоспособной эксплуатации транспортных средств [4], [5].

Гибридные энергосистемы (ГЭС) становятся все более популярными и используются в качестве решений при производстве современных электроэнергетических систем [6]. Основные компоненты типичной ГЭС с распределенной шиной постоянного тока (РШПТ), как показано на рис. 1, включают в себя источники питания, преобразователи энергии, УНЭ и нагрузки. Ключевой особенностью ГЭС является то, что она включает несколько источников питания, которые могут дополнять друг друга с возможностью генерации электроэнергии для повышения общей эффективности системы.

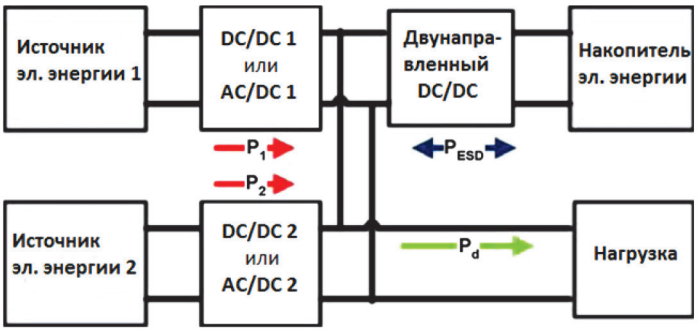


Рис. 1. Структура гибридной электроэнергетической системы

Подавляющее большинство современных морских судов используют системы распределения переменного тока, включая единые электроэнергетические системы (ЕЭЭС). Однако с внедре-

нием силовых электронных преобразователей в энергосистемы все чаще стали применяться на судах сети постоянного тока с интеграцией источников и устройств накопления электрической энергии, подключенных к РШПТ [7], [8]. Система распределения постоянного тока помогает сократить количество ступеней преобразования при применении источников и устройств постоянного тока. Однако при построении РШПТ сохраняются проблемы, связанные с необходимостью синхронизации блоков генерации, управлением потока реактивной мощности, пусковых токов трансформаторов, гармонических составляющих электрических параметров и трехфазных дисбалансов. Судовая система питания постоянного тока позволяет первичным движителям работать на своих оптимальных скоростях, обеспечивая значительную экономию топлива по сравнению с обычными системами переменного тока. Она также предлагает дополнительные преимущества, такие как экономия места и веса, а также гибкое расположение оборудования [9].

Целями данной статьи являются определение возможностей судовой гибридной электроэнергетической системы, рассмотрение способов расчета статической и динамической нагрузок, выполнение вычисления энергии, выделяемой гребным электрическим двигателем при торможении или реверсе, а также выполнение компьютерной модели на базе компьютерной программы SimInTech.

Методы и материалы (Methods and Materials)

ГЭС имеют перспективное значение, когда в процессе эксплуатации существуют большие колебания в потребляемой мощности. Требования проектирования систем данного типа могут существенно различаться для разных типов судов. При всех имеющихся в настоящее время вариантах гибридные силовые установки являются весьма перспективными технологиями для проектирования относительно малых судов и имеют следующие преимущества [10]:

– ГЭС обеспечивают лучшую энергоэффективность, значительное сокращение выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ, чем классические системы;

– гибридные системы являются модульными и обеспечивают резервирование мощности;

– применение электрических силовых установок (системы типа «Azipod», подруливающие устройства) позволяет улучшить маневренность при значительном снижении шума и вибраций;

– электрические силовые установки обеспечивают большую степень свободы с точки зрения планирования размещения оборудования и позволяют высвободить на борту судна доступное пространство;

– ГЭС позволяет снизить уровень вибрации, передаваемой на конструкцию судна;

– ГЭС дает возможность снизить требования к обслуживанию двигателей внутреннего сгорания вследствие оптимального режима эксплуатации.

Гибридизация силовых цепей основана на разделении или одновременном использовании нескольких различных источников энергии [11], выбор и комбинация которых предназначены для улучшения параметров энергетических систем. Данное направление является одним из решений для минимизации расхода топлива особенно для судов, требующих высокой степени маневренности и разнообразных рабочих циклов [12].

Существует три основных вида архитектуры гибридных силовых цепей.

1. *Последовательная гибридная архитектура.* В этом типе архитектуры ГЭС (рис. 2) последовательно используются два вида энергетических систем: двигатели внутреннего сгорания и электрические системы [13]. Движение осуществляется электрическим приводом с регулируемой частотой вращения (электродвигателем и силовым преобразователем). Электроэнергию вырабатывают генераторы, приводимые в движение двигателями внутреннего сгорания. Другой вариант заключается в использовании топливных элементов для выработки электроэнергии или их комбинации с генераторами. Системы накопления электроэнергии (СНЭ): батареи, специальные конденсаторы и другие устройства могут быть подключены к общей распределительной шине для обеспечения дополнительной электрической энергии, при этом их можно применять автономно или вместе с генераторами.

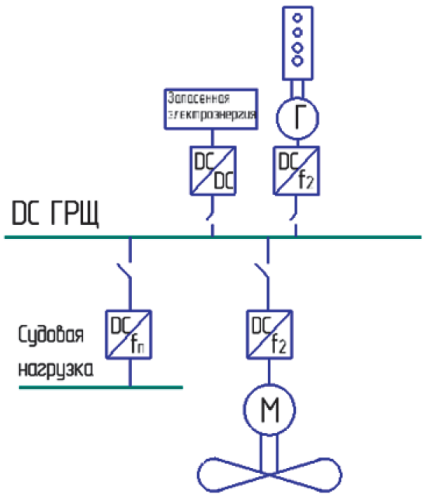


Рис. 2. Схема последовательного дизель-электрического гибрида с системой накопления электроэнергии

В такой конфигурации электричество используется как вектор энергии между двигателем внутреннего сгорания и гребным винтом, что позволяет разделить рабочие точки [14], что позволяет повысить общую эффективность системы за счет оптимизации рабочей точки двигателя внутреннего сгорания и гребного винта с точки зрения эффективности. Конечно, это преимущество могло быть более значительным при использовании нескольких генераторов и СНЭ, поскольку оно дает возможность обеспечить необходимую движительную мощность, выбирая оптимальную комбинацию источников электроэнергии и поддержание режимов первичных двигателей в оптимальной рабочей зоне. Однако для малых судов возможность увеличения количества источников электроэнергии связана с ограничениями по массогабаритным показателям.

2. *Параллельная гибридная архитектура.* Типичная параллельная гибридная силовая установка (рис. 3) сочетает в себе два вида силовых двигателей: электродвигатели и двигатели внутреннего сгорания, которые механически соединены одинаковыми валами через редукторы. Электродвигатели питаются от электрических СНЭ и / или независимых источников энергии (например, генераторов, приводимых в движение двигателями внутреннего сгорания и / или топливными элементами). Две двигательные установки могут использоваться вместе или по отдельности [15].

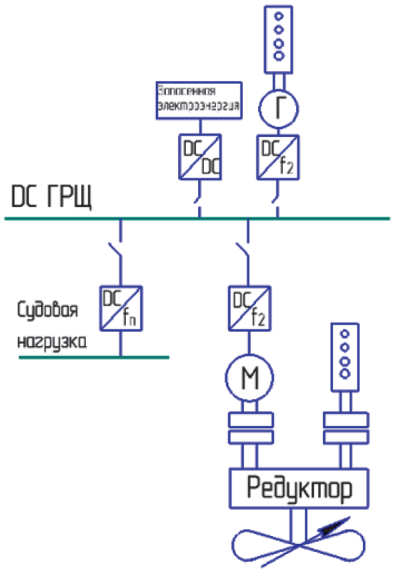


Рис. 3. Схема параллельного электромеханического гибрида с системой накопления электроэнергии

В большинстве случаев одна из движительных систем предназначена для использования на низких скоростях (классически электрическая система), а другая (классический двигатель внутреннего сгорания) применяется для высоких скоростей. Первая система может также использоваться в качестве системы повышения мощности во время переходного процесса (запуск, ускорение и другие). Эта архитектура уменьшает количество элементов по сравнению с последовательной гибридизацией и позволяет оптимизировать размеры каждого из источников энергии [16].

3. *Последовательно-параллельная гибридная архитектура.* Последовательно-параллельная архитектура объединяет обе концепции, определенные ранее. Она позволяет перейти от операции параллельного типа к операции последовательного типа. В таблице выполнено сравнение последовательной и параллельной архитектуры гибридизации с точки зрения стоимости, взаимозаменяемости и эффективности.

Характеристики гибридных электроэнергетических систем

Характеристики	Последовательная	Параллельная
Размеры элементов	Для полной эффективности система должна объединять несколько источников питания с номинальной мощностью, равной долей общей мощности. Это приводит к дополнительным затратам на объемы и вес. Размеры электродвигателей соответствуют пиковой мощности.	Система позволяет оптимизировать размеры каждой движительной установки. Размеры электродвигателя уменьшены. Дополнительные расходы и объем связаны со сложной механической системой (сцепления, коробки передач).
Мощность и эффективность	Эффективность ограничена количеством последовательно соединенных систем (движитель, генератор, трансформатор, преобразователи, двигатели и т. д.). Система позволяет точно контролировать и постепенно изменять частоту вращения гребного винта. Если используется несколько источников электроэнергии, двигатели внутреннего сгорания могут работать с максимальной эффективностью.	Хорошая эффективность, связанная с уменьшенным количеством последовательно соединенных компонентов (особенно с двигателями внутреннего сгорания). Точный контроль и постепенное изменение частоты вращения винта. Двигатель внутреннего сгорания работает с максимальной эффективностью.
Резервирование / надежность	Система является модульной и предлагает резервирование источников питания.	Очень высокий уровень резервирования, поскольку мощность движителя может обеспечиваться двумя независимыми системами. Сложная механическая система, которая может явиться причиной отказа.

Главная нагрузка на ГЭУ с РШПТ, блок-схема которой приведена на рис. 4, связана с системой электродвижения, включающей DC/AC-преобразователь и гребной электродвигатель. Такие системы демонстрируют постоянный характер нагрузки, поскольку способны потреблять такую же суммарную мощность при различных величинах напряжения [17]. Данное явление вызвано электромеханическим модулятором, который корректирует время переключения в зависимости от нагрузки.

Для того, чтобы математически описать постоянную нагрузку (ПН), может быть использован контролируемый источник напряжения, где требуемый электрический ток находится в результате деления заданной мощности на реальное *DC*-напряжение, как показано в следующем уравнении:

$$I_{\text{нагр}} = \frac{P_{\text{зад}}}{U}. \quad (1)$$

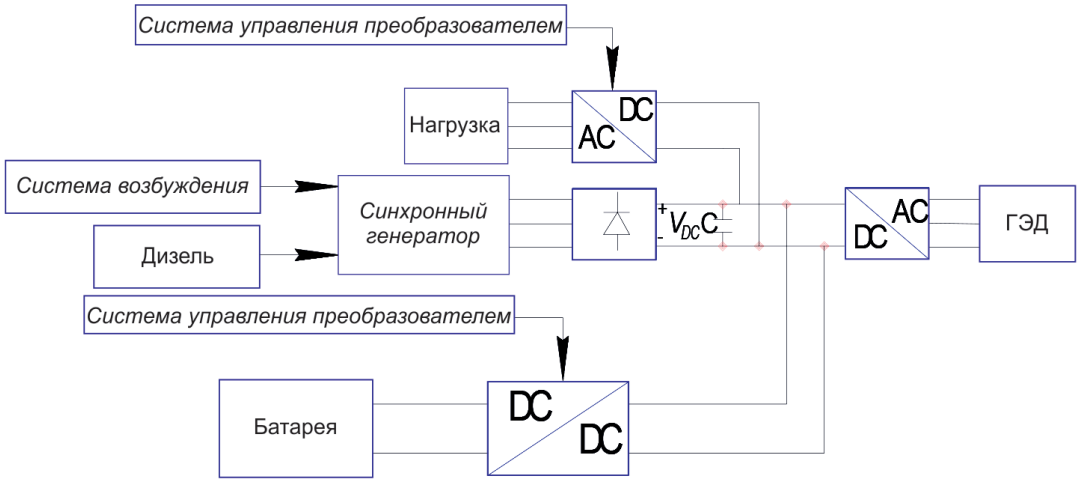


Рис. 4. Блок-схема рассматриваемой ГЭУ с РШПТ

Линеаризованное выражение постоянной нагрузки находится из уравнения [18]:

$$i = -\frac{P_{\text{зад}}}{U^2} + 2\frac{P}{U}. \tag{2}$$

В данной рабочей точке постоянная нагрузка может быть представлена отрицательной параллелью сопротивления с постоянной мощностью, приведенными в уравнениях (3) и (4). Отрицательное приращение сопротивления имеет эффект дестабилизации на автоматическую систему и известно как отрицательный неустойчивый импеданс [19]:

$$R_{\text{ПН}} = -\frac{U^2}{P}; \tag{3}$$

$$I_{\text{ПН}} = 2\frac{P}{U}. \tag{4}$$

В качестве динамической нагрузки необходимо применение асинхронного двигателя (АД), имеющего *Т*-образную схему замещения, представленную на рис. 5, который определяется следующими векторами состояний [20]:

$\overrightarrow{\psi_S}$ — вектор потокосцепления статора;

$\overrightarrow{\psi_R}$ — вектор потокосцепления ротора;

$\overrightarrow{\psi_m}$ — вектор потокосцепления в воздушном зазоре;

$\overrightarrow{U_S}$ — вектор напряжения статора;

$\overrightarrow{I_S}$ — вектор тока статора;

$\overrightarrow{I_R}$ — вектор тока ротора;

$\overrightarrow{I_m}$ — вектор тока намагничивания.

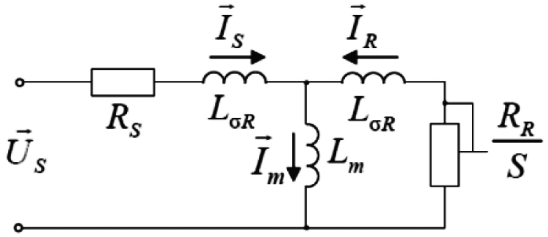


Рис. 5. Т-образная схема замещения АД

На рис. 6 приведена векторная диаграмма, демонстрирующая взаимосвязь векторов состояний асинхронного двигателя, которые совершают вращения в поперечном сечении вокруг оси ротора. В установившемся режиме максимальные значения, фазовые сдвиги и частоты вращения всех векторов состояний остаются постоянными. В динамике во время переходных процессов данные значения изменяются [21].

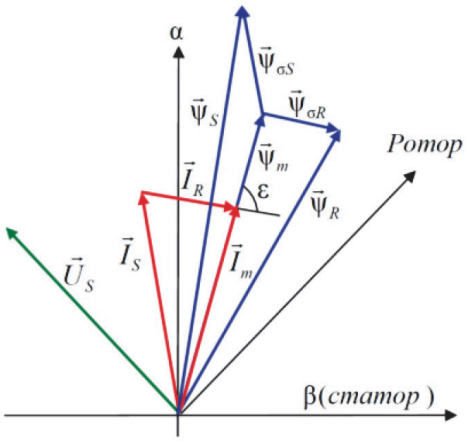


Рис. 6. Векторная диаграмма

Зачастую системы векторного регулирования АД строятся во вращающейся системе координат *dq*, ось *d* которой ориентирована по потоку ротора [22]. Для данной системы характерно следующее:

– проекция потока ротора на ось *q* имеет значение, равное нулю ($\psi_{Rq} = 0$);

– имеет вращение со скоростью поля ω_e;

– скорость поля (ω_e) и скорость ротора (ω_R) связаны следующим соотношением:

$$\Delta\omega = \omega_e - Z_p\omega_R.$$

где $\Delta\omega$ — скорость скольжения; Z_p — число пар полюсов двигателя.

Учитывая ранее изложенное, можно записать уравнения, описывающие электромагнитные процессы рассматриваемого АД в системе *dq* [23]:

$$\begin{cases} pI_{sd} = \dfrac{1}{L_S - L_m K_R}(U_{sd} - I_{sd}R_s - K_R p\psi_R) + \omega_e I_{sq}; \\ pI_{sq} = \dfrac{1}{L_S - L_m K_R}(U_{sq} - I_{sq}R_s - K_R\omega_e\psi_R) - \omega_e I_{sd}; \\ p\psi_R = \dfrac{1}{T_R}(L_m I_{sd} - \psi_R); \\ \omega_e = Z_p\omega_R + \dfrac{L_m}{\psi_R T_R} I_{sq}; \\ M_{em} = \dfrac{3Z_p K_R}{2}\psi_R I_{sq}. \end{cases} \quad (5)$$

В качестве дополнительного источника электрической энергии и системы, улучшающей качество электрической сети, на таких судах применяется УНЭ, которое состоит из *DC-DC* преобразователя, а также аккумуляторов. В данном устройстве используется метод изменения направления протекания электрической энергии, направленный на улучшение выходного напряжения, которое фильтруется и имеет постоянное выходное значение благодаря параллельно подключенным конденсаторам [24]. Из-за их высокой эффективности и способности обеспечивать повышающий, понижающий или инверторный выход переключающие регуляторы являются более предпочтительными, чем линейные регуляторы, при разработке преобразователей.

В переключающих цепях полупроводниковые переключатели вносят значительный вклад в быстродействие управления динамической передачей мощности от входа к выходу. При разработке импульсных регуляторов требованием является постоянное выходное напряжение с минимальным потреблением переменного электрического тока. Наиболее широко используемым методом управления выходным напряжением является широтно-импульсная модуляция (ШИМ), которая помогает поддерживать постоянную частоту переключения и изменяет рабочий цикл [25].

Схема для понижающего / повышающего преобразователя, способного генерировать выходное напряжение постоянного тока большего или меньшего значения в сравнении с входным, показана на рис. 7. Когда транзистор Q_1 включен, входное напряжение подается на катушку индуктивности, и ток в катушке L линейно возрастает. Во время второго интервала, когда транзистор отключен, напряжение на катушке индуктивности меняется на полярность, тем самым электрическая энергия начинает течь через диод. В течение этого интервала энергия, запасенная в катушке индуктивности, питает нагрузку и перезаряжает конденсатор. График изменения напряжения и тока показан на рис. 8.

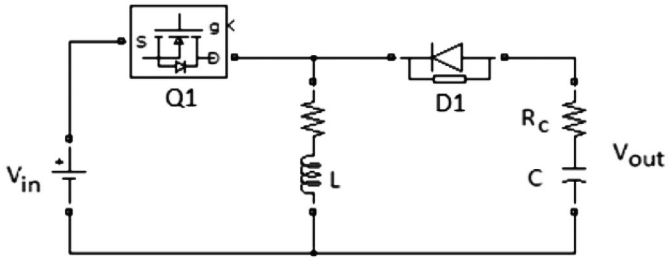


Рис. 7. Повышающий/понижающий DC-DC преобразователь

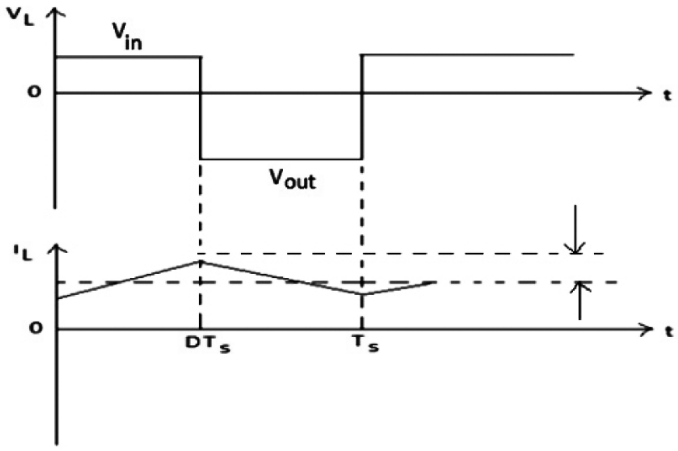


Рис. 8. График изменения напряжения и тока в повышающем / понижающем преобразователе

Применение принципа баланса напряжения в индуктивности для определения уравнения выходного напряжения в установившемся режиме дает [26]:

$$U_{in}T_{on} + U_{out}T_{off} = 0; \tag{6}$$

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = -\frac{D}{1-D}. \tag{7}$$

где U_{in} — входное напряжение; U_{out} — выходное напряжение; T_{on} — время включения; T_{off} — время выключения; D — рабочий цикл.

Поскольку рабочий цикл D может варьировать от 0 до 1, выходное напряжение может быть ниже или выше входного напряжения по величине, но противоположно по полярности. Для преобразователей частоты с неуправляемым выпрямителем на входе при рассмотрении вопроса торможения и реверса судна с гибридной электроэнергетической системой нужно учитывать, что энергия, возвращаемая в сеть двигателем, может гаситься как на тормозном резисторе [27], так и передаваться на УНЭ. Выполним расчет электрической энергии, выделяемой при известных параметрах ГЭД танкера СПГ «SCF Великий Новгород», имеющего следующие параметры:

– приведенный момент инерции $J = 19000$ кг · м^2;

– масса ротора — 47500 кг;

– частота вращения номинальная $n = 104$ об/мин;

– момент вращения $M_{ном} = 577$ кН · м.

Определим значение энергии торможения при условии изменения частоты вращения от 120 об/мин (n_{max}) до 58 об/мин и того, что часть энергии поглощается конденсатором при его заряде.

Значение кинетической энергии на валу гребного двигателя [28], [29]:

$$W = \frac{J\omega^2}{2}. \tag{8}$$

Значение энергии заряженного конденсатора

$$W = \frac{CU^2}{2}. \tag{9}$$

Изменение энергии системы, при ее переходе со 120 об/мин на 58 об/мин, будет составлять

$$\Delta W_M = J\left(\frac{\omega_1^2}{2} - \frac{\omega_2^2}{2}\right). \tag{10}$$

Изменение энергии на конденсаторе

$$\Delta W_C = C\left(\frac{U_1^2}{2} - \frac{U_2^2}{2}\right). \tag{11}$$

Изменение энергии системы при переводе в рад/с:

$$\Delta W_M = 19000\left(\frac{145}{2} - \frac{36{,}85}{2}\right) = 1{,}027 \text{ МДж}.$$

Определим значение энергии, которая пойдет на заряд конденсаторной батареи. В схеме ПЧ используется два конденсатора, каждый емкостью по 1,6 мФ. Напряжение на конденсаторе при $n = 120$ об/мин равно 3000В, предельное напряжение на конденсаторе должно быть не более 10 % от номинального 3300В и, следовательно,

$$\Delta W_C = 0{,}0032\left(\frac{10890000}{2} - \frac{9000000}{2}\right) = 3024 \text{ Дж}.$$

Значение энергии, идущей на нагрев резистора или направляемой в УНЭ:

$$\Delta W_M - \Delta W_C = W; \tag{12}$$

$$W = 1027000 - 3024 = 1023976 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$W = 51{,}2 \text{ кВт за 20 с}.$$

Учитывая ранее изложенное, ГЭУ с РШПТ была смоделирована на рис. 9 с использованием основных положений компьютерной программы SimInTech [30].

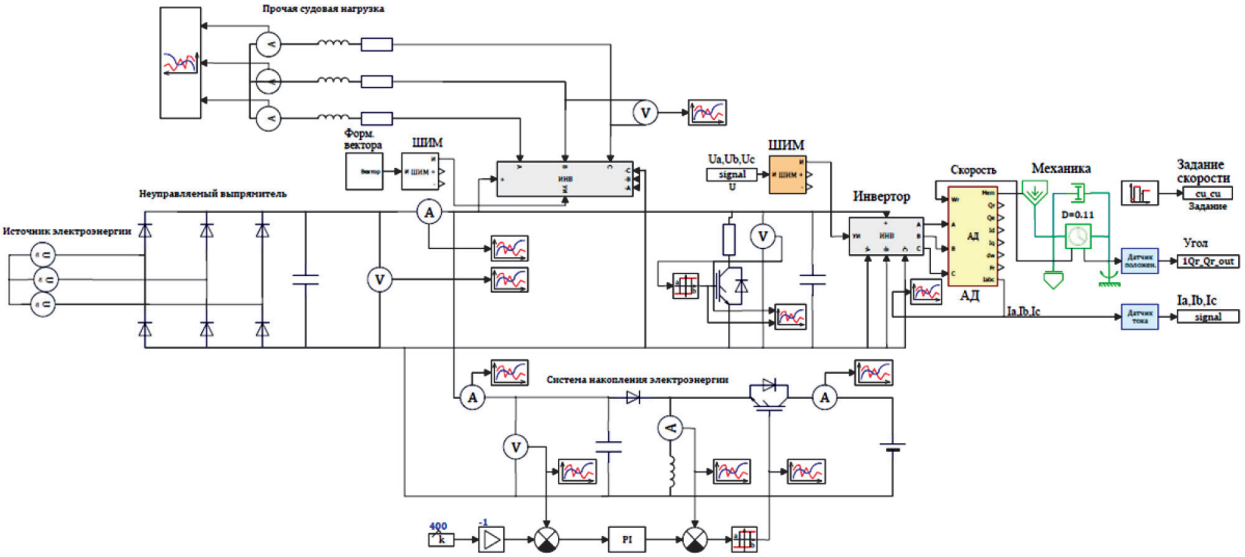


Рис. 9. SimInTech — модель гибридной ГЭУ с РШПТ

Данная компьютерная модель состоит из следующих блоков:

– источник электроэнергии;

– неуправляемый выпрямитель;

– инвертор;

– ГЭД;

– система накопления электроэнергии;

– прочая судовая нагрузка.

В процессе выполнения моделирования гибридной ГЭУ с РШПТ в программе SimInTech (серийный номер D63B30FDA70) задавались различные значения частоты вращения ГЭД.

На рис. 10 дан график изменения значения напряжения на РШПТ в зависимости от величины потребляемого ГЭУ электрического тока, приведенного на рис. 11, с поэтапным увеличением оборотов и последующим реверсом.

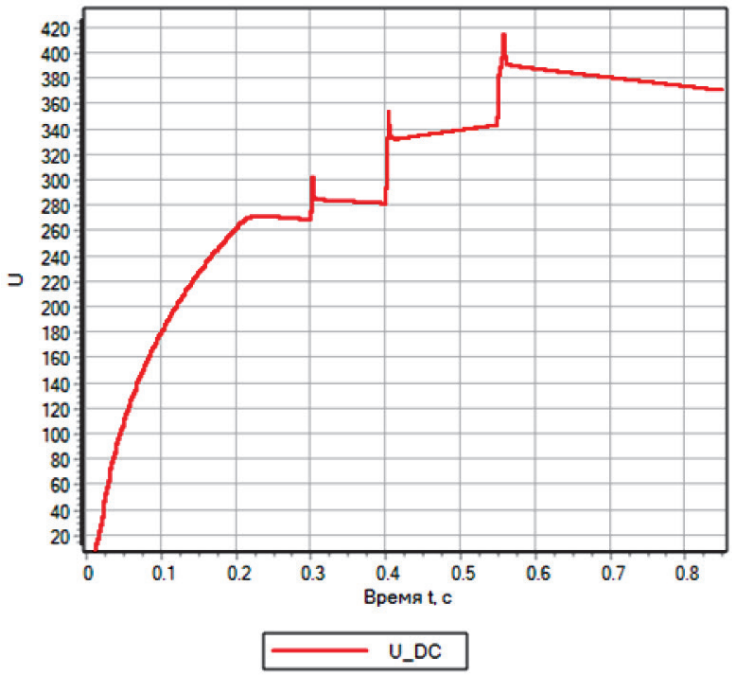


Рис. 10. График изменения напряжения на РШПТ

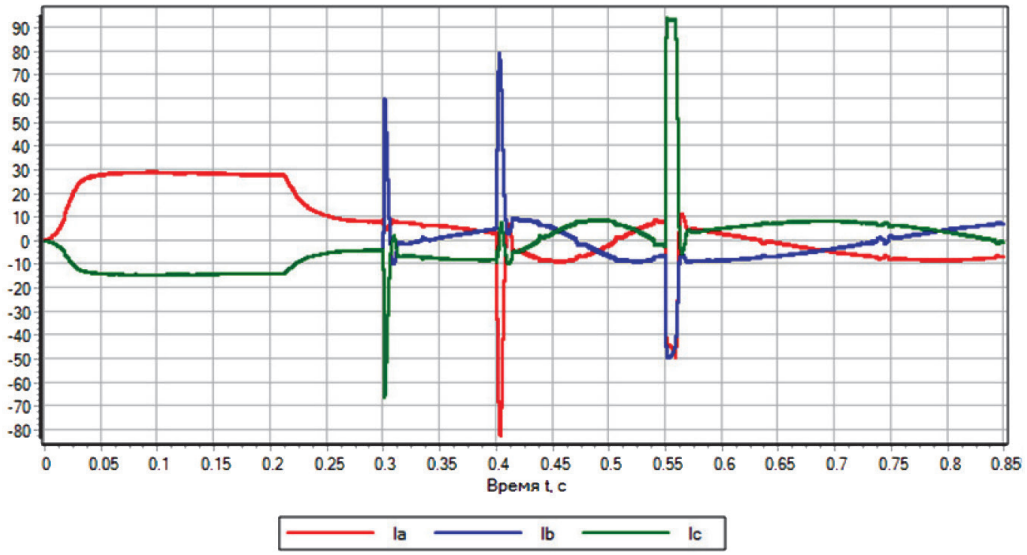


Рис. 11. График изменения токов ГЭД

Как видно из графиков, приведенных на рис. 10 и 11, в процессе изменения нагрузки качество электрической энергии сети удовлетворяет установленным требованиям.

Заключение (Conclusion)

В статье рассмотрены преимущества системы постоянного тока по сравнению с системой переменного тока, к которым относятся: простота интеграции источников питания постоянного тока, экономия пространства, снижение расхода топлива и др. Несмотря на наличие указанных преимуществ, новая технология имеет проблемы, требующие разрешения. Очевидно, что для некоторых типов судов с характерными эксплуатационными профилями системы постоянного тока не будут в ближайшее время оптимальным решением. Переход от системы распределения переменного тока к постоянному току будет происходить постепенно через гибридные решения, которые будут одновременно содержать основную шину переменного тока и основную шину постоянного тока, каждая из которых имеет соответствующий тип нагрузки. Применение устройств накопления электроэнергии позволит улучшить качество электрической сети и при достаточном уровне автоматизации производить отбор мощности от ГЭД в процессе торможения и реверса, тем самым снижая расход топлива в динамических режимах. Кроме того, гибридизация судов дает возможность отказаться от трансформаторов, входящих в систему электродвижения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hmam S.* Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain: Application on the first quick charge plug-in ferry / S. Hmam, J. C. Olivier, S. Bourguet, L. Loron // Applied Energy. — 2015. — Vol. 153. — Pp. 3–14. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.054.

2. *Dedes E. K.* Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping / E. K. Dedes, D. A. Hudson, S. R. Turnock // Energy policy. — 2012. — Vol. 40. — Pp. 204–218. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.046.

3. *Stevens L.* Is new emission legislation stimulating the implementation of sustainable and energy-efficient maritime technologies? / L. Stevens, C. Sys, T. Vanelslander, E. Van Hassel // Research in transportation business & management. — 2015. — Vol. 17. — Pp. 14–25. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.003.

4. *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: мат. науч.-практ. конф. 31 марта 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015 — С. 211–215.

5. *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.

6. *Zahedi B.* Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems / B. Zahedi, L. E. Norum, K. B. Ludvigsen // Journal of Power Sources. — 2014. — Vol. 255. — Pp. 341–354. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.031.

7. *Doerry N.* History and the status of electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends in the US Navy / N. Doerry, J. Amy, C. Krolick // Proceedings of the IEEE. — 2015. — Vol. 103. — Is. 12. — Pp. 2243–2251. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2494159.

8. *Doerry N.* Naval power systems: Integrated power systems for the continuity of the electrical power supply / N. Doerry // IEEE Electrification Magazine. — 2015. — Vol. 3. — Is. 2. — Pp. 12–21. DOI: 10.1109/MELE.2015.2413434.

9. *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.

10. *Lan H.* Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system / H. Lan, S. Wen, Y. Y. Hong, C. Y. David, L. Zhang // Applied energy. — 2015. — Vol. 158. — Pp. 26–34. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.031/

11. *Liu H.* Estimation of PV output power in moving and rocking hybrid energy marine ships / H. Liu, Q. Zhang, X. Qi, Y. Han, F. Lu // Applied Energy. — 2017. — Vol. 204. — Pp. 362–372. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.014.

12. *Григорьев А. В.* Исследование дизель-генератора, работающего с переменной частотой вращения, на компьютерной модели / А. В. Григорьев // Электросистемы. — 2006. — № 2 (14). — С. 17–19.

13. *Chan C. C.* Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling / C. C. Chan, A. Bouscayrol, K. Chen // IEEE transactions on vehicular technology. — 2009. — Vol. 59. — Is. 2. — Pp. 589–598. DOI: 10.1109/TVT.2009.2033605.

14. *Chen J. S.* Energy efficiency comparison between hydraulic hybrid and hybrid electric vehicles / J. S. Chen // Energies. — 2015. — Vol. 8. — Is. 6. — Pp. 4697–4723. DOI: 10.3390/en8064697.

15. *Wang E.* System design and energetic characterization of a four-wheel-driven series–parallel hybrid electric powertrain for heavy-duty applications / E. Wang, D. Guo, F. Yang // Energy Conversion and Management. — 2015. — Vol. 106. — Pp. 1264–1275. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.10.056.

16. *Hebner R. E.* Electric ship power system-research at the University of Texas at Austin / R. E. Hebner // IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2005. — IEEE, 2005. — Pp. 34–38. DOI: 10.1109/ESTS.2005.1524649.

17. *Романовский В. В.* Анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока / В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик // Вестник Государствен-ного 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.

18. *Rahimi A. M.* Active damping in DC/DC power electronic converters: A novel method to overcome the problems of constant power loads / A. M. Rahimi, A. Emadi // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2009. — Vol. 56. — Is. 5. — Pp. 1428–1439. DOI: 10.1109/TIE.2009.2013748.

19. *Emadi A.* Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives / A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta, G. A. Williamson // IEEE Transactions on vehicular technology. — 2006. — Vol. 55. — Is. 4. — Pp. 1112–1125. DOI: 10.1109/TVT.2006.877483.

20. *Денисов В. А.* Сравнительный анализ переходных процессов в асинхронном двигателе / В. А. Денисов, М. Н. Третьякова, О. А. Бородин // Электротехника. — 2018. — № 3. — С. 2–7.

21. *Kopyrin V. A.* Simulation Modeling of the Submersible Asynchronous Motor'Soperation Modes / V. A. Kopyrin, O. V. Smirnov, M. V. Deneko // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). — IEEE, 2018. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602539.

22. *Guo Z.* The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss / Z. Guo, Q. Zhang //Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 1060. — Is. 1. — Pp. 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/1060/1/012085.

23. *Shestakov A.V.* Modeling and Experimental Analysis of Dynamic Characteristics of Asynchronous Motor / A.V. Shestakov // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). — IEEE, 2019. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743061.

24. *Dung N. A.* A novel low-loss control strategy for bidirectional DC–DC converter / N. A. Dung, P. P. Hieu, Y. C. Hsieh, J. Y. Lin, Y. C. Liu, H. J. Chiu // International Journal of Circuit Theory and Applications. — 2017. — Vol. 45. — Is. 11. — Pp. 1801–1813. DOI: 10.1002/cta.2373.

25. *Wu H.* High step-up/step-down soft-switching bidirectional DC–DC converter with coupled-inductor and voltage matching control for energy storage systems / H. Wu, K. Sun, L. Chen, L. Zhu, Y. Xing // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2016. — Vol. 63. — Is. 5. — Pp. 2892–2903. DOI: 10.1109/TIE.2016.2517063.

26. *Geng Z.* Modularized High Power Density Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter for EV Battery Management / Z. Geng, D. Gu, T. Hong, K. Qi, K. Zhang, J. Ambrosio // 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). — IEEE, 2018. — Pp. 164–167. DOI: 10.1109/ITEC.2018.8450230.

27. *Малышев В. А.* Расчет и выбор тормозных резисторов гребной электрической установки танкера ледового класса / В. А. Малышев, В. С. Иванов, В. С. Соловей // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 172–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184.

28. *Хорошенький А. В.* Торможение судна с винторулевыми колонками / А. В. Хорошенький // Материалы VII Межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции развития водного транспорта России». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 202–205.

29. *Андронников Д.* Особенности выбора и применения резисторов в силовой технике / Д. Андронников // Силовая электроника. — 2007. — № 12. — С. 4–8.

30. *Калачев Ю. Н.* SimInTech: моделирование в электроприводе / Ю. Н. Калачев. — ДМК Пресс, 2019. — 98 с.

REFERENCES

1. Hmam, Sadok, J. C. Olivier, S. Bourguet, and L. Loron. “Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain: Application on the first quick charge plug-in ferry.” *Applied Energy* 153 (2015): 3–14. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.054.

2. Dedes, Eleftherios K., Dominic A. Hudson, and Stephen R. Turnock. “Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping.” *Energy policy* 40 (2012): 204–218. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.046.

3. Stevens, Laurence, C. Sys, T. Vanelslander, and E. Van Hassel. “Is new emission legislation stimulating the implementation of sustainable and energy-efficient maritime technologies?.” *Research in transportation business & management* 17 (2015): 14-25. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.003.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Doerry, Norbert, John Amy, and Cy Krolick. “History and the status of electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends in the US Navy.” *Proceedings of the IEEE* 103.12 (2015): 2243–2251. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2494159.

8. Doerry, Norbert. “Naval power systems: Integrated power systems for the continuity of the electrical power supply.” *IEEE Electrification Magazine* 3.2 (2015): 12–21. DOI: 10.1109/MELE.2015.2413434.

9. 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.

10. Lan, Hai, S. Wen, Y. Y. Hong, C. Y. David, and L. Zhang. “Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system.” *Applied energy* 158 (2015): 26–34. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.031.

11. Liu, Hongda, Q. Zhang, X. Qi, Y. Han, and F. Lu. “Estimation of PV output power in moving and rocking hybrid energy marine ships.” *Applied Energy* 204 (2017): 362–372. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.014.

12. Grigor'ev, A.V. "Issledovanie dizel'-generatora, rabotayushchego s peremennoi chastotoi vrashcheniya, na komp'yuternoi modeli." *Elektrosistemy* 2(14) (2006): 17–19.

13. Chan, Ching Chuen, Alain Bouscayrol, and Keyu Chen. "Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling." *IEEE transactions on vehicular technology* 59.2 (2009): 589–598. DOI: 10.1109/TVT.2009.2033605.

14. Chen, Jia-Shiun. "Energy efficiency comparison between hydraulic hybrid and hybrid electric vehicles." *Energies* 8.6 (2015): 4697–4723. DOI: 10.3390/en8064697.

15. Wang, Enhua, Di Guo, and Fuyuan Yang. "System design and energetic characterization of a four-wheel-driven series–parallel hybrid electric powertrain for heavy-duty applications." *Energy Conversion and Management* 106 (2015): 1264–1275. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.10.056.

16. Hebner, Robert E. "Electric ship power system-research at the University of Texas at Austin." *IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2005*. IEEE, 2005. 34–38. DOI: 10.1109/ESTS.2005.1524649.

17. 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.

18. Rahimi, Amir M., and Ali Emadi. "Active damping in DC/DC power electronic converters: A novel method to overcome the problems of constant power loads." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56.5 (2009): 1428–1439. DOI: 10.1109/TIE.2009.2013748.

19. Emadi, Ali, A. Khaligh, C. H. Rivetta, and G. A. Williamson. "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives." *IEEE Transactions on vehicular technology* 55.4 (2006): 1112–1125. DOI: 10.1109/TVT.2006.877483.

20. Denisov, V. A., M. N. Tret'yakova, and O. A. Borodin. "A Comparative Analysis of Transient Processes in an Asynchronous Motor." *Russian Electrical Engineering* 89.3 (2018): 137–142. DOI: 10.3103/S1068371218030070.

21. Kopyrin, Vladimir A., Oleg V. Smirnov, and Marina V. Deneko. "Simulation Modeling of the Submersible Asynchronous Motor'Soperation Modes." *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. IEEE, 2018. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602539.

22. Guo, Zhen, and Qing-wei Zhang. "The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1060. No. 1. IOP Publishing, 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1060/1/012085.

23. Shestakov, Alexander V. "Modeling and Experimental Analysis of Dynamic Characteristics of Asynchronous Motor." *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743061.

24. Dung, Nguyen Anh, P. P. Hieu, Y. C. Hsieh, J. Y. Lin, Y. C. Liu, and H. J. Chiu. "A novel low-loss control strategy for bidirectional DC–DC converter." *International Journal of Circuit Theory and Applications* 45.11 (2017): 1801–1813. DOI: 10.1002/cta.2373.

25. Wu, Hongfei, K. Sun, L. Chen, L. Zhu, and Y. Xing. "High step-up/step-down soft-switching bidirectional DC–DC converter with coupled-inductor and voltage matching control for energy storage systems." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63.5 (2016): 2892–2903. DOI: 10.1109/TIE.2016.2517063.

26. Geng, Zhi, D. Gu, T. Hong, K. Qi, K. Zhang, and J. Ambrosio. "Modularized High Power Density Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter for EV Battery Management." *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. IEEE, 2018. 164–167. DOI: 10.1109/ITEC.2018.8450230.

27. Malyshev, Vladimir Alekseevich, Vladimir Sergeevich Ivanov, and Valery Sergeevich Solovey. "Calculation and selection of brake resistors, electric propeller the installation of the tanker." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 172–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184.

28. Horoshenkij, A. V. "Tormozhenie sudna s vinto-rulevymi kolonkami." *Materialy VII mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoj konferencii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendencii razvitiya vodnogo transporta Rossii».* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016. 202–205.

39. Andronnikov, D. "Osobennosti vybora i primeneniya rezistorov v silovoj tekhnike." *Silovaya elektronika* 2 (2007): 4–8.

30. Kalachev, Yu.N. *SimInTech: modelirovanie v elektroprivode*. DMK Press, 2019.

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*

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*

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*

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 18 марта 2020 г.
Received: March 18, 2020.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-606-618

CONTROL OF A REACTIVE ELECTRIC MOTOR WHEN FEEDING THE WINDINGS WITH A SINUSOIDAL CURRENT

V. F. Samoseiko, E. V. Shiryaev

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

Vector control of the electromagnetic moment of a reactive machine is considered. The control task is to eliminate pulsations of the electromagnetic moment. It can be shown that to achieve this goal, sinusoidal currents must flow through the windings, whose inductance must pulse according to the sinusoidal law. It is shown that when sinusoidal currents flow through the phase windings, the voltage of the main and third harmonics occurs on them. At the same time, in a three-phase machine whose phase windings are connected to a star, the third harmonic disappears as part of the line voltage. In this case, a standard frequency converter can be used to synthesize the voltages applied to the stator windings using pulse-width modulation, which makes it easier and cheaper to practically control the reactive electric machine with concentrated phase windings.

The ratio of size of the stator and rotor teeth, at which the coefficient of non-sinusoidal pulsations of the phase windings inductances during the rotor rotation will be minimal, is found. Electromagnetic processes in the reactive machine are described by the linear differential equations with periodic coefficients. Lyapunov transformations for differential stress equations, which allow converting the initial equations with periodic coefficients into stress equations with constant coefficients, are found. The resulting Lyapunov equations are the basis for the synthesis of a system for controlling the dynamics of electromagnetic processes, which allows sinusoidal currents to flow through the phase windings of the machine. The control system of the reactive electric machine is represented by a structural diagram. An algorithm for controlling the electromagnetic moment of the reactive machine with a constant magnetization current is considered. The use of this algorithm allows to obtain the maximum performance of the management. A virtual scattering loop is also used to increase the speed of load current regulation. Simulation of electromechanical processes at the reactive electric machine control is carried out.

Keywords: vector control, switched reluctance motor, alternating sinusoidal current, Lyapunov transformation.

For citation:
Samoseiko, Veniamin F., and Eduard V. Shiryaev. "Control of a reactive electric motor when feeding the windings with a sinusoidal current." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.3 (2020): 606–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-606-618.

УДК 621.3.072.6

УПРАВЛЕНИЕ РЕАКТИВНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДВИГАТЕЛЕМ ПРИ ПИТАНИИ ОБМОТОК СИНУСОИДАЛЬНЫМ ТОКОМ

В. Ф. Самосейко, Э. В. Ширяев

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

Рассматривается векторное управление электромагнитным моментом реактивной машины, целью которого является устранение пульсаций электромагнитного момента. Для этого по фазным сосредоточенным обмоткам машины должны протекать синусоидальные токи, а их индуктивности пульсировать по синусоидальному закону. В работе показано, что при протекании синусоидальных токов по фазным обмоткам на них возникает напряжение основной и третьей гармоники. При этом в трехфазной машине, фазные обмотки которой соединены в звезду, в составе линейных напряжений третья гармоника исчезает. В этом случае для синтеза напряжений, подводимых к обмоткам статора методом широтно-импульсной модуляции, может быть использован стандартный преобразователь частоты, что позволяет упростить и удешевить практическую реализацию управления реактивной электрической машиной с сосредоточенными фазными обмотками. Определены соотношения размеров зубцов статора и ротора, при выполнении

которых коэффициент несинусоидальных пульсаций индуктивностей фазных обмоток при вращении ротора будет минимальным. Электромагнитные процессы в реактивной машине описаны линейными дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами. Найдены преобразования Ляпунова для дифференциальных уравнений напряжений, позволяющие преобразовать исходные уравнения с периодическими коэффициентами в уравнения напряжений с постоянными коэффициентами. Полученные уравнения Ляпунова положены в основу синтеза системы управления динамикой электромагнитных процессов, позволяющей обеспечить протекание синусоидальных токов по фазным обмоткам машины. Система управления реактивной электрической машиной представлена структурной схемой. Рассмотрен алгоритм управления электромагнитным моментом реактивной машины с постоянным током намагничивания. применение которого позволяет получить максимальное быстродействие управления. Для увеличения быстродействия и робастности управления также используется контур виртуальной диссипации. Выполнено моделирование электромеханических процессов при управлении реактивной электрической машиной.

Ключевые слова: векторное управление, реактивная электрическая машина, синусоидальный ток, преобразование Ляпунова.

Для цитирования:
Самосейко В. Ф. Управление реактивным электрическим двигателем при питании обмоток синусоидальным током / В. Ф. Самосейко, Э. В. Ширяев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 606–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-606-618.

Введение (Introduction)

Реактивные электрические машины (РЭМ), магнитопровод которых имеет зубчатую конструкцию статора и ротора, обладают свойствами, принципиально отличающими их от других электрических машин. Это отличие обусловлено отсутствием взаимных индуктивностей между фазными обмотками. Число зубцов статора Z_1 и ротора Z_2 всегда четное. Отношение $\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{n}{m}$ образует несократимую дробь, где m — целое число, называемое *числом фаз статора*; n — число пар зубцов ротора на полюсное деление статора, называемое также *коэффициентом электрической редукции*. Число зубцов статора и ротора определяются также соотношениями $Z_1 = 2mp$; $Z_2 = 2np$. Наибольший общий делитель числа зубцов ротора и статора является числом полюсов $2p$, где p — число пар полюсов.

Пример поперечного разреза магнитной системы такой машины приведен на рис. 1. Необходимым условием функционирования РЭМ являются пульсации индуктивностей обмоток статора. На рисунке показано положение ротора, в котором индуктивность обмотки A, образованной двумя катушками, максимальна, обозначается L_d и называется *продольной*. При повороте ротора на 45 геометрических градусов индуктивность обмотки A будет минимальной. В этом случае она обозначается буквой L_q и называется *поперечной*. Очевидно, что индуктивности фазных обмоток A, B, C при вращении ротора пульсируют.

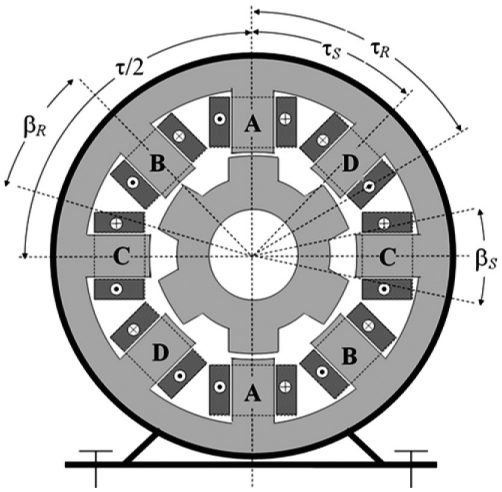


Рис. 1. Пример поперечного разреза магнитной системы реактивной машины ($Z_1 = 6$, $Z_2 = 4$, $m = 3$, $n = 2$, $p = 1$)

Сосредоточенные фазные обмотки реактивных электрических машин имеют короткие лобовые части. Это обеспечивает их преимущество перед другими электрическими машинами, а именно: низкие электрические потери мощности, высокую надежность и технологичность изготовления. Отсутствие магнитных связей между фазными обмотками позволяет алгоритмически исключить отказавшую фазу из работы и обеспечить работоспособность машины. Отсутствие обмоток на роторе и простота его конструкции обеспечивают низкий момент инерции. Кроме того, упрощается система охлаждения машины. Важнейшей особенностью реактивных машин, имеющих зубчатую конструкцию ротора и статора, является принципиальная возможность обеспечения минимальных пульсаций электромагнитного момента, что способствует существенному улучшению виброшумовых характеристик таких машин. Указанные особенности реактивных электрических машин создают перспективу их применение на объектах водного транспорта.

Проектированию электрических машин с зубчатым статором и ротором посвящено большое количество как отечественных [1]–[4], так и зарубежных [5], [6] работ. В настоящее время общепринятым является питание фазных обмоток импульсным напряжением. Это приводит к протеканию по обмоткам полигармонических токов и сопровождается существенными пульсациями электромагнитного момента [7]–[9]. В публикации [10] показано, что при синусоидальных пульсациях индуктивностей фазных обмоток электромагнитный момент двигателя создает первая гармоника тока, а также сумма нулевой и второй гармоник тока, остальные гармоники приводят лишь к пульсациям электромагнитного момента. В работах [11] и [12] рассматривается способ управления индукторной машиной, имеющей на статоре специальную обмотку возбуждения, синусоидальными напряжениями, однако последние порождают несинусоидальные токи, которые ведут к пульсациям электромагнитного момента.

В данной работе рассматривается управление синусоидальными токами реактивной машиной без специальной обмотки возбуждения на статоре. Для формирования напряжений, подводимых к обмоткам статора, может быть использован стандартный преобразователь частоты [13]. Для снижения пульсаций электромагнитного момента при синусоидальных токах в обмотках статора необходимо, чтобы индуктивности обмоток машины пульсировали по синусоидальному закону. В данной работе приводятся конструктивные соотношения зубцов статора и ротора машины, минимизирующие коэффициент несинусоидальных пульсаций индуктивностей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Относительные единицы. Параметры РЭМ и переменные удобно представлять в относительных единицах — в виде отношения параметра к его базовому значению. Параметры, представленные в относительных единицах, помечаются верхним индексом *. Для представления параметров в относительных единицах и перехода обратно к параметрам в именованных единицах вводятся базовые величины.

Базовые величины РЭМ делятся на основные и производные от них. Основными базовыми величинами являются амплитуда первой гармоники номинального фазного напряжения — $U_б = U_{(1)}$, амплитуда первой гармоники номинального тока: $I_б = I_н\sqrt{2}$, а также номинальная угловая частота первой гармоники тока статора — $\omega_б = \omega_н$.

Производные базовые величины находятся из основных базовых величин: сопротивление — $R_б = U_б/I_б$; индуктивность — $L_б = R_б/\omega_б$; мощность — $P_б = m \cdot U_б \cdot I_б/2$; электромагнитный момент — $M_б = P_б \cdot \omega_б$; угловая скорость вращения ротора — $\Omega_б = \omega_б/p_п$, где m — число фаз; $p_п$ — расчетное число пар полюсов.

Примем за параметры среднестатистического РЭМ следующие значения:

$$R_1^* = 0{,}03;\ L_d^* = 2{,}00;\ L_q^* = 0{,}30. \quad (1)$$

Данные значения параметров использованы при расчете параметров регуляторов и построении иллюстрационных графиков.

Электрические углы. В классических машинах переменного тока число пар зубцов ротора и пар полюсов статора совпадают. Согласно ГОСТ 27471–87, «электрическим углом называется

«произведение значения геометрического угла, образованного двумя полуплоскостями, проходящими через ось вращения машины переменного тока, на число пар полюсов»[1]. Таким образом, в соответствии с определением, электрический угол γ связан с геометрическим углом Γ соотношением

$$\gamma = (Z_2/2)\Gamma = p_{\text{п}} \cdot \Gamma, \qquad (2)$$

где $p_{\text{п}} = Z_2/2$ — расчетное число пар полюсов; Z_2 — число зубцов ротора.

Таким образом, электрическому периоду соответствует поворот ротора на два зубцовых деления.

Угловая скорость вращения ротора $\Omega = p\Gamma$, где p — здесь и далее оператор дифференцирования по времени. Из этого выражения и формулы (2) следует связь электрической угловой скорости вращения ротора с геометрической скоростью вращения ротора:

$$\omega = p_{\text{п}} \cdot \Omega\,. \qquad (3)$$

Обеспечение синусоидальных пульсаций индуктивностей фазных обмоток. Одним из условий устранения пульсаций электромагнитного момента является синусоидальность пульсаций индуктивностей при вращении ротора. Рассмотрим геометрические соотношения зубцов машины, которые позволяют свести искажения синусоидальности пульсаций индуктивностей теоретически к нулю.

Индуктивность фазной обмотки зависит угла поворота ротора и является периодической пульсирующей функцией, имеющей Z_2 максимумов на геометрическом угле поворота 2π. Размах и форма пульсаций индуктивностей зависят от конструкции зубцов статора и ротора. На графике зависимости индуктивности $L_k(\gamma)$ от электрического угла поворота ротора γ фазной обмотки k = 1, 2, …, m, приведенном на рис. 2, размерам β_S^* и β_R^* соответствуют геометрические размеры зубцов $\beta_S^* = (Z_2/2)\beta_S$ и $\beta_R^* = (Z_2/2)\beta_R$.

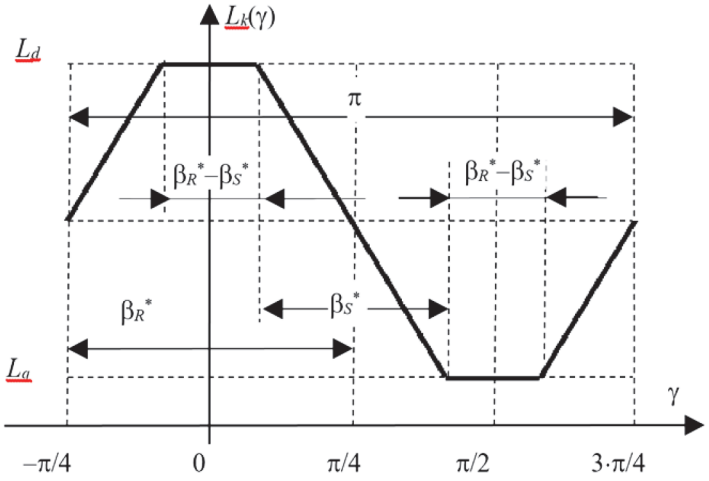


Рис. 2. Зависимость индуктивности фазной обмотки статора от электрического угла поворота ротора

При проектировании РЭМ с зубчатым статором и ротором следует стремиться к синусоидальной зависимости индуктивности фазной обмотки от угла поворота ротора. Коэффициент несинусоидальных искажений зависимости индуктивности от угла поворота ротора будет минимальным, если угловые размеры зубца статора и ротора будут связаны соотношением [14]

$$\beta_S = \frac{2}{3} \cdot \beta_R = \frac{2\pi}{3Z_2}\,, \qquad (5)$$

где β_S и β_R — угловой размер зубца статора и ротора (см. рис. 2). При этом скважности зубцов статора и ротора должны удовлетворять выражениям:

[1] ГОСТ 27471–87. Машины электрические вращающиеся. Введ. 1988-07-01. Взамен ГОСТ 17154–71 и ГОСТ 23375–78. С. 36.

$$\gamma_S = \frac{\beta_S}{\tau_S} = \frac{Z_1}{3Z_2};\ \gamma_R = \frac{\beta_R}{\tau_R} = \frac{1}{2}, \tag{6}$$

где τ_S и τ_R — геометрический угловой размер зубцового деления магнитопровода статора и ротора соответственно.

Зависимость индуктивности фазной обмотки статора от электрического угла поворота ротора, приведенная на рис. 2, построена без учета выпучивания магнитного поля из зубца статора в воздушный зазор. Выпучивание магнитного потока в паз в положении «зубец–зубец» составляет около 8 … 12 %. С учетом выпучивания магнитного потока зависимость индуктивности фазной обмотки статора от угла поворота ротора сглаживается и становится близкой к синусоидальной.

Первая гармоника индуктивности фазной обмотки может быть записана в следующем виде:

$$L_k(\gamma) = L_0 + L_m \cdot \cos(2\gamma_k), \tag{7}$$

где L_0 — среднее значение индуктивности; L_m — амплитуда пульсаций индуктивности; $\gamma_k = \gamma + k\rho$ — электрический угол поворота ротора относительно фазы $k = 1, \ldots, m$; $\rho = 2\cdot\pi/m$ — угол фазового сдвига.

Среднее значение и амплитуда пульсаций индуктивности связаны с продольной и поперечной индуктивностями фазной обмотки соотношениями:

$$L_0 = (L_d + L_q)/2;\quad L_m = (L_d - L_q)/2. \tag{8}$$

Кроме синусоидальной составляющей индуктивности обмоток имеют также высшие гармонические составляющие, которые обусловлены влиянием магнитопровода и геометрией воздушного зазора между статором и ротором. Однако при синтезе алгоритмов управления используется описание пульсаций индуктивности в виде уравнения первой гармоники (7), так как остальные гармоники обуславливают только пульсации электромагнитного момента.

Уравнения напряжений. При составлении уравнений напряжения полагается, что реактивная машина имеет *m* фазных обмоток, соединенных в звезду, которые получают питание от симметричной *m*-фазной системы ЭДС, обеспечивающих протекание по фазным обмоткам системы симметричных синусоидальных токов:

$$i_k(\gamma) = i_a \cdot \sin(\gamma_k + \theta_I) = i_d \cdot \sin(\gamma_k) - i_q \cdot \cos(\gamma_k), \tag{9}$$

где $i_d = i_a \cdot \cos(\theta_I)$ — продольный ток (ток намагничивания); $i_q = i_a \cdot \sin(\theta_I)$ — поперечный ток (ток нагрузки); $i_a = (i_d^2 + i_q^2)^{1/2}$ — модуль вектора тока в обмотке; $\theta_I = \arctan(i_q/i_d)$ — угол токовой нагрузки; $k = 1, 2, \ldots$; m — номера обмоток.

Взаимные индуктивности между фазами отсутствуют. Каждая из фазных обмоток ($k = 1, \ldots, m$) имеет активное сопротивление R_1 и собственную индуктивность $L_k(\gamma)$, определенную выражением (7). Уравнения напряжений на фазных обмотках $k = 1, \ldots, m$ имеют следующий вид:

$$u_k = R_1 \cdot i_k(\gamma) + p\{L_k(\gamma) \cdot i_k(\gamma)\}, \tag{10}$$

где $i_k(\gamma)$ — ток фазной обмотки; $\gamma = \omega t$ — электрический угол поворота ротора; ω — электрическая угловая частота; p — оператор дифференцирования по времени t.

Будем рассматривать продольный и поперечный токи в выражении (9) как функции электрического угла поворота ротора γ: $i_d = i_d(\gamma)$; $i_q = i_q(\gamma)$. Если подставить ток в выражении (9) в уравнения напряжений (10), то их можно записать в относительных единицах как сумму первой и третьей гармоники:

$$u_k^* = u_{k(1)}^* + u_{k(3)}^*. \tag{11}$$

Первая и третья гармоники фазного напряжения в осях *d* и *q* имеют вид:

$$\begin{aligned} u_{k(1)}^* &= u_d^* \cdot \cos(\gamma_k) + u_q^* \cdot \sin(\gamma_k); \\ u_{k(3)}^* &= u_{d(3)}^* \cdot \cos(3\gamma_k) + u_{q(3)}^* \cdot \sin(3\gamma_k). \end{aligned} \tag{12}$$

Уравнения продольного и поперечного контуров РЭМ. Используя первую формулу уравнения (12), можно записать уравнения амплитуд первой гармоники, связывающие напряжения и токи по осям *d*-*q*:

$$u_d^* = R_1^* \cdot i_d^* - \omega^* \cdot L_Q^* \cdot i_q^* + L_D^* \cdot pi_d^*;$$

$$u_q^* = R_1^* \cdot i_q^* + \omega^* \cdot L_D^* \cdot i_d^* + L_Q^* \cdot pi_q^*, \quad (13)$$

где L_D^* и L_Q^* — относительные индуктивности продольного и поперечного контуров.

Индуктивности в уравнениях (13) связаны с продольной и поперечной индуктивностями фазной обмотки соотношениями:

$$L_D^* = \frac{L_q^* + 3L_d^*}{4}; \quad L_Q^* = \frac{L_d^* + 3L_q^*}{4}. \quad (14)$$

Используя вторую формулу уравнения (12), можно записать уравнения амплитуд третьей гармоники, связывающие напряжения и токи по осям *d-q*:

$$u_{d(3)}^* = -\frac{L_m^*}{4} \cdot \left(pi_d^* - 3\omega^* \cdot i_q^* \right);$$

$$u_{q(3)}^* = -\frac{L_m^*}{4} \cdot \left(pi_q^* + 3\omega^* \cdot i_d^* \right), \quad (15)$$

где L_m — амплитуда пульсаций полных индуктивностей обмоток статора (5).

Вычисление амплитуд координат. Для вычисления амплитуд токов и напряжений по осям *d-q* необходим датчик, который позволяет определять электрический угол положения ротора γ. Преобразование наблюдаемых токов в координатах магнитных осей обмоток в токи намагничивания i_d^* и нагрузки i_q^* выполняется по формулам:

$$i_d^* = \frac{2}{m} \cdot \sum_{k=0}^{m-1} i_k^* \cdot \cos(\gamma_k); \quad i_q^* = \frac{2}{m} \cdot \sum_{k=0}^{m-1} i_k^* \cdot \sin(\gamma_k). \quad (16)$$

Преобразование вектора напряжений в осях координат *d-q* в основную гармонику фазных напряжений выполняется по формуле

$$u_k^* = u_d^* \cdot \cos(\gamma_k) + u_q^* \cdot \sin(\gamma_k), \quad (17)$$

где $k = 1, 2, \ldots, m$ — номера фазных обмоток.

Номинальный режим работы. В номинальном режиме работы относительная скорость вращения поля статора $\omega_1^* = 1$, а также модули векторов относительного напряжения и тока обмотки статора:

$$i_a^* = \sqrt{i_d^{*2} + i_q^{*2}} = 1; \quad u_a^* = \sqrt{u_d^{*2} + u_q^{*2}} = 1. \quad (18)$$

Если принять, что $pi_d = pi_q = 0$, то из соотношений (18) и уравнений напряжений (13) можно найти относительные номинальные значения токов намагничивания и нагрузки:

$$i_{d\text{ном}}^* \approx \sqrt{\frac{1 - L_Q^{*2}}{L_D^{*2} - L_Q^{*2}}}; \quad i_{q\text{ном}}^* \approx \sqrt{\frac{L_D^{*2} - 1}{L_D^{*2} - L_Q^{*2}}}, \quad (19)$$

где L_D^*, L_Q^* — индуктивности продольного и поперечного контуров (14); знак приближения в данных равенствах обусловлен допущением $R_1^* = 0$.

Управление электромагнитным моментом. Электромагнитная энергия, запасенная обмотками реактивной машины, фазные обмотки которой не имеют взаимных индуктивностей, определяется выражением

$$W(\gamma) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^{m} L_k(\gamma) \cdot i_k^2. \quad (20)$$

Заметим, что электромагнитная энергия зависит от электрического угла поворота ротора, который связан с геометрическим углом соотношением (2). Тогда электромагнитный момент потенциальной силы РЭМ определится выражением

$$M = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^{m} \frac{\partial L_k(\gamma)}{\partial \Gamma} \cdot i_k{}^2 = \frac{Z_2}{4} \cdot \sum_{k=1}^{m} \frac{\partial L_k(\gamma)}{\partial \gamma} \cdot i_k{}^2. \quad (21)$$

Если в выражение (21) подставить токи (9), то электромагнитный момент РЭМ

$$M = p_{\text{п}} \cdot \frac{m}{2} \cdot (L_D - L_Q) \cdot i_d \cdot i_q = p_{\text{п}} \cdot \frac{m}{2} \cdot L_D \cdot (1 - \xi) \cdot i_d \cdot i_q, \quad (22)$$

где $p_{\text{п}}$ — расчетное число пар полюсов; L_D и L_Q — индуктивности продольного и поперечного контуров (14); $\xi = L_Q/L_D$ — коэффициент поперечного рассеяния контуров; i_d^* и i_q^* — соответственно продольный и поперечный относительные токи обмотки статора.

Электромагнитный момент в относительных единицах:

$$M^* = (L_D^* - L_Q^*) \cdot i_d^* \cdot i_q^* = L_D^* \cdot (1 - \xi) \cdot i_d^* \cdot i_q^*. \quad (23)$$

Если принять, что ток намагничивания поддерживается системой управления на номинальном уровне $i_d = i_{d\text{ном}}$, то из выражения (23) следует, что управление электромагнитным моментом сводится к управлению током нагрузки i_q.

Уравнение движения. Скорость протекания механических процессов характеризуется механической постоянной времени:

$$T_{\text{мех}} = \frac{J \cdot \Omega_{\text{б}}}{M_{\text{б}}}, \quad (24)$$

где J — момент инерции электропривода.

Динамика механических процессов описывается уравнением движения ротора (вторым законом Ньютона):

$$J \cdot p\Omega = M - M_{\text{с}}, \quad (25)$$

где Ω — угловая скорость вращения ротора; M — электромагнитный момент; $M_{\text{с}}$ — момент сопротивления движению.

Запишем уравнение движения машины, являющееся составной частью математической модели машины, в относительных единицах:

$$T_{\text{мех}} \cdot p\omega^* = M^* - M_{\text{с}}^*, \quad (26)$$

где $\omega^* = \Omega/\Omega_{\text{б}}$ — относительная угловая скорость вращения ротора.

Результаты (Results)

Синтез динамики электромагнитных и механических процессов в РЭМ поясняется структурной схемой, приведенной на рис. 3.

При синтезе желаемого динамического поведения электромагнитных процессов принимаем, что наблюдается вектор токов в осях координат магнитных осей обмоток РЭМ. Для синтеза динамических процессов наблюдаемые токи должны быть преобразованы в токи намагничивания i_d^* и нагрузки i_q^* в системе координат ротора *d-q* по формулам (16).

Управляющими воздействиями является вектор фазных напряжений на обмотках РЭМ $\mathbf{U}_S$. Алгоритм управления синтезирует напряжения u_d^* и u_q^* в системе координат ротора *d-q* в относительных единицах, которые должны быть преобразованы в вектор фазных напряжений на фазных обмотках РЭМ $\mathbf{U}_S{}^*$ по формулам (17). По напряжениям $\mathbf{U}_S{}^*$ система управления электронно-ключевого преобразователя частоты (ПЧ) синтезирует линейные модулированные напряжения $\mathbf{U}_S$.

В трехфазной РЭМ при синусоидальных линейных напряжениях по фазным обмоткам, соединенным в звезду, потекут токи, близкие к синусоидальным. При этом фазные напряжения будут иметь третью гармонику. При числе фаз $m > 3$ для получения синусоидальных токов в обмотках линейные и фазные напряжения РЭМ должны иметь третью гармонику.

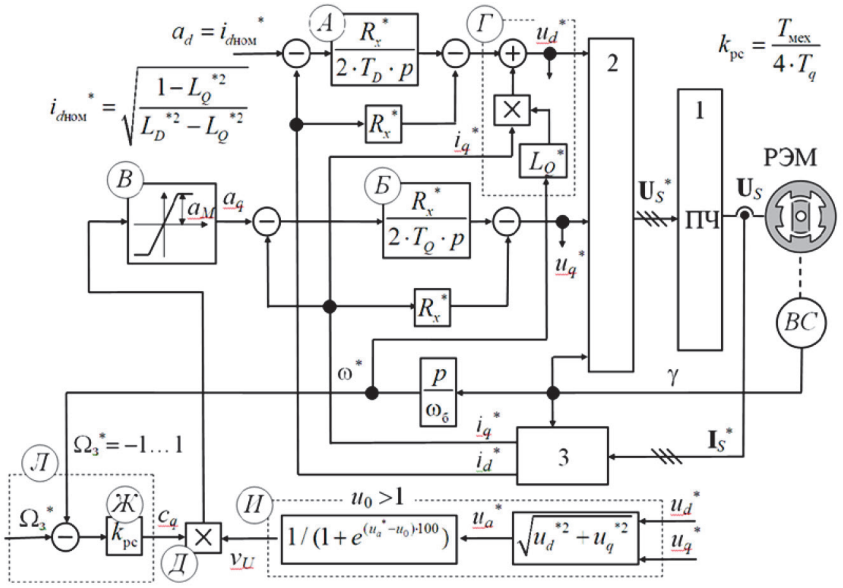


Рис. 3. Структурная схема управления скоростью вращения ротора в первой зоне при постоянном намагничивании: *1* — преобразователь частоты; *2* и *3* — блоки преобразования координат напряжения и тока; *А* — регулятор тока намагничивания; *Б* — регулятор тока нагрузки; *Г* — узел компенсации влияния тока нагрузки на ток намагничивания; *В* — узел ограничения тока нагрузки; *Ж* — регулятор скорости вращения ротора; *И* — узел ограничения модуля напряжения на обмотке статора

Регулятор тока намагничивания. Для управления током намагничивания образован контур с пропорциональным параллельным регулятором, который далее называется контуром виртуальной диссипации (рис. 3). Коэффициент передачи пропорционального параллельного регулятора R_x^* далее называется *параметром виртуальной диссипации* [15]. Несложно показать, что при значениях параметра виртуальной диссипации:

$$R_x^* \geq \omega^* \cdot \frac{2 \cdot L_D^* \cdot L_Q^*}{L_D^* - L_Q^*} \approx 2 \cdot \omega^* \cdot L_Q^*, \tag{27}$$

характер динамических процессов будет апериодическим. Значение R_x^* существенно превышает относительное значение сопротивления обмотки статора R_1^*. В этом случае можно полагать, что объектом управления контура намагничивания является апериодическое звено с передаточной функцией

$$W_d = \frac{1/R_x^*}{T_D \cdot p + 1}. \tag{28}$$

Постоянная времени контура намагничивания с виртуальной диссипацией:

$$T_D = \frac{L_D^*}{\omega_б \cdot R_x^*}. \tag{29}$$

Влияние тока нагрузки i_q на контур намагничивания рассматривается как возмущающее воздействие, которое ведет к возникновению ошибок управления. Для астатического управления током намагничивания целесообразно образовать второй контур (см. рис. 3) с интегральным регулятором:

$$W_{dd} = \frac{R_x^*}{2 \cdot T_D \cdot p}. \tag{30}$$

Данный регулятор настроен на технический оптимум и обеспечивает желаемый характер динамических процессов. Передаточная функция контура тока намагничивания, настроенного на технический оптимум:

$$W_{Kd} = \frac{1}{2 \cdot T_D{}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_D \cdot p + 1} \approx \frac{1}{2 \cdot T_D \cdot p + 1}. \quad (31)$$

Для компенсации влияния тока нагрузки i_q на контур тока намагничивания целесообразно предусмотреть отрицательную обратную связь то току нагрузки i_q (см. рис. 3).

Регулятор тока нагрузки. Синтез системы управление током нагрузки выполняется путем образования контура с пропорциональным параллельным регулятором, коэффициент передачи которого R_x^* (см. рис. 3) и второго контура тока нагрузки с интегральным регулятором:

$$W_{qq} = \frac{R_x^*}{2T_Q \cdot p}. \quad (32)$$

Постоянная времени интегрального регулятора контура нагрузки с внутренним контуром виртуальной диссипации:

$$T_Q = \frac{L_Q^*}{\omega_б \cdot R_x^*}, \quad (33)$$

где L_Q^* — относительная поперечная индуктивность; $\omega_б$ — базовая угловая частота; R_x^* — параметр виртуальной диссипации, удовлетворяющий соотношению (27).

Несложно показать, что при значении параметра виртуальной диссипации, удовлетворяющего неравенству (27), динамические процессы в контуре нагрузки становятся апериодическими. Передаточная функция контура тока нагрузки с интегральным регулятором, настроенным на технический оптимум:

$$W_{Kq} = \frac{1}{2T_Q{}^2 \cdot p^2 + 2T_Q \cdot p + 1} \approx \frac{1}{2T_Q \cdot p + 1}. \quad (34)$$

Управление электромагнитным моментом. Динамика токов намагничивания и нагрузки определяет динамику электромагнитного момента. Динамику механических процессов в электрической машине определяет электромагнитный момент. Для обеспечения максимального электромагнитного момента машины необходимо иметь максимальное намагничивание магнитопровода. Однако чрезмерное намагничивание магнитопровода требует больших токов намагничивания, что ведет к большим потерям мощности и нагреву машины. Обычно при проектировании машины номинальный режим выбирается исходя из ее рациональной намагниченности. Поэтому целесообразно выбрать ток намагничивания статора на основе номинальных данных машины. Следовательно, для обеспечения максимального быстродействия машины необходимо поддерживать ток намагничивания постоянным, а управлять моментом контуром тока нагрузки. Поэтому в данной работе рассматривается управление электромагнитным моментом при постоянном номинальном токе намагничивания по формуле (19):

$$a_d = \sqrt{\frac{1 - L_Q^{*2}}{L_D^{*2} - L_Q^{*2}}}. \quad (35)$$

В этом случае связь между электромагнитным моментом и током нагрузки определяется выражением

$$M^* = L_D^* \cdot (1 - \xi) \cdot a_d \cdot i_q^*, \quad (36)$$

где $\xi = L_Q^* / L_D^*$ — коэффициент поперечного рассеяния контуров.

Ограничение напряжения. Узел *И* на структурной схеме (рис. 3) предназначен для ограничения напряжения на фазных обмотках, которое происходит при $u_a{}^* \geq u_0$ и при $i_a{}^* \geq i_0$. Мультипликативный сигнал ограничения v_U модуля вектора относительного напряжения $u_a{}^*$ вычисляется по формуле

$$v_U = \frac{1}{1 + \exp((u_a{}^* - u_0) \cdot \lambda)}. \quad (37)$$

Если относительное значение модуля напряжение u_a^* находится в окрестности значения u_0, а относительный ток i_a^* — в окрестности значения i_0, то происходит снижение тока нагрузки. Размер окрестности задается параметром $\lambda \approx 100\ldots 300$.

Ограничение тока нагрузки. Узел *B* на структурной схеме (рис. 3) предназначен для ограничения напряжения и тока нагрузки, которое происходит в случае, если $v_U \cdot c_q \geq a_M$ при $i_q^* \geq a_M$. Сигнал задания на ток нагрузки определяется выражением

$$a_q = \max(-a_M,\ \min(a_M, v_U \cdot c_q^*)). \tag{38}$$

Регулятор скорости вращения ротора. Для построения системы управления скоростью вращения ротора используется принцип подчиненного управления. При этом контур управления скоростью является внешним, а контур управления током нагрузки — внутренним. В данной работе рассматриваются алгоритмы подчиненного управления скоростью вращения ротора в первой зоне ($-1 \leq \omega^* \leq 1$).

Передаточная функция контура тока нагрузки (31), настроенного на технический оптимум, может быть аппроксимирована апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени T_Q. Несложно показать, что в этом случае регулятор контура скорости, настроенный на технический оптимум, является пропорциональным с коэффициентом усиления

$$k_{\text{рс}} \leq \frac{T_{\text{мех}}}{4T_Q}. \tag{39}$$

Большим значениям $k_{\text{ср}}$ соответствует более высокое быстродействие. Однако при этом снижается запас устойчивости. Сигнал задания на контур управления скоростью вращения ротора $\Omega_з$ для управления в первой зоне должен принадлежать интервалу [–1, 1].

Обсуждение (Discussion)

Моделирование выполнялось в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис.3. При моделировании динамических процессов полагалось, что производится пуск среднестатистической РЭМ с параметрами, определенными выражениями (1), с постоянной величиной номинального момента сопротивления: $M_{\text{с}}^* = M_{\text{ном}}^*$. Моделирование проводилось с параметром виртуальной диссипации $R_x^* = 1$ и настройкой контуров управления токами на технический оптимум. При моделировании полагалось, что предварительное намагничивание магнитопровода отсутствует: $i_d^*(0) = 0$.

Результаты моделирования динамических процессов представлены рис. 4. На рис. 4, *а* показана динамика токов статора i_q^*, i_d^*, i_a^*, скорости вращения ротора ω^*, электромагнитного момента M^* и напряжения статора u_a^* в относительных единицах при $\Omega_з^* = 1$ (подъем груза), на рис. 4, *б* — динамика тех же переменных при $\Omega_з^* = -1$ (спуск груза):

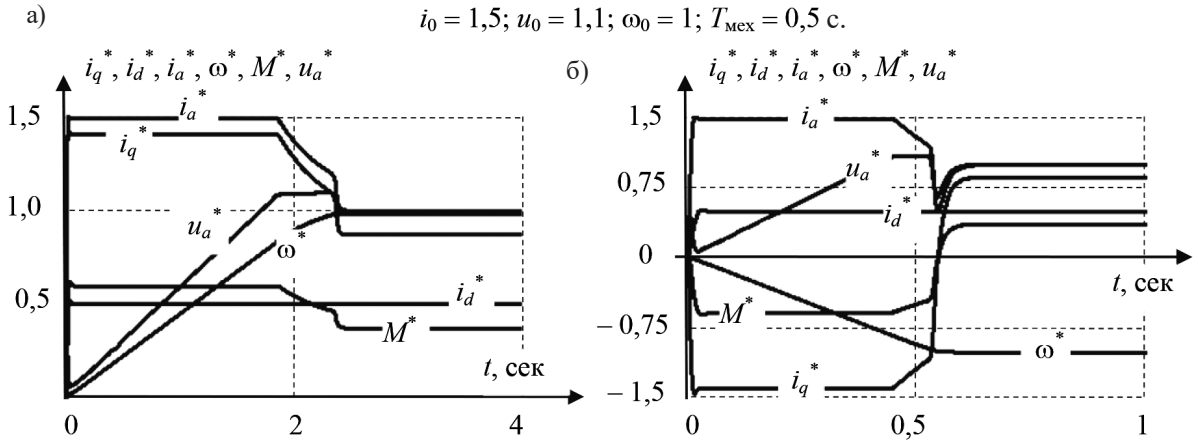


Рис. 4. Управление скоростью вращения ротора при постоянном намагничивании РЭМ:
i_q^*, i_d^*, i_a^* — графики токов статора; скорости вращения: ω^* — ротора; M^* — электромагнитного момента;
u_a^* — напряжения статора (в относительных единицах):
а — при $\Omega_з^* = 1$ (подъем груза); *б* — при $\Omega_з^* = -1$ (спуск груза)

Выводы (Summary)

На основе проведенных в работе исследований можно сделать следующие выводы.

1. При синусоидальных пульсациях индуктивностей фазных обмоток и синусоидальных токах в фазных обмотках РЭМ с числом фаз $m \geq 3$ пульсации электромагнитного момента отсутствуют.

2. Если выполнены конструктивные соотношения между зубцами статора и ротора, определенные выражениями (5) и (6), то удается получить пульсации индуктивностей электромагнитного момента близкие к синусоидальным.

3. Преобразования Ляпунова, полученные для дифференциальных уравнений напряжений РЭМ, позволяют преобразовать исходные уравнения с периодическими коэффициентами в уравнения напряжений с постоянными коэффициентами и найти составляющие вектора тока фазной обмотки: ток намагничивания и ток нагрузки. Полученные преобразования Ляпунова позволили синтезировать динамику электромагнитных процессов путем создания контуров управления током намагничивания и током нагрузки. Выполнен синтез динамики электромагнитных процессов, позволяющий формировать синусоидальные токи в фазных обмотках.

4. Для получения максимального быстродействия управления электромагнитным моментом управление РЭМ целесообразно производить при постоянстве тока намагничивания, так как постоянная времени контура тока намагничивания выше постоянной времени контура тока нагрузки.

5. Для управления скоростью вращения ротором РЭМ целесообразно применять подчиненный принцип управления, который хорошо себя зарекомендовал в приводах с классическими типами электродвигателей. Для формирования напряжений, подводимых к обмоткам статора, может быть использован стандартный преобразователь частоты, что позволит упростить и удешевить электроприводы на базе РЭМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бычков М. Г.* Расчетные соотношения для определения главных размеров вентильно-индукторной машины / М. Г. Бычков, Самир Риах Сусси // Электротехника. — 2000. — № 3. — С. 15–19.

2. *Ваткин В. А.* Разработка вентильных индукторных электромеханических систем автотранспортного назначения: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» / В. А. Ваткин. — М.: МЭИ (ТУ), 2007. — 20 с.

3. *Ильинский Н. Ф.* Проектирование вентильно-индукторных машин общепромышленного назначения / Н. Ф. Ильинский, Й. Штайнбрунн, Ю. И. Прудникова [и др.] // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. — 2004. — № 1. — С. 37–43.

4. *Фисенко В. Г.* Проектирование вентильных индукторных двигателей: методическое пособие / В. Г. Фисенко, А. Н. Попов. — М.: Изд-во МЭИ, 2005. — 56 с.

5. *Krishnan R.* Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design and applications / R. Krishnan. — CRC Press, 2001. — 432 p.

6. *Miller T. J. E.* Design of a synchronous reluctance motor drive / T. J. E. Miller, A. Hutton, C. Cossar, D. A. Staton // IEEE Transactions on industry applications. — 1991. — Vol. 27. — Is. 4. — Pp. 741–749. DOI: 10.1109/28.85491.

7. *Красовский А. Б.* Исследование пульсаций момента вентильно-индукторного двигателя при регулировании среднего значения момента в зоне малых скоростей / А. Б. Красовский // Электротехника. — 2017. — № 5. — С. 2–8.

8. *Степанов А.В.* Анализ пульсаций электромагнитного момента при проектировании бесконтактного двигателя постоянного тока дискового типа / А.В. Степанов, С.И. Масленникова // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2015 — № 10. — С. 288–301. DOI: 10.7463/1015.0820340.

9. *Шабаев В. А.* Анализ источников шума вентильно-индукторного двигателя / В. А. Шабаев // Электротехника. — 2005. — № 5. — С. 62–64.

10. *Самосейко В. Ф.* Реактивные электрические машины. Теория и проектирование/ В. Ф. Самосейко. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 392 с.

11. *Жарков А.* Цифровое векторное управление вентильно-индукторными двигателями с независимым возбуждением / А. Жарков, А. Анучин, А. Дроздов, В. Козаченко // Компоненты и технологии. — 2004. — № 8 (43). — С. 166–170.

12. *Егоров И. Н.* Векторное управление вентильно-индукторными двигателями мехатронных систем / И. Н. Егоров, В. А. Шабаев // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 12-5. — С. 891–895.

13. *Белоусов И. В.* Широтно-импульсные преобразователи электрической энергии: Монография / И. В. Белоусов, Ф. А. Гельвер, В. Ф. Самосейко, В. А. Хомяк. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. — 228 с.

14. *Самосейко В. Ф.* Реактивные электрические машины с зубчатым статором и ротором. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В. Ф. Самосейко, Ф. А. Гельвер, В. А. Хомяк, Н. А. Лазаревский. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. — 197 с.

15. *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.

REFERENCES

1. Bychkov, M. G., and Samir Riakh Sussi. “Raschetnye sootnosheniya dlya opredeleniya glavnykh razmerov ventil’no-induktornoi mashiny.” *Elektrotekhnika* 3 (2000): 15–19.

2. Vatkin, V. A. Razrabotka ventil’nykh induktornykh elektromekhanicheskikh sistem avto-transportnogo naznacheniya. Abstract of PhD diss. M.: MEI (TU), 2007.

3. Il’inskii, N. F., et al. “Proektirovanie ventil’no-induktornykh mashin obshchepromyshlennogo naznacheniya.” *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI* 1 (2004): 37–43.

4. Fisenko, V. G., and A. N. Popov. *Proektirovanie ventil’nykh induktornykh dvigatelei: metodicheskoe posobie*. M.: Izd-vo MEI, 2005.

5. Krishnan, R. *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design and applications*. CRC Press, 2001.

6. Miller, T. J. E., A. Hutton, C. Cossar, and D. A. Staton. “Design of a synchronous reluctance motor drive.” *IEEE Transactions on industry applications* 27.4 (1991): 741–749. DOI: 10.1109/28.85491.

7. Krasovskii, A. B. “Studies of torque ripple in a switched reluctance motor under a controlled average torque value in a low-velocity mode.” *Russian Electrical Engineering* 88.5 (2017): 247–252. DOI: 10.3103/S1068371217050066.

8. Stepanov, A. V., and S. I. Maslennikova. “Analysis of the torque ripples in designing a disk type brushless direct current motor.” *Science and Education of Bauman MSTU* 10 (2015): 288–301. DOI: 10.7463/1015.0820340.

9. Shabaev, V. A. “Analysis of the noise sources of the switched-reluctance motor.” *Elektrotekhnika* 5 (2005): 62–64.

10. Samoseiko, V. F. *Reaktivnye elektricheskie mashiny. Teoriya i proektirovanie*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017.

11. Zharkov, A., A. Anuchin, A. Drozdov, and V. Kozachenko. “Tsifrovoe vektornoe upravlenie ventil’no-induktornymi dvigatelyami s nezavisimym vozbuzhdeniem.” *Komponenty i tekhnologii* 8(43) (2004): 166–170.

12. Egorov, I. N., and V. A. Shabaev. “Vector control valve-inductor motor mechatronic systems.” *Fundamental research* 12-5 (2015): 891–895.

13. Belousov, I. V., F. A. Gel’ver, V. F. Samoseiko, and V. A. Khomyak. *Shirotno-impul’snye preobrazovateli elektricheskoi energii: Monografiya*. SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr», 2019.

14. 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.

15. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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
Ширяев Эдуард Вячеславович — аспирант
Научный руководитель:
Самосейко Вениамин Францевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *shiryaev.edward@yandex.ru*,
kaf _electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Samoseiko, 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: *samoseyko@mail.ru*,
kaf _electroprivod@gumrf.ru
Shiryaev, Eduard V. — Postgraduate
Supervisor:
Samoseiko, Veniamin F.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *shiryaev.edward@yandex.ru*,
kaf _electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 27 мая 2020 г.
Received: May 27, 2020.

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 12. № 3

2020 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.06.20. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 25,5. Тираж 500 экз. Заказ № 208/20

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7