

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 10. № 3

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — Т. 10. — № 3. — 196 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

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

В Вестнике публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников **05.22.00 «Транспорт»** в разделах: «Эксплуатация водного транспорта, судовождение», «Водные пути сообщения и гидрография»; **05.08.00 «Кораблестроение»** в разделах: «Судостроение и судоремонт», «Судовые энергетические установки, системы и устройства»; **05.09.00 «Электротехника»** в разделе «Электротехнические комплексы и системы»; **05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»** в разделе «Информационные технологии и автоматизация на транспорте».

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ469

Дерябин В.В. Нейросетевой подход к созданию системы определения счислимого места судна469

Каретников В.В., Чистяков Г.Б., Кравченко Л.А. Особенности применения параметра категории зон доверия при разработке плана перехода судна477

Ольховик Е.О. Исследование влияния мелководья на изменение скоростных режимов судов в акватории Северного морского пути.....486

Изотов О.А., Гультияев А.В. Оценка требуемых технологических ресурсов путем статистического моделирования497

Валькова С.С. Вероятностно-статистический метод расчета вместимости склада морского порта.....507

Кузнецов А.Л., Щербакова-Слюсаренко В.Н., Ткаченко А.С. Выбор формы представления структуры универсальной имитационной модели контейнерного терминала520

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ533

Лунев Е.А., Моргунов К.П., Рябов Г.Г. Расчет напряженно-деформированного состояния трещины в устье нижней головы шлюза № 2 Белоусовского гидроузла533

Дорошенко Н.И., Белов Д.М., Спасивцев А.В. Экспресс-методика оценки морфодинамических процессов в береговой зоне моря.....547

Колосов М.А., Эйрус А.А., Жигновская Д.В. Методика определения риска аварий в судоходных шлюзах555

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ565

Веселков В.В., Тюменцев Г.А., Козлов В.А. Экспериментальные работы по применению метода прямого лазерного выращивания при изготовлении деталей судовой трубопроводной арматуры565

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ575

Белоусов И.В., Самосейко В.Ф. Оптимальная трехфазная широтно-импульсная модуляция по критерию дисперсии тока в нагрузке575

Романовский В.В., Никифоров Б.В., Макаров А.М. Перспективы развития систем электродвижения586

Саушев А.В., Бова Е.В., Демидова Г.Л. Показатели надежности при параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов597

Афанасьев Б.В., Афанасьев В.В. Процедура комплексной обработки радиолокационных данных в строге и выбора радиолокационной метки608

Том 10. № 3

2018

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников,

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырко,

д.т.н., проф.

NyrkowAP@gumrf.ru

С. Гуцма —

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

Г. В. Егоров —

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

Ф. В. Кармазинов —

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

Р. Качиньски —

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

А. И. Пошивай —

заместитель руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов —

д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов —

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

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

**Члены
редколлегии:**

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

А. А. Сикарев, д.т.н.

С. В. Смоленцев, д.т.н.
А. Л. Степанов, д.т.н.
М. В. Сухотерин, д.т.н.
Е. Г. Трунин, к.э.н.,
директор РРР
А. Л. Тезиков, д.т.н.
В. И. Черненко, д.т.н.
В. Б. Чистов, д.т.н.

Бурков А.Ф., Юрин В.Н., Аветисян В.Р. Исследование асинхронных двигателей с целью определения возможностей повышения их энергетических показателей 619

Кузнецов С.Е., Макаров Д.М. Моделирование частичных разрядов на примере судовой высоковольтной изоляции 629

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА ТРАНСПОРТЕ** 639

Васильченко Д.С. Принципы построения управляющих алгоритмов и их отладки для использования в системах управления движением судов 639

Сахаров В.В., Сикарев И.А., Чертков А.А. Автоматизация поиска оптимальных маршрутов и грузовых потоков в транспортных сетях средствами целочисленного линейного программирования 647

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	469
<i>Deryabin V.V.</i> Neural network based approach to a vessel's dead reckoning position fixing system construction	469
<i>Karetnikov V.V., Chistyakov G.B., Kravchenko L.A.</i> Features of implementation category zones of confidence attribute in the voyage plan development.....	477
<i>Ol'khovik E.O.</i> Research the effect of shallow water on the change of vessels speed at Northern Sea Route	486
<i>Izotov O.A., Gulyaev A.V.</i> "Assessment of required technological resources by statistical simulation.....	497
<i>Valkova S.S.</i> Stochastic method for sea port storage capacity calculation.....	507
<i>Kuznetsov A.L., Sherbakova-Slyusarenko V.N., Tkachenko A.S.</i> On the selection of the format for the container terminal simulation model's structure.....	520
 WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	 533
<i>Lunev E.A., Morgunov K.P., Ryabov G.G.</i> Calculation of stress-deformed condition of crack in the state of the lower head of the class 2 of the Belousovsky hydroelectric power station.....	533
<i>Doroshenko N.I., Belov D.M., Spesivtsev A.V.</i> Express-methodology a coastal zone assessment	547
<i>Kolosov M.A., Eirus A.A., Zhignovskaia D.V.</i> Method of determining the risk of accidents in shipping locks	555
 SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	 565
<i>Veselkov V.V., Tyumentsev G.A., Kozlov V.A.</i> Experimental works on application of the method of direct laser growling at production of details of ship pipeline fittings.....	565
 ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS	 575
<i>Belousov I.V., Samosejko V.F.</i> Optimum three-phase pulse width modulation according to the criterion of dispersion of the current to the load.....	575
<i>Romanovsky V.V., Nikiforov B.V., Makarov A.M.</i> Prospects for the development of electromotive systems.....	586
<i>Saushev A.V., Bova E.V., Demidova G.L.</i> Reliability indicators at parametrical synthesis of the automated electric drives	597
<i>Afanasjev B.V., Afanasjev V.V.</i> Procedure of complex processing radar data in strobe and selection of radar mark	608
<i>Burkov A.F., Yurin V.N., Avetisyan V.R.</i> The results of studies of the modes of operation asynchronous motors at lower voltages to determine opportunities to increase their energy indicators	619
<i>Kuznetsov S.Ye., Makarov D.M.</i> Partial discharge modelling:	

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Editorial
Collegium:**

O. K. Bezyukov,
doctor of technical Sciences
A. T. Bekker,
doctor of technical Sciences
N. I. Vatin,
doctor of technical Sciences
V. V. Veselkov,
doctor of technical Sciences
P. A. Garibin,
doctor of technical Sciences
D. P. Goloskokov,
doctor of technical Sciences
V. A. Zhukov,
doctor of technical Sciences
Y. M. Iskanderov,
doctor of technical Sciences
O. G. Karatayev,
doctor of technical Sciences
V. V. Karetnikov,
doctor of technical Sciences
A. V. Kirichenko,
doctor of technical Sciences
M. N. Kirsanov,
doctor of phys.-math. Sciences
T. A. Klepikova,
doctor of philosophical Sciences
M. A. Kolosov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Koroleva,
doctor of economic Sciences
I. I. Kostylev,
doctor of technical Sciences
A. L. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
S. Ye. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Lavrentyeva,
doctor of economic Sciences
V. A. Loginovskiy,
doctor of technical Sciences
G. V. Makarov,
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

<i>A. A. Sikarev</i>

doctor of technical Sciences
S. V. Smolentsev,
doctor of technical Sciences
A. L. Stepanov,
doctor of technical Sciences
M. V. Sukhoterin,
doctor of technical Sciences
Ye. G. Trunin,
candidate of economic Sciences,
General Director
of FSI Russian River Register
A. L. Tezikov,
doctor of technical Sciences
V. I. Chernenko,
doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences

the case of high voltage insulation onboard ship 629

**INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION
IN TRANSPORT**..... 639

Vasilchenko D.S. The principles governing the construction of algorithms
and debug them for use in the systems of vessel traffic management 639
Saharov V.V., Sikarev I.A., Chertkov A.A. Automating search optimal routes
and goods flows in transport networks means the integer
linear programming 647

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-469-476

NEURAL NETWORK BASED APPROACH TO A VESSEL'S DEAD RECKONING POSITION FIXING SYSTEM CONSTRUCTION

V. V. Deryabin

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

It is known that the error of a ship's dead reckoning position, equipped with gyrocompass and log, measuring only longitudinal speed through the water, depends on accuracy of application of speed of drift (drift angle). As a rule, known methods of drift angle determination let us to take into account wind disturbances only, although speed of drift may be actually resulted from other factors. Furthermore, speed of drift is traditionally taken into account in stationary mode of a vessel motion. To avoid those disadvantages, it is necessary to construct and solve appropriate differential equation. An approximate solution of this equation may be obtained only, as, firstly, right part of the equation is calculated at discrete time moments, and it contains speed of drift itself, secondly. Simplified problem formulation is a case of approximation of speed of drift as multivariable function of input vector components. This vector contains variables, which being obtained at the bounds of a time step interval, determine unambiguously speed of drift at its right bound (for the current moment of time). The approximation task may be solved as precise as it is necessary with a neural network, satisfying conditions of the Universal approximation theorem. The above task may be solved on the basis of traditional approach too. The approach based on the use of empirical (non neural network based) mappings as for certain forces, acting on a ship's hull may be implemented too. But is no guarantee that such an approximation is optimal in terms of accuracy. The proposed general method of the neural network based system construction assumes definition of structure parameters (number of hidden layers and neurons within each of them, type of activation function), learning algorithm.

Keywords: dead reckoning of a vessel's track, speed of drift, differential equation, neural network, universal approximation.

For citation:

Deryabin, Victor V. "Neural network based approach to a vessel's dead reckoning position fixing system construction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.3 (2018): 469–476. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-469-476.

УДК 656.61.052:527.61:004.032.26

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЧИСЛИМОГО МЕСТА СУДНА

В. В. Дерябин

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

Известно, что погрешность счислимого места судна, оборудованного лагом, измеряющим только продольную составляющую относительной скорости, и гирокомпасом, зависит от точности учёта скорости (угла) дрейфа. Существующие методы определения угла дрейфа позволяют, как правило, учитывать только ветровое воздействие, хотя в действительности дрейф может быть вызван и другими факторами. Более того, традиционно дрейф учитывается лишь в установившемся режиме движения судна. Для учёта указанных обстоятельств необходимо составить и решить соответствующее дифференциальное уравнение. Решение возможно лишь приближённое, так как, во-первых, правая часть уравнения может быть получена только в отдельные моменты времени, разделённые дискретностью

измерений, и, во-вторых, она содержит непосредственно саму скорость дрейфа. Исследована упрощённая формулировка задачи, которая представляет собой задачу аппроксимации скорости дрейфа как функцию компонентов входного вектора. Данный вектор содержит значения величин на границах временного промежутка, однозначно определяющих скорость дрейфа на его конце (для текущего момента времени). Задача аппроксимации может быть решена со сколь угодно высокой точностью при помощи нейронной сети, удовлетворяющей условиям теоремы об универсальной аппроксимации. Указанная задача может быть решена и в рамках традиционного подхода, предполагающего использование эмпирических (не нейросетевых) зависимостей для отдельных сил, действующих на корпус судна, но без гарантии, что такая аппроксимация будет оптимальной в смысле точности. Предлагается общий метод построения нейросетевой системы, который предполагает определение параметров структуры сети (числа скрытых слоёв и нейронов в каждом из них, вида функции активации нейронов скрытых слоёв), алгоритма обучения.

Ключевые слова: счисление пути судна, скорость дрейфа, дифференциальное уравнение, нейронная сеть, универсальная аппроксимация.

Для цитирования:

Дерябин В. В. Нейросетевой подход к созданию системы определения счислимого места судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 469–476. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-469-476.

Введение (Introduction)

Погрешность счисления пути судна определяется двумя основными факторами. Первый из них представляют точность и комплектация навигационных датчиков, по информации от которых ведётся счисление. Второй заключается в несовершенствах алгоритма обработки навигационной информации, посредством которого данные от датчиков преобразуются в счисляемые координаты судна. Остановимся на последнем факторе. Алгоритм обработки навигационных данных напрямую зависит от комплектации используемых датчиков, поэтому будем в дальнейшем считать, что в качестве датчиков счисления используются относительный лаг, измеряющий только продольную составляющую относительной скорости, и гирокомпас. В соответствии с Конвенцией СОЛАС, такой набор измерителей должен обязательно присутствовать на борту судна валовой вместимостью 300 и более, но менее 50 000.

Данная схема счисления традиционно предполагает обязательный учёт дрейфа и течения. Учёт постоянных и приливо-отливных течений, как правило, не вызывает значительных затруднений, так как для районов интенсивного судоходства в настоящее время созданы достаточно достоверные базы данных течений, разработаны методы учёта приливо-отливных составляющих. Сложнее обстоят дела с учётом дрейфа, так как угол дрейфа и скорость дрейфа (при заданной продольной относительной скорости) зависят от физических характеристик конкретного судна.

В практике судовождения сформировались хорошо отработанные схемы учёта лишь ветрового дрейфа [1], [2], хотя в действительности дрейф судна (поперечная составляющая относительной скорости) может быть вызван и иными причинами. Например, при движении судна на циркуляции также образуется угол дрейфа, не связанный с воздействием ветра. Но даже при учёте только ветрового дрейфа существующие методы предполагают допущения, заключающиеся в том, что движение судна носит установившийся (стационарный) характер, что в действительности далеко не всегда выполняется. Поэтому для более адекватного учёта скорости дрейфа следует обратиться к теории дифференциальных уравнений. В настоящее время разработаны различные методы определения сил, действующих на судно. Например, в работах [3] – [8] приводятся математические модели движения судна, которые совместно с измерениями курса и скорости могут использоваться для определения скорости дрейфа судна.

Основным недостатком подхода, основанного на использовании дифференциальных уравнений, является то, что выражения, определяющие расчётные зависимости для вычисления отдельных сил, действующих на корпус судна, не являются зависимостями наилучшего приближения (аппроксимации). Например, известно, что гидродинамические коэффициенты судна (как функции

угла дрейфа и обобщённой безразмерной угловой скорости) могут быть аппроксимированы выражениями, которые в качестве параметров содержат величины, зависящие от гидродинамических характеристик корпуса [7], [8]. Однако при этом возникает вопрос: *могут ли выбранные зависимости гарантированно обеспечить требуемую точность аппроксимации?* Такая гарантия не может быть получена. В то же время известно, что универсальными аппроксимирующими свойствами обладают искусственные нейронные сети [9] – [11], что делает их перспективным инструментом моделирования движения судна, используемого, в частности, в целях прогноза скорости его дрейфа, т. е. для счисления.

Вопросам использования нейросетевых технологий для определения счислимых координат судна посвящены, например, работы [12], [13], в которых приводятся конкретные структуры нейросетевых и нейро-нечётких систем, прогнозирующих скорость дрейфа судна в зависимости от определяющих её величин, результаты обучения и тестирования таких систем. Однако в них отсутствует общая постановка проблемы нейросетевого моделирования для решения задач счисления пути, а также общий метод построения нейросетевых систем счисления. Данным вопросам посвящено содержание настоящей статьи.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Постановка задачи. Кинематические уравнения движения судна имеют вид:

$$\begin{aligned} V_N &= V_{ox1} \cos K - V_{oy1} \sin K + V_{cur} \cos K_{cur}; \\ V_E &= V_{ox1} \sin K + V_{oy1} \cos K + V_{cur} \sin K_{cur}, \end{aligned} \quad (1)$$

где V_N, V_E — соответственно северная и восточная составляющие абсолютной скорости судна; K — истинный курс; V_{ox1}, V_{oy1} — соответственно продольная и поперечная составляющие относительной скорости; V_{cur}, K_{cur} — элементы постоянного течения (соответственно скорость и направление).

Интегрированием выражений (1) по времени могут быть получены геодезические координаты судна, движущегося по поверхности выбранного эллипсоида. При рассматриваемой комплектации навигационных датчиков скорость дрейфа V_{oy1} не подлежит измерению и может быть определена из решения следующего дифференциального уравнения [4], [7], [8]:

$$\frac{dV_{oy1}}{dt} = f(V_{oy1}, V_{ox1}, \omega, p_1, p_2, \dots, p_N), \quad (2)$$

где $\omega = dK / dt$ — угловая скорость поворота судна; p_1, p_2, \dots, p_N — набор из N величин, которые не зависят от физических характеристик судна и его движительно-рулевого комплекса и совместно с тремя кинематическими параметрами (V_{oy1}, V_{ox1}, ω) однозначно определяют правую часть уравнения (2) в любой момент времени t ; f — функция, вид которой определяется физическими характеристиками судна и его движительно-рулевого комплекса.

Выполним интегрирование поперечного ускорения (2) по времени на промежутке $[0; \Delta t]$:

$$V_{oy1}(\Delta t) = V_{oy1}(0) + \int_0^{\Delta t} f(V_{oy1}(t), V_{ox1}(t), \omega(t), p_1(t), p_2(t), \dots, p_N(t)) dt. \quad (3)$$

Из данного выражения следует, что скорость дрейфа судна на конце промежутка длительностью Δt однозначно определяется её значением в начале, а также видом функции f на данном промежутке. Если Δt — дискретность измерений, то значения функции f невозможно получить на внутренних точках промежутка $[0; \Delta t]$, поэтому происходит «первая» потеря точности в определении вида f на промежутке $[0; \Delta t]$. «Вторая» потеря точности заключается в том, что значение $f(\Delta t)$ зависит от скорости дрейфа $V_{oy1}(\Delta t)$, которая и подлежит определению. Таким образом, уже на этапе физико-математической постановки задачи получается, что точно определить скорость дрейфа судна на конце временного промежутка невозможно.

Для получения приближённого решения необходимо определить входной вектор X , приближённо определяющий вид функции f на промежутке $[0; \Delta t]$:

$$X = [V_{oy1}(0), V_{ox1}(0), \omega(0), p_1(0), p_2(0), \dots, p_N(0), V_{ox1}(\Delta t), \omega(\Delta t), p_1(\Delta t), p_2(\Delta t), \dots, p_N(\Delta t)]^T, \quad (4)$$

и перейти к решению другой задачи — поиску функции многих переменных F вида

$$\tilde{V}_{oy1}(\Delta t) = F(X), \quad (5)$$

где $\tilde{V}_{oy1}(\Delta t)$ — оценка скорости дрейфа судна на конце промежутка длительностью Δt .

Построение функции F в рамках традиционного подхода, т. е. $F := F_{CL}$, реализуется следующим образом. С использованием известных расчётных методов определяются значения функции $f(0), f(\Delta t)$ на концах промежутка, затем используется схема численного интегрирования, позволяющая приближённо определить приращение скорости (интеграл), стоящее вторым слагаемым в правой части соотношения (3).

При решении задачи на основе нейронной сети, т. е. $F := F_{NN}$, определяется нейронная сеть, выполняющая аппроксимацию функции многих переменных в соответствии с выражением (5), что она может делать с любой наперёд заданной точностью в силу теоремы об универсальной аппроксимации. В случае использования традиционных методов расчёта сил утверждение об их способности к универсальной аппроксимации, т. е. приближению скорости дрейфа со сколь угодно малой погрешностью в соответствии с функцией (5), неверно. В этом смысле нейросетевая функциональная зависимость F_{NN} имеет преимущества перед классической зависимостью F_{CL} . Таким образом, приближённая задача прогноза скорости дрейфа судна является задачей аппроксимации функции многих переменных, для чего идеально подходят нейронные сети — универсальные аппроксиматоры функций, а традиционные алгоритмы таковыми не являются.

Обобщенная архитектура нейронной сети. Для реализации отображения $Y_{net} = \tilde{V}_{oy1}(\Delta t) = F_{NN}(X)$ используется многослойная сеть прямого распространения. Нейроны скрытых слоев имеют нелинейные (непрерывные ограниченные монотонно возрастающие) функции активации, а нейрон выходного слоя — тождественную функцию активации. Нейроны скрытых слоёв имеют в общем случае ненулевые пороговые смещения. Несмотря на то, что для аппроксимации со сколь угодно высокой точностью достаточно одного скрытого слоя такой сети [11], её архитектура всё-таки предполагается многослойной, так как использование одного слоя, в общем случае, не гарантирует оптимальности в плане скорости обучения и качества обобщения. Общий вид нейронной сети представлен на рис. 1.

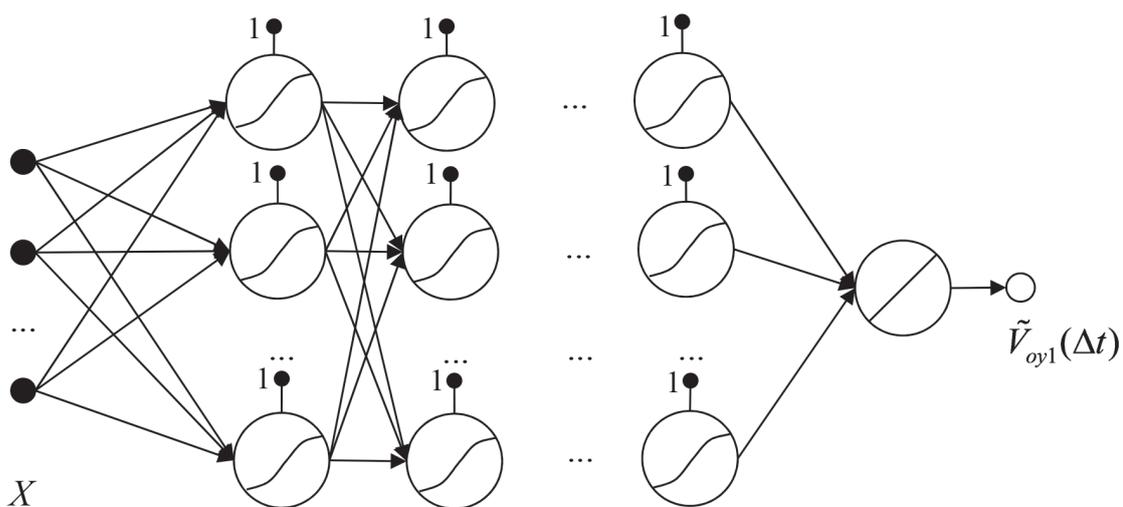


Рис. 1. Общий вид нейронной сети, прогнозирующей скорость дрейфа судна

Обобщённая архитектура нейронной сети, выполняющей функциональное преобразование входного вектора X в скорость дрейфа судна на конце отрезка $[0; \Delta t]$, определена на основе положений теоремы об универсальной аппроксимации [9], [11]. Для практической реализации ней-

ронной сети необходимо определить состав входного вектора X , а именно набор величин p_1, p_2, \dots, p_N , оказывающих влияние на скорость дрейфа судна. Для этого потребуются знания в области гидроаэродинамики судна. Дифференциальное уравнение для скорости дрейфа судна может быть записано в следующем виде [5], [7], [13]:

$$m(1 + k_{22}) \cdot \frac{dV_{oy1}}{dt} = -m(1 + k_{11}) \cdot V_{ox1} \cdot \omega + F_{vy1} + F_{py1} + F_{ry1} + F_{ay1} + F_{wy1},$$

где m — масса судна; k_{11}, k_{22} — коэффициенты присоединённых масс; F_{Sy1} — поперечная составляющая сил, индекс S которых обозначает их характер следующим образом: v — неинерционного сопротивления корпуса, P — со стороны винта, R — со стороны руля, A — аэродинамического характера, W — со стороны волнения. Далее необходимо рассмотреть методы определения силовой составляющей каждого типа, составив список p_1, p_2, \dots, p_N . Например, составляющая F_{Py1} зависит от оборотов винта n , а величина F_{Ry1} — от угла перекладки руля δ , т. е. первые две величины из списка определены: $p_1 = n, p_2 = \delta$. Естественно, величины p_1, p_2, \dots, p_N должны быть измеряемыми (определяемыми) в судовых условиях.

Для реализации сети следует также задать параметры структуры — число скрытых слоёв и нейронов в каждом таком слое, конкретный вид функции активации. Указанные параметры могут быть подобраны опытным путём на этапе настройки (обучения сети). Например, методом перебора можно определить оптимальное сочетание параметров структуры, при которых обеспечивается наилучшая точность прогноза скорости дрейфа на тестовой выборке.

Метод построения нейросетевой системы счисления. Метод построения нейронной сети, прогнозирующей скорость дрейфа судна, заключается в следующем.

1. Определяется архитектура нейронной сети.

1.1. Составляется дифференциальное уравнение скорости дрейфа судна (в форме для задачи Коши), правая часть которого является функцией многих переменных, зависящих от времени. В число переменных входят продольная и поперечная составляющие относительной скорости, угловая скорость поворота, а также другие величины. Последние определяются на основе анализа методов определения отдельных сил, действующих на корпус судна.

1.2. Формулируется упрощённая задача определения скорости дрейфа на конце временного промежутка, если известны значения определяющих её величин (переменных из предыдущего пункта) на его границах. Составляется входной вектор X , содержащий значения определяющих величин на границах временного отрезка. Значение скорости дрейфа в конце отрезка принимается равным значению в его начале.

1.3. Показывается, что упрощённая задача есть задача аппроксимации скорости дрейфа как функции многих переменных — компонент входного вектора X .

1.4. В качестве инструмента универсальной аппроксимации выбирается многослойная сеть прямого распространения. Её скрытые слои имеют нейроны с нелинейными монотонно возрастающими ограниченными непрерывными функциями активации, ненулевыми в общем случае пороговыми смещениями. Нейрон выходного слоя имеет тождественную функцию активации.

2. Формируется набор учебных данных (образцы).

3. Конкретизируются параметры структуры сети — число скрытых слоёв и нейронов в них, вид функций активации нейронов.

4. Выбирается алгоритм настройки свободных параметров сети (алгоритм обучения) и его параметры.

5. Выполняется обучение нейронной сети.

6. Выполняется тестирование нейронной сети.

7. Пп. 3 и 4 повторяются для обеспечения наилучшего результата на тестовой выборке.

Упрощённая блок-схема алгоритма построения нейросетевой системы прогноза скорости дрейфа судна представлена на рис. 2. Циклы по параметрам архитектуры и параметрам и / или типу алгоритма обучения показаны схематично, без блоков принятия решений и изменений цикловых пере-

менных. Смысл заключается том, что в результате прохождения двух этих циклов, один из которых является вложенным, определяется набор параметров (структуры и алгоритма обучения), при котором достигаются наилучшие результаты обобщения нейронной сетью для образцов тестовой выборки.

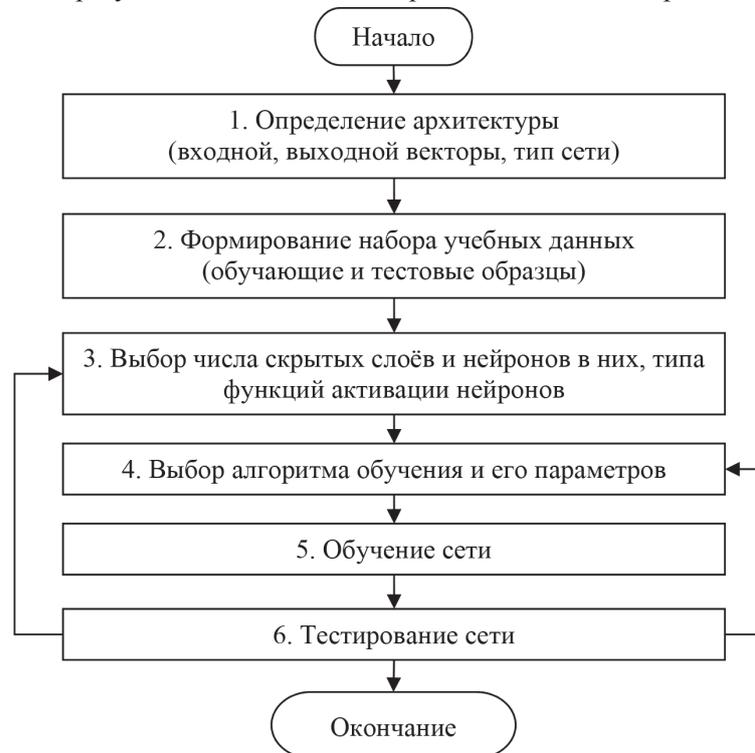


Рис. 2. Блок-схема алгоритма построения нейросетевой системы счисления пути судна

Возможно, имеет смысл ввести ещё один цикл «по образцам», так как форма представления образцов обучающей выборки также может оказывать влияние на результат обучения. В частности, можно организовывать случайные «перемешивания» образцов для уменьшения влияния систематических ошибок их определения в ходе натурных экспериментов.

Остановимся несколько подробнее на вопросах получения выходных образцов. В идеальном случае они могут быть получены на основе измерений поперечной составляющей относительной скорости судна, однако, как предполагалось ранее, лаг измеряет лишь продольную составляющую. Тем не менее эксперименты могут быть проведены для одного судна из серии, на котором установлен двухкомпонентный относительный лаг, а результаты затем распространены на все однотипные суда. При отсутствии возможности непосредственного измерения скорости дрейфа её можно получить на основе данных спутниковых навигационных систем с учётом действующих течений в районе плавания судна.

Обсуждение результатов (Discussion of Results)

Постановка задачи счисления пути судна, снабжённого однокомпонентным относительным лагом и гирокомпасом, позволяет приближённо рассмотреть задачу прогноза скорости дрейфа как задачу аппроксимации. Последняя, в свою очередь, может быть решена на основе нейронных сетей, удовлетворяющих условиям теоремы универсальной аппроксимации. Приведение задачи прогноза скорости дрейфа к задаче аппроксимации функции нескольких переменных имеет большое теоретическое значение, так как позволяет обосновать необходимость исследований в области использования нейронных сетей для определения счисляемых координат судна.

Определив тип нейронной сети, решающей задачу аппроксимации скорости дрейфа судна, необходимо конкретизировать её архитектуру — выбрать число слоёв и нейронов в них, тип функций активации скрытых слоёв так, чтобы обеспечить наилучшую точность. Более того, на точ-

ность сети может также оказывать влияние алгоритм обучения. Указанные обстоятельства могут быть учтены, если включить оптимизацию по перечисленным факторам с контролем на тестовой выборке. Предложенный метод построения нейросистемы прогноза скорости дрейфа позволяет реализовывать процедуру определения параметров архитектуры и алгоритма обучения, при которых обеспечивается наилучшая точность работы сети с использованием тестовых образцов.

Заключение (Conclusion)

Общая постановка задачи численного пути судна, снабжённого одноконтурным относительным лагом и гирокомпасом, позволяет сделать вывод о том, что неизвестной величиной является скорость (угол) дрейфа судна, которую можно определить, используя тот или иной метод. Указанная задача решается также на основе теории дифференциальных уравнений. Переход к приближённой дискретной модели измерений, показал, что задача прогноза скорости дрейфа является задачей аппроксимации функции многих переменных. Решение данной задачи на основе нейронных сетей, удовлетворяющих условиям теоремы об универсальной аппроксимации, позволяет теоретически приблизить скорость дрейфа судна нейронной сетью со сколь угодно высокой точностью. Алгоритмы аппроксимации, основанные на использовании стандартных решений по расчёту силовых воздействий на судно, такими свойствами не обладают. В этом заключается преимущество нейронной сети перед ними как структуры, обладающей гарантированными аппроксимационными свойствами (приближение функции многих переменных с любой заданной точностью).

Теорема об универсальной аппроксимации позволяет определить лишь общий вид архитектуры нейронной сети, используемой для приближения функции многих переменных. Вопросы выбора числа скрытых слоёв, нейронов в этих слоях, а также типа нелинейных функций активации остаются за пределами условий теоремы и требуют решения применительно к конкретной задаче. Конечно, выбор должен обеспечить наилучшую точность прогноза скорости дрейфа на данных тестовой выборки. В связи с этим в общем методе построения нейросетевой системы прогноза скорости дрейфа предусмотрены циклы, позволяющие перебором определить оптимальные параметры архитектуры и алгоритма обучения.

Нейронная сеть будет достаточно точно аппроксимировать скорость дрейфа судна только в том случае, если набор обучающих образцов достаточно полно отражает влияние входного вектора на скорость дрейфа судна. Поэтому одной из ключевых проблем, требующих решения для практической реализации нейронной сети, является разработка метода проведения натурных наблюдений, в ходе которых формируются образцы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев В. И.* Навигация и лоция / В. И. Дмитриев, В. Л. Григорян, В. А. Катенин. — М.: Моркнига, 2009. — 457 с.
2. *Михальский В. А.* Метрология в кораблевождении и решение задач навигации / В. А. Михальский, В. А. Катенин. — СПб.: Элмор, 2009. — 288 с.
3. *Веремей Е. И.* Математические модели и методы в цифровых технологиях управления движением морских судов / Е. И. Веремей // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2015. — Т. 2. — № 11. — С. 431–439.
4. *Дерябин В. В.* Модель движения судна в горизонтальной плоскости / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2013. — № 6. — С. 60–67.
5. *Дмитриев С. П.* Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории / С. П. Дмитриев, А. Е. Пелевин. — СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2002. — 160 с.
6. *Пилюгин А. Г.* Математическая модель движения судна на установившейся циркуляции / А. Г. Пилюгин // Морской вестник. — 2014. — № 1 (49). — С. 111.
7. *Справочник по теории корабля: в 3 т. / под ред. Я. И. Войткунского.* — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 3: Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами подержания. — 539 с.

8. Средства активного управления судами / А. Ш. Афремов [и др.]. — Изд. 2-е. — СПб.: Крыловский ГНЦ, 2016. — 182 с.
9. Funahashi K.-I. On the Approximate Realization of Continuous Mappings by Neural Networks/ K.-I. Funahashi // *Neural Networks*. — 1989. — Vol. 2. — Is. 3. — Pp. 183–192. DOI: 10.1016/0893-6080(89)90003-8.
10. Guliyev N. J. On the approximation by single hidden layer feedforward neural networks with fixed weights/ N. J. Guliyev, V. E. Ismailov // *Neural Networks*. — 2018. — Vol. 98. — Pp. 296–304. DOI: 10.1016/j.neunet.2017.12.007.
11. Haykin S. S. *Neural Networks and Learning Machines* / S. S. Haykin. — Third Edition. — Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2009. — 906 p.
12. Дерябин В. В. Нейро-нечёткая модель счисления пути судна / В. В. Дерябин, А. Е. Сазонов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 4 (32). — С. 7–16.
13. Дерябин В. В. Нейронная сеть как алгоритм прогноза скорости дрейфа судна // *Вестник компьютерных и информационных технологий* / В. В. Дерябин. — 2015. — № 6 (132). — С. 11–17. DOI: 10.14489/vkit.2015.06.pp.011-017.

REFERENCES

1. Dmitriev, V.I., V.L. Grigoryan, and V.A. Katenin. *Navigatsiya i lotsiya*. M.: MORKNIGA, 2009.
2. Mikhal'skii, V.A., and V.A. Katenin. *Metrologiya v korablevozhdenii i reshenie zadach navigatsii*. SPb.: Elmor, 2009.
3. Veremei, E.I. “Matematicheskie modeli i metody v tsifrovyykh tekhnologiyakh upravleniya dvizheniem morskikh sudov.” *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* 2.11 (2015): 431–439.
4. Deryabin, V. “Model ship traffic above the horizontal plane.” *Transport business in Russia* 6 (2013): 60–67.
5. Dmitriev, S.P., and A.E. Pelevin. *Zadachi navigatsii i upravleniya pri stabilizatsii sudna na traektorii*. SPb.: GNTs RF TsNII «Elektropribor», 2002.
6. Pilyugin, A. G. “Matematicheskaya model' dvizheniya sudna na ustanovivsheysya tsirkulyatsii.” *Morskoj vestnik* 1(49) (2014): 111.
7. Voitkunsky, Ya.I. “Manoeuvrability of conventional ships. Hydrodynamics of gliders hydrofoils and hovercrafts.” *Ship Theory Handbook*. L.: Sudostroenie, 1985.
8. Afremov, A.Sh., et al. *Sredstva aktivnogo upravleniya sudami*. 2nd ed. SPb.: Krylovskii GNTs, 2016.
9. Funahashi, Ken-Ichi. “On the approximate realization of continuous mappings by neural networks.” *Neural networks* 2.3 (1989): 183–192. DOI: 10.1016/0893-6080(89)90003-8.
10. Guliyev, Namig J., and Vugar E. Ismailov. “On the approximation by single hidden layer feedforward neural networks with fixed weights.” *Neural Networks* 98 (2018): 296–304. DOI: 10.1016/j.neunet.2017.12.007.
11. Haykin, Simon S. *Neural Networks and Learning Machines*. Third Edition. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2009.
12. Deryabin, V.V., and A.E. Sazonov. “Neuro-fuzzy vessel's deadreckoning model.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 1–16.
13. Deryabin, V.V. “Neural Network Algorithm of Vessel's Drift Speed Prediction.” *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* 6(132) (2015): 11–17. DOI: 10.14489/vkit.2015.06.pp.011-017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дерябин Виктор Владимирович —
кандидат технических наук
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
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 3 мая 2018 г.

Received: May 3, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-477-485

FEATURES OF IMPLEMENTATION CATEGORY ZONES OF CONFIDENCE ATTRIBUTE IN THE VOYAGE PLAN DEVELOPMENT

V. V. Karetnikov¹, G. B. Chistyakov², L. A. Kravchenko³

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

² — Volgo-Balt Federal Basin Administration, St. Petersburg, Russian Federation

³ — INOK TM Ltd., St. Petersburg, Russian Federation

The article related to the topical subject of calculation of under keel clearance during voyage plan development basing on depths in electronic navigational charts for which production method and accuracy is not available for navigators. This subject is examined for the first time and searches were unsuccessful through the SCOPUS and Web of science databases. The coders use specific quality criteria of survey at the time of encoding of the depths in the navigational charts. This criteria are displayed on navigational chart as attribute Category Zones of Confidence, which highlight the degree of trust to bathymetry. Nowadays at the moment of dynamic transition period from paper charts to electronic cartography is very important to correct safety management systems of shipping companies, include under keel clearance policy according to bathymetric data that display on navigational chart because this stage is one of the key point of route planning. The value of under keel clearance has affected on calculation of safety contour which is one of the main safety parameter in electronic cartography. The article discusses the attribute Category zones of confidence, max errors of survey in each zone of confidence were assessed, formulae of dynamic calculation of under keel clearance were obtained taking into consideration potential errors bathymetry data in each zone of confidence, relations of max potential errors of survey and draughts were considered graphically. In the article were proposed formulae of calculations under keel clearance which completely exclude potential errors of surveys in all zones of confidence according to current electronic cartography standards.

Keywords: under keel clearance, category zones of confidence, electronic cartography.

For citation:

Karetnikov, Vladimir V., Gleb B. Chistyakov, and Leonid A. Kravchenko. "Features of implementation category zones of confidence attribute in the voyage plan development." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 477–485. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-477-485.

УДК 656.61.052

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРА КАТЕГОРИИ ЗОН ДОВЕРИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПЛАНА ПЕРЕХОДА СУДНА

В. В. Каретников¹, Г. Б. Чистяков², Л. А. Кравченко³

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

² — ФБУ Администрация «Волго-Балт», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — ООО «ИНОК ТМ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена актуальной теме расчета запаса воды под килем при разработке плана перехода судна на основе глубин, нанесенных на электронную навигационную карту, способ получения и достоверность которых судоводителю неизвестны. Данная тема рассматривается впервые — поиск по базам данных SCOPUS и Web of Science не выдал результатов аналогичных исследований. При кодировке глубин на электронной навигационной карте используются определенными критериями оценки качества промеров. Эти критерии отображают на электронной навигационной карте в виде атрибута категории «зон доверия», который отражает степень доверия к батиметрическим данным. В настоящее время в момент

динамичного переходного периода от бумажной навигации к электронной картографии особенно важно скорректировать системы управления безопасностью судоходных компаний, и в частности политику запаса воды под килем с учетом батиметрических данных, отображаемых на навигационной карте, так как этот момент является одним из ключевых на стадии предварительной прокладки. Значение запаса воды под килем влияет на расчет контура безопасности — одного из основных параметров безопасности в электронной картографии. В статье рассмотрен атрибут категорий «зон доверия», оценены максимально возможные ошибки на каждой из них, выведены формулы динамического расчета запаса воды под килем с учетом возможных ошибок батиметрических данных в каждой категории «зон доверия», графически рассмотрены зависимости максимально возможной ошибки промера на каждой «зоне доверия» от осадки. Предложенные в статье формулы расчета запаса воды под килем полностью перекрывают возможные ошибки промеров во всех «зонах доверия» в соответствии с существующими на данный момент стандартами по электронной картографии.

Ключевые слова: запас воды под килем, категории «зон доверия», электронная картография.

Для цитирования:

Каретников В. В. Особенности применения параметра категории зон доверия при разработке плана перехода судна / В. В. Каретников, Г. Б. Чистяков, Л. А. Кравченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 477–485. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-477-485.

Введение (Introduction)

В настоящее время одним из основных навигационных средств, применяемых на борту морских судов, является ЭКНИС (электронная картографическая навигационно-информационная система). В соответствии с Конвенцией SOLAS использование данной системы на судах, подпадающих под ее действие, является обязательным и период времени, выделенный для обязательного оснащения, подходит к своему завершению. Таким образом, уже в ближайшее время подавляющее большинство конвенционных судов будет оснащено ЭКНИС. Все чаще ими оснащаются и суда, осуществляющие судоходство по внутренним водным путям Российской Федерации.

В случае, если ЭКНИС используется как основное средство навигации, то его использование имеет принципиальное значение при выполнении следующих действий и процедур, среди которых принципы несения вахты, ведение предварительной и исполнительной прокладок, заказ карт на переход, а также содержание судовой коллекции карт. Британское адмиралтейство в 2014 г. выпустило публикацию NP 232 1st edition, в которой содержатся рекомендации по внедрению ЭКНИС, процедурам работы с системой и процедурам по корректировке СУБ компаний при использовании ЭКНИС, так как внедрение данной системы является глобальным изменением принципов судоходства.

Необходимо отметить, что ЭКНИС, обладая мощным функционалом и предоставляя пользователю обширный инструментарий, требует от него определенной квалификации и знаний для ее полноценного и безопасного использования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Одной из важных функций является возможность использования ЭКНИС для разработки плана перехода судна. Судоводитель при этом прокладывает курс, ориентируясь на значения глубин, нанесенных на электронную навигационную карту (выдерживая политику компании в отношении запаса воды под килем), не всегда задумываясь о способе их получения и достоверности [1]. В то же время на официальных электронных навигационных картах (ЭНК) обязательным мета-объектом является «качество данных» (M_QUAL) [2]. Объекты класса M_QUAL должны закрывать (без взаимных наложений) всю область, покрытую данными. Конкретное значение качества данных отображает атрибут CATZOC, кодируемый для объектов класса M_QUAL (рис. 1). Рассмотрим данный атрибут подробнее.

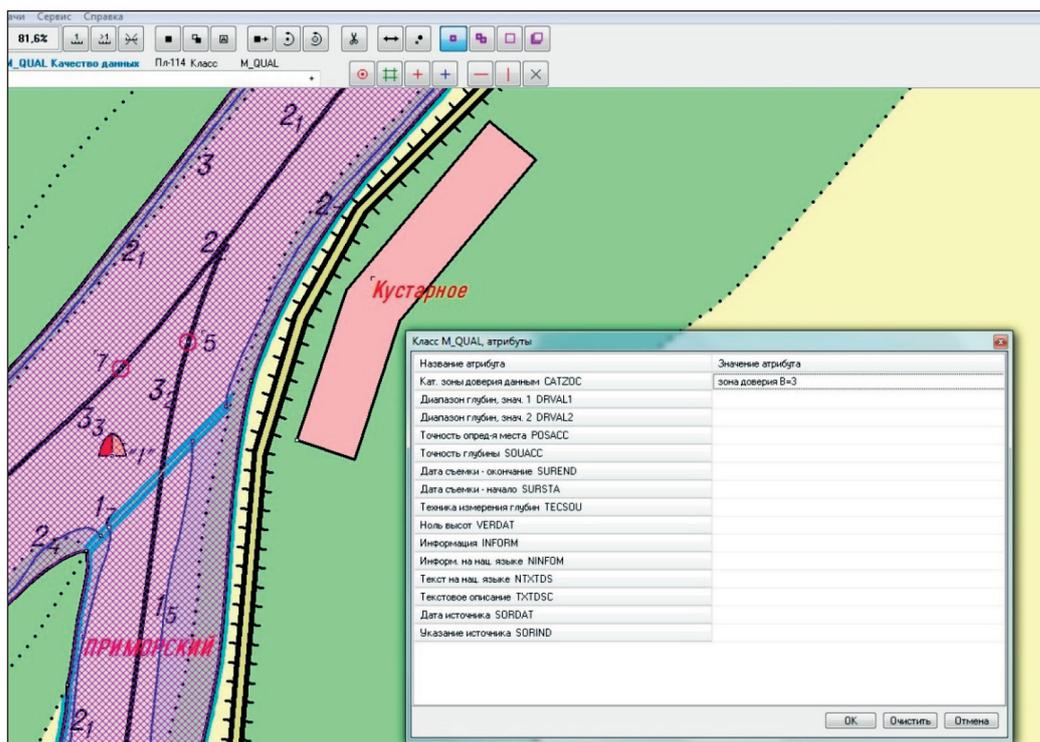


Рис. 1. Кодирование атрибута CATZOC с значением «3» для объекта класса M_QUAL

CATZOC (категория зоны доверия данным) — это атрибут, значения которого применяются для отображения точности исходных данных, используемых для создания ЭНК. Указанный атрибут кодируется для географических областей с тем, чтобы указать, соответствуют ли данные ЭНК минимальному набору критериев для следующих случаев:

- определение местоположения;
- определение точности глубины;
- оценка покрытия морского дна.

Значения атрибута, присваиваемые областям глубин, характеризуют качество выполнения гидрографических работ (точность измерения глубин и их местоположения), а также параметры используемого для этих целей оборудования [3]. С помощью атрибута CATZOC судоводитель также может оценить безопасный запас воды под килем и понимая точность получаемой информации, управлять уровнем риска во время навигации в определенном районе. Для лучшего понимания основ формирования зон доверия рассмотрим различные факторы, оказывающие влияние на выбор категории:

- *точность местоопределения* — определяет точность положения глубины или иного объекта в горизонтальной плоскости; дает судоводителю понимание, где был сделан промер;
- *точность глубины* — определяет точность измеренных глубин в вертикальной плоскости. Имеет важное значение при определении запаса воды под килем и, как следствие, снижает риск посадки на мель;
- *область покрытия дна* — позволяет представить масштаб области, которая использовалась для получения данных промера. В целом, чем больше область покрытия и выше частота получения данных, тем выше доверие к батиметрическим данным;
- *характеристики промера* — содержит специальную информацию, касающуюся конкретной категории зон доверия [4].

CATZOC — единственный атрибут, содержащий информацию о качестве данных, который, согласно Стандарту S-57, разрешено визуализировать. Для ЭНК внутренних водных путей

Российской Федерации, согласно РД 152-012-01 «Электронные навигационные карты внутренних водных путей. Общие технические требования» и стандарту S-57, требуется кодировать объект M_QUAL и его атрибут CATZOC [5]. На данный момент в ЭКНИС присутствует возможность включения / отключения функции CATZOC. При включении данной функции карты покрываются соответствующими символами CATZOC. Закодированные значения атрибута CATZOC отображаются на ЭНК, загруженной в ЭКНИС, областями небольших ромбов или треугольников, а количество звездочек внутри этих фигур обозначает непосредственное значение индикатора. Например, две звездочки символизируют самый низкий уровень качества данных «D», при котором было достигнуто неполное покрытие гидрографическими сведениями, а шесть звездочек, наоборот, показывают, что ЭНК составлена на основе исходных материалов высочайшего качества и гарантирует отображение всех важных для навигации объектов рельефа дна, что соответствует уровню «A1» (рис. 2).

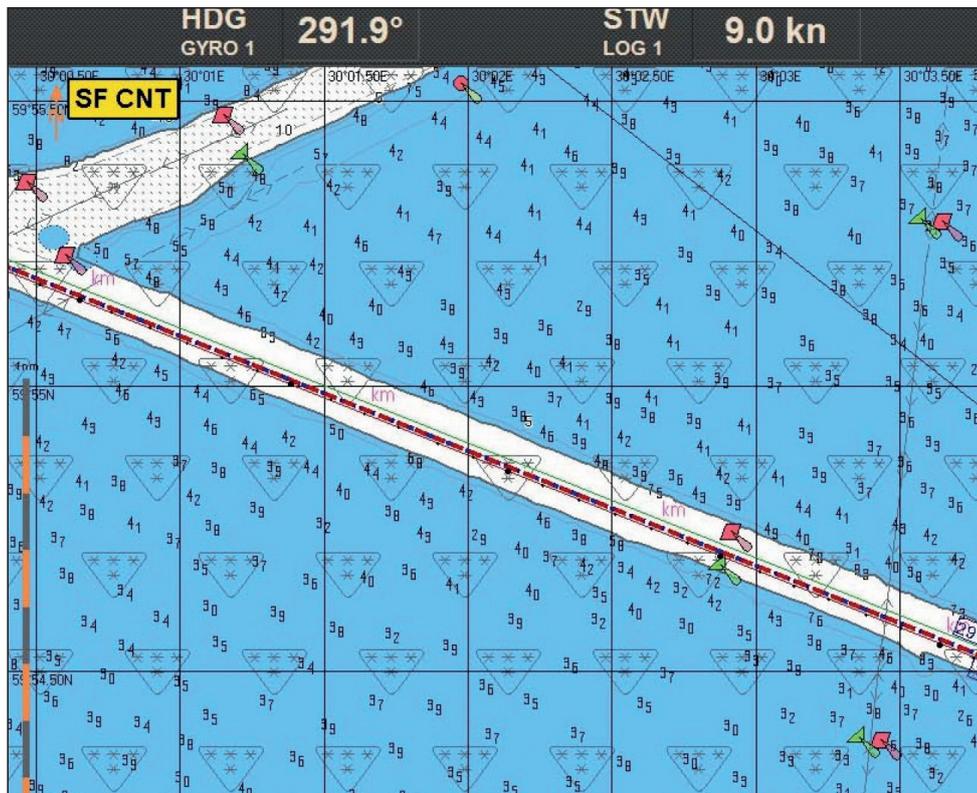


Рис. 2. Фрагмент ЭНК с качеством данных, соответствующим зоне доверия В (четыре звездочки)

Зоны, где значения атрибута CATZOC не были определены или закодированы, обозначены в ЭКНИС латинской буквой U (от англ. Unassessed — неоцененный), и во вкладке информации об ЭНК появляется запись «Качество данных («зона доверия» U «неоцененное»)» — рис. 3 [6].

Всего было определено шесть зон доверия: A1, A2, B, C, D, U. Британским адмиралтейством была выпущена таблица ZOC, в которой подробно отображена информация по зонам [7]:

Зоны доверия CATZOC

ZOC	Точность позиции	Точность глубины
A1	± 5 м +5 % глубины	= 0,50 + 1 % глубины
A2	± 20 м	= 1,00 + 2 % глубины
B	± 50 м	= 1,00 + 2 % глубины
C	± 500 м	= 2,00 + 5 % глубины
D	Хуже, чем C	Хуже, чем C
U	Качество батиметрических данных еще предстоит оценить	

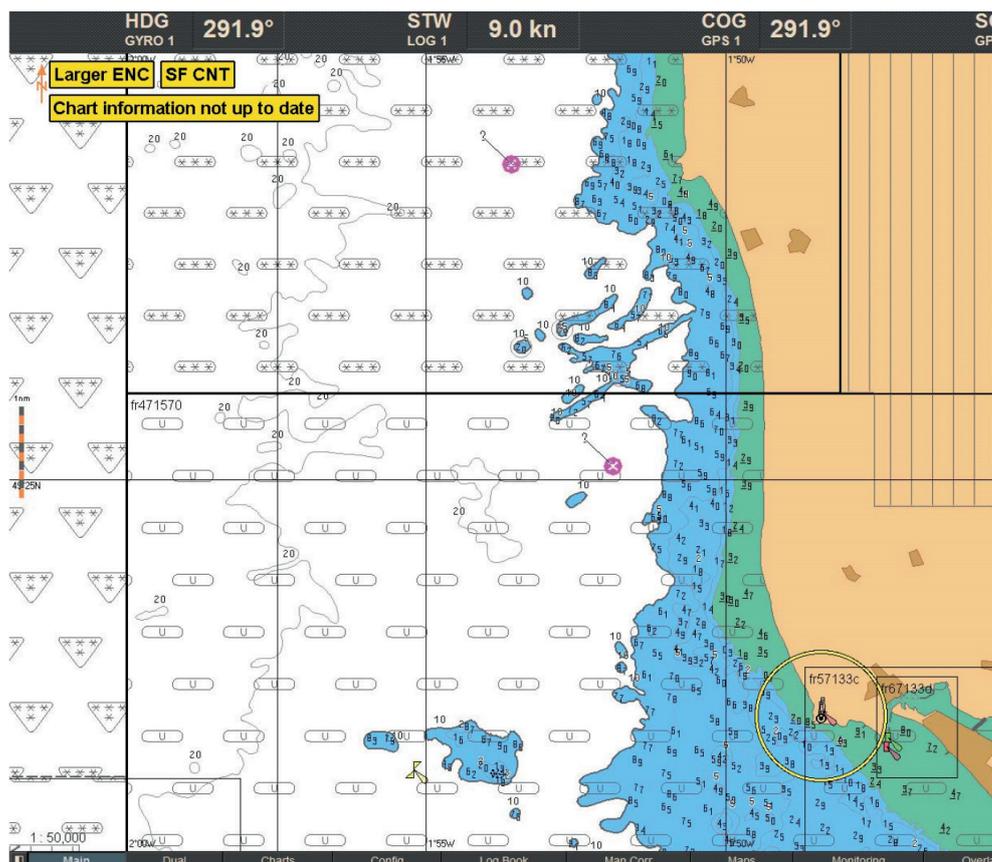


Рис. 3. Фрагмент ЭНК с качеством данных, соответствующим зоне доверия «неоцененное»

Однако данная функция в том виде, в котором существует сейчас, имеет следующие недостатки:

- отсутствие изолиний, соединяющих символы с одинаковым значением;
- отсутствие автоматической индикации районов.

Указанные недостатки затрудняют восприятие информации судоводителями.

Обсуждение (Discussion)

Необходимо отметить, что существующая схема негативно влияет не только на представление информации судоводителям. Так, например, у служб управления безопасностью (СУБ) некоторых компаний и вовсе отсутствуют какие-либо упоминания о параметре CATZOC и рекомендации по его применению. Хотя, в соответствии с рекомендациями NP 232 Guide to ECDIS Implementations, Policy and Procedures (Руководство по внедрению ЭКНИС, политике и процедурам) от UKHO (United Kingdom Hydrographic Office — гидрографический департамент Великобритании), компаниям следует откорректировать политику по запасу воды под килем в соответствии с зонами доверия [8]. Особенно это актуально на судах, использующих ЭКНИС как основное средство навигации и не использующих бумажные карты в качестве резервного средства навигации. На электронных картах информация по промерам может быть закодирована, но не визуализирована в отличие от бумажных карт, где указана схема использованных материалов [9]. Также параметр CATZOC реализован в ЭКНИС в виде дополнительной функции, которую необходимо активировать вручную, вследствие чего при ведении предварительной и исполнительной прокладок судоводители не всегда используют параметр CATZOC для оценки рисков мореплавания.

При наличии изолиний, соединяющих символы с одинаковым значением зон доверия, можно было бы добиться улучшенной визуализации картографической информации, как это сейчас

реализовано с изобатами глубин. Это, в свою очередь, позволило бы судоводителям планировать переход в соответствии с политикой УКС компании не только сверяясь с имеющимися на карте глубинами, но и делая точный анализ на основе информации по качеству промера глубин. При добавлении в функцию автоматической проверки маршрута (Check Route) параметра CATZOC можно было бы добиться частичного исключения человеческого фактора при ошибочном прокладывании маршрута по районам с низким качеством данных промера [10]. Автоматическая идентификация таких низких зон доверия на стадии проверки маршрута, без которой в соответствии с последними принятыми стандартами невозможно поставить маршрут на мониторинг, могла бы акцентировать внимание судоводителя на данные районы.

В связи с тем, что при прокладке маршрута необходимо учитывать запас воды под килем, важную роль имеет значение параметра CATZOC. Стандартные формулы, применяемые в СУБ компаний для проведения данных расчетов, в настоящее время выглядят следующим образом:

$$UKC = Ds, \quad (1)$$

где UKC — запас воды под килем; D — осадка; s — процент от максимальной статической осадки.

Выведем формулу расчета UKC (статического, без учета просадки судна, плотности воды, ветрового воздействия и других факторов, которые могут быть прописаны в СУБ компаний) в соответствии с ZOC («зоной доверия») при любом значении осадки.

Пусть y — процент от статической осадки;

D — осадка;

d — глубина;

x — максимальная возможная ошибка в данной ZOC .

Тогда $UKC = Dy$; $d = D + UKC$; $x = 0,5 + 1\% \cdot d$ (по формуле точности глубины каждого ZOC из таблицы).

Необходимо найти такой y , при котором запас воды под килем будет больше или равен максимально возможной ошибке в данной ZOC :

$$\begin{cases} UKC = Dy; \\ x = 0,5 + 0,01D; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = Dy; \\ Dy = 0,5 + 0,01(D + Dy); \end{cases}$$

$$Dy = 0,5 + 0,01(D + Dy);$$

$$Dy = 0,5 + 0,01D + 0,01Dy;$$

$$Dy - 0,01Dy = 0,5 + 0,01D;$$

$$0,99Dy = 0,5 + 0,01D;$$

$$\begin{cases} x = Dy; \\ y = \frac{0,5 + 0,01D}{0,99D}. \end{cases}$$

Отсюда следует, что при $y \geq \frac{(0,5 + 0,01D)}{0,99D}$ $UKC \geq x$.

Аналогичным образом выведем формулы для остальных ZOC . В итоге получим:

$$ZOC A1: y = (0,5 + 0,01D)/0,99D; \quad (3)$$

$$ZOC A2/B: y = (1 + 0,02D)/0,98D; \quad (4)$$

$$ZOC C: y = (2 + 0,05D)/0,95D. \quad (5)$$

Построим график зависимости максимально возможной ошибки ZOC от осадки (рис. 4).

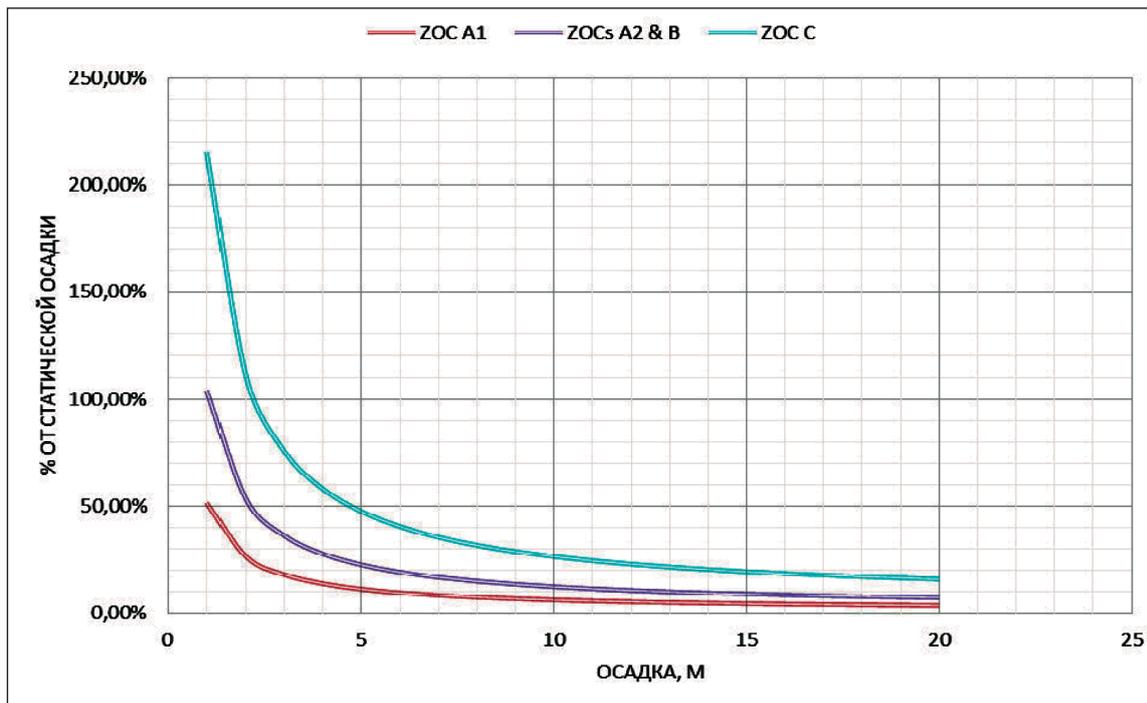


Рис. 4. График зависимости максимально возможной ошибки ZOC от осадки

Из графика видно, что до пятиметровых осадок зависимость максимально возможной ошибки от осадки меняется очень динамично, от осадок 5 м до 10 м характер зависимости не так явно выражен, но присутствует, а после осадок 10 м график бесконечно стремится к горизонтальной асимптоте.

Заключение (Conclusion)

Из ранее изложенного можно сделать вывод о том, что существующая политика по запасу воды под килем в большинстве компаний не учитывает качество батиметрических данных, а, значит, не может полностью оценить риски при планировании перехода судна. Безусловно, параметр SATZOC в том виде, в котором существует сейчас, имеет ряд существенных недостатков, но большинство судов уже используют ЭКНИС как основное средство навигации, а бумажные карты зачастую и вовсе отсутствуют на борту, вследствие чего необходимо учитывать качество батиметрических данных при корректировке политики компании по запасу воды под килем, а также на стадии предварительной прокладки [11].

Используя ранее приведенные формулы максимально возможных ошибок глубин в каждой категории «зон доверия», можно вывести формулы для динамического расчета запаса воды под килем (без учета плотности воды, ветрового воздействия, просадки судна и т. д.):

$$UKC = \frac{0,5 + 0,01D}{0,99} \text{ — для ZOC A1;}$$

$$UKC = \frac{1 + 0,02D}{0,98} \text{ — для ZOC A2 & B;}$$

$$UKC = \frac{2 + 0,05D}{0,95} \text{ — для ZOC C.}$$

Такие динамические расчеты зависимости UKC от осадки в конкретной зоне доверия особенно актуальны для судов с осадками до 10 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wells D. Proposals on chart quality portrayal / D. Wells, K. Gunning, K. Barbor, L. Alexander, T. Butkiewicz, B. Calder, L. Mayer, C. Ware // 6th DQWG Meeting Silver Spring, USA (24–26 July 2012). — 2012. — DQWG6-08A.
2. Gladisch S. Proposals for Visualizing Uncertainty of Bathymetric Data in S-101 ENC's / S. Gladisch, T. Ruth. — Fraunhofer, IGD, 2016. — 14 p.
3. Harper S. The Development of New Data Quality Visualisation Methods in Electronic Chart Information Systems and Investigation into Associated User Response / S. Harper, D. Wells, K. Gunning // Hydro12 - Taking care of the sea. — 2012.
4. Category Zones of Confidence (CATZOC) — dispelling the myths [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.admiralty.co.uk/news/blogs/category-zones-of-confidence> (дата обращения: 01.05.2018).
5. Нырков А. П. Защита электронных навигационных карт / А. П. Нырков, Г. Б. Чистяков // Региональная информатика-2008: материалы XI Санкт-Петербургской межд. конф. — СПб.: 2008. — С. 191–192.
6. Зайцев А. И. Атрибут «Категория зоны доверия» для морских и речных бумажных и электронных карт / А. И. Зайцев, А. Е. Ратнер, А. Н. Пивоваров, В. И. Дорошенко // Речной транспорт (XXI век). — 2017. — № 4 (84). — С. 31–34.
7. Zones of Confidence (ZOC) Table [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.admiralty.co.uk/AdmiraltyDownloadMedia/Blog/CATZOC%20Table.pdf> (дата обращения: 01.05.2018).
8. UKHO, Nautical Publication 232. Admiralty Guide to ECDIS Implementation, Policy and Procedures. — 2nd edition. — 2016
9. Каретников В. В. Перспективы развития электронных навигационных карт внутренних водных путей Российской Федерации / В. В. Каретников, В. А. Бекряшев // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 1 (66). — С. 30–33.
10. Гагарский Д. А. Электронные картографические системы / Д. А. Гагарский. — СПб.: ООО «Морсар», 2017. — 248 с.
11. Каретников В. В. Опыт применения современных инфокоммуникационных технологий для повышения точности речных электронных навигационных карт / В. В. Каретников, Д. Ф. Миляков, С. В. Рудых // Речной транспорт (XXI век). — 2015. — № 5 (76). — С. 35–37.

REFERENCES

1. Wells, David, Kandice Gunning, Ken Barbor, Lee Alexander, Tom Butkiewicz, Brian Calder, Larry Mayer, and Colin Ware. “Proposals on chart quality portrayal.” *6th DQWG Meeting Silver Spring, USA (24-26 July 2012)*. 2012. DQWG6-08A.
2. Gladisch, Stefan, and Thomas Ruth. *Proposals for Visualizing Uncertainty of Bathymetric Data in S-101 ENC's*. Fraunhofer, IGD, 2016.
3. Harper, Sam, David Wells, and Kandice Gunning. “The Development of New Data Quality Visualisation Methods in Electronic Chart Information Systems and Investigation into Associated User Response.” *Hydro12 - Taking care of the sea*. 2012.
4. Category Zones of Confidence (CATZOC) – dispelling the myths. Web. 1 May 2018 <<https://www.admiralty.co.uk/news/blogs/category-zones-of-confidence>>.
5. Nyrkov, A.P., and G.B. Chistyakov. “Zashchita elektronnykh navigatsionnykh kart.” *Regional'naya informatika-2008: materialy XI Sankt-Peterburgskoi Mezhdunarodnoi konferentsii*. SPb.: 2008. 191–192.
6. Zaitsev, A.I., A.E. Ratner, A.N. Pivovarov, and V.I. Doroshenko. “Atribut «Kategoriya zony doveriya» dlya morskikh i rechnykh bumaznykh i elektronnykh kart.” *Rechnoi transport (XXI vek)* 4(84) (2017): 31–34.
7. Zones of Confidence (ZOC) Table. Web. 1 May 2018 <<https://www.admiralty.co.uk/AdmiraltyDownloadMedia/Blog/CATZOC%20Table.pdf>>.
8. UKHO, *Nautical Publication 232. Admiralty Guide to ECDIS Implementation, Policy and Procedures*. 2nd edition. 2016.
9. Karetnikov, V.V., and V.A. Bekryashev. “Perspektivy razvitiya elektronnykh navigatsionnykh kart vnutrennikh vodnykh putei Rossiiskoi Federatsii.” *Rechnoi transport (XXI vek)* 1(66) (2014): 30–33.
10. Gagarskii, D.A. *Elektronnye kartograficheskie sistemy*. SPb.: ООО “Morsar”, 2017.

11. Karetnikov, V.V., D.F. Milyakov, and S.V. Rudykh. "Opyt primeneniya sovremennykh infokommunikatsionnykh tekhnologii dlya povysheniya tochnosti rechnykh elektronnykh navigatsionnykh kart." *Rechnoi Transport (XXI vek)* 5(76) (2015): 35–37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spguwc-karetnikov@yandex.ru,
kaf_svvp@gumrf.ru
Чистяков Глеб Борисович —
Зам. начальника картографической службы
ФБУ «Администрация «Волго-Балт»
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. А. Блока, д. 3, лит. Б
e-mail: chistyakov@volgo-balt.ru
Кравченко Леонид Андреевич —
Навигационный суперинтендант
ООО «ИНОК ТМ»
190068, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
наб. реки Фонтанки, 161
e-mail: lakravchenko@inok-tm.com
lakravchenko93@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karetnikov, Vladimir V. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: spguwc-karetnikov@yandex.ru,
kaf_svvp@gumrf.ru
Chistyakov, Gleb B. —
Deputy of head of cartographic department
Volgo-Balt Federal Basin Administration
3/B A. Bloka Str., St.Petersburg, 190121
Russian Federation
e-mail: chistyakov@volgo-balt.ru
Kravchenko, Leonid A. —
Navigation superintendent
INOK TM Ltd.
161 Fontanka river embankment,
St. Petersburg, 190068, Russian Federation
e-mail: lakravchenko@inok-tm.com
lakravchenko93@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 15 мая 2018 г.
Received: May 15, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-486-496

RESEARCH THE EFFECT OF SHALLOW WATER ON THE CHANGE OF VESSELS SPEED AT NORTHERN SEA ROUTE

E. O. Ol'khovik

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

Perennial navigation in western part of the Northern Sea Route is actively developing due to the use of large-capacity tankers with high ice class Arc7, which has a draft of 10-12 m. Tankers carry out the export of liquefied natural gas from the port of Sabetta and oil from the Novyi Port. Traditional routes in the Kara Sea suggest that White Island should be bypassed from the north side, where there are navigational hazards in the form of shallow depths, which reduce the ship's shunting qualities. The existing literary data on the reduction of the speed of Arctic vessels in shallow water refer to a single calculation vessel, under certain conditions, when, in practice, a constrained sediment, as a navigational hazard, affects the entire transport stream, i.e. on a group of ships. The purpose of this work is to study and compare the actual data on the change in the speed of vessels in shallow water when moving in the composition of the existing traffic flow, since the speed of the vessel is the main factor determining safety on the one hand and commercial attractiveness on the other hand. To carry out the research, a geoinformation system was used, which allows forming various information layers and comparing them. For the area of the water area of the Northern Sea Route, to the north of the White Island, separate layers were created with the coordinates of the location of the vessels, their speed, course and precipitation (in ballast and cargo state). Data were divided into separate arrays for the navigation period (in summer — 4 months from July to October, in winter — 8 months from November to June and December) and depending on the ice class of the vessel. In total, more than 2000 positions of vessels for the period of 2013-17 were selected for analysis. It has been found that ships with maximum draft of 12 m and ice class Arc7 have the greatest reduction in speed during the summer season of 10 %, in ice conditions such decrease is insignificant, due to the fact that the greatest impact on the vessel render ice field. For vessels with an ice class Arc4,5 reduction rate is practically independent of the navigation period, because pure water vessel with a draft of up to 8 meters has enough depth, while for winter navigation conditions the vessel moves in icebreaking and the maximum speed determined by the speed of the icebreaker.

Keywords: Northern Sea Route, shallow water, constrained navigation, maritime traffic flows, geoinformation system, ship speed.

For citation:

Ol'khovik, Evgeniy O. "Research the effect of shallow water on the change of vessels speed at Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 486–496. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-486-496.

УДК 528.47

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЛКОВОДЬЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ СУДОВ В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Е. О. Ольховик

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

Круглогодичное судоходство в западной части Северного морского пути активно развивается за счет использования крупнотоннажных танкеров высокого ледового класса Arc7 с осадкой в 10 – 12 м. Танкеры осуществляют вывоз сжиженного природного газа из порта Сабетта и нефти из Нового порта. Традиционные маршруты в Карском море предполагают обход острова Белый с северной стороны, где имеются навигационные опасности в виде малых глубин, которые снижают маневренные качества

судна. Существующие данные по снижению скорости арктических судов на мелководье относятся к одиночному расчетному судну при известных условиях, тогда как на практике стесненная осадка, такая как навигационная опасность, оказывает влияние на весь транспортный поток, т. е. на группу судов. Целью данной работы является исследование и сравнение фактических данных по изменению скорости судов на мелководье при движении в составе сложившегося транспортного потока, поскольку скорость движения судна является основным фактором, определяющим безопасность, с одной стороны, и коммерческую привлекательность — с другой. Для проведения исследований использовалась геоинформационная система, позволяющая формировать различные информационные слои и проводить их сравнение. Для участка акватории Северного морского пути, который находится севернее острова Белый, были сформированы отдельные слои с данными о координатах местоположения судов, их скорости, курса и осадки (в балласте и грузовом состоянии). Данные были разделены на отдельные массивы по периоду навигации (летняя — четыре месяца с июля по октябрь, зимняя — восемь месяцев с ноября по июнь и декабрь) и в зависимости от ледового класса судна. Всего для анализа было отобрано более чем 2000 позиций судов за период 2013 – 2017 гг.

Было установлено, что суда с максимальной осадкой 12 м и ледовым классом Arc7 имеют наибольшее снижение скорости в период летней навигации в размере 10 %, в ледовых условиях такое снижение несущественно, по причине того, что наибольшее влияние на судно оказывают ледовые поля. Для судов с ледовым классом Arc4,5 снижение скорости практически не зависит от периода навигации, поскольку на чистой воде судно с осадкой до 8 м имеет достаточный запас глубин, а при зимней навигации судно движется в условиях ледокольной проводки и максимальная скорость определяется скоростью ледокола.

Ключевые слова: Северный морской путь, мелководье, стесненная навигация, морские транспортные потоки, геоинформационная система, скорость движения судна.

Для цитирования:

Ольховик Е. О. Исследование влияния мелководья на изменение скоростных режимов судов в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 486–496. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-486-496.

Введение (Introduction)

Успешное освоение Арктической зоны Российской Федерации во многом зависит от реализации проектов на континентальном шельфе [1] и в прибрежной зоне. Организация транспортных процессов на Северном морском пути (СМП) и в шельфовой зоне осуществляется на 30 – 50 % в условиях мелководных участков трасс в период летней навигации и до 80 % в период зимней навигации [2]. Круглогодичное судоходство осуществляется в западной зоне СМП (юго-западная часть Карского моря) за счет вывоза углеводородов из Обской губы и грузоперевозок в порт Дудинка. При этом многолетний опыт навигации выявил основные варианты маршрутов, которые имеют достаточное гидрографическое обеспечение и прогнозируемую ледовую обстановку в зависимости от сезона.

Стандартной трассой для крупнотоннажных судов является маршрут пролив Карские ворота – остров Белый – залив Обская губа (Енисейский залив), для судов с низким ледовым классом (Arc4) используется маршрут мыс Желания – остров Белый – залив Обская губа (Енисейский залив). При выборе любой из стандартных судоходных трасс маршрут проходит на расстоянии в несколько десятков миль от северного побережья острова Белый, где находится мелководье с глубинами от 11 до 30 м. Лоция Карского моря (Л.: ГО УМС РККА и ГУ Главсевморпути при СНК СССР, 1935 – 1936 (картотип ГО УМС РККА)) достаточно подробно описывает большинство навигационных опасностей. Согласно руководству [3], следует остерегаться «банок» с глубинами 11 – 12 м, лежащих к NNW от острова Белый, они особенно опасны при сильном волнении со стороны чистого ото льда моря при ветре от N и W вследствие крупной и крутой волны на мелководье. МППСС-72 рассматривает мелководье («стесненную осадку») как фактор, значительно снижающий маневренные качества судна, такие как поворотливость судна, длина тормозного пути и снижение мощности главного двигателя. В работах [4], [5] рассмотрены вопросы оптимизации главных размерений танкеров, отмечено, что условия мелководья оказывают влияние на скоростные режимы движения танкера и его эффективность.

Исследования проф. А. Д. Гофмана, выполненные в ЛИВТ (ныне ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»), показали, что ухудшение поворотливости на мелководье носит закономерный характер из-за изменения гидродинамического взаимодействия судна с водой при малых глубинах. В работе [6] авторы провели анализ аварийных случаев с крупнотоннажными судами (длиной до 300 м) на мелководье, выявив кратное увеличение радиуса циркуляции и снижение относительной скорости поворота на мелководье по сравнению с радиусом циркуляции на глубокой воде.

В работах [2], [7] – [9] ФГУП «Крыловский государственный научный центр» отдельно рассмотрены вопросы влияния мелководья на ледовую ходкость и управляемость судов, при этом большинство выводов было сделано либо на основе модельных испытаний в ледовом бассейне, либо по результатам испытаний отдельных судов и ледоколов. Фактических данных об изменении скорости движения судов в Карском море на малых глубинах не приводится.

В серии работ [10], [11] авторы предложили гибридную модель для учета влияния ледовой обстановки на скорость транзитного перехода СМП, при этом в качестве расчетного судна взяли аналог РанаМах с ледовым усилением Агс7, осадкой в 14 м и скоростью 14 уз. Такой подход является классическим, но имеет недостатки, поскольку на практике всегда существует взаимодействие группы судов в акватории, одиночное расчетное судно — это, скорее, идеальные условия. Также в расчетную модель не были заложены такие навигационные опасности, как мелководье.

Целью настоящей работы является исследование фактических данных о скоростных режимах грузовых судов севернее острова Белый при их движении по стандартным трассам в западной части СМП. Предметом исследования является влияние малых глубин как навигационных опасностей на морские транспортные потоки. Объектами исследования служат крупнотоннажные суда ледового класса (Агс7, Агс4,5).

Данная статья является продолжением цикла исследований, посвященных созданию и разработке геоинформационной системы (ГИС) СМП в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова для анализа морских транспортных потоков. Результаты исследования будут полезны для уточнения возможной коммерческой скорости судов ледового класса при проектировании и развитии новых грузопотоков в акватории СМП.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для выполнения исследования был выбран участок акватории севернее острова Белый, ограниченный пространством между 69°Е, 72°Е долготой и 72°N, 75°N широтой. Согласно Лоции и морским картам, на этом участке присутствуют глубины от 10 до 20 м. Исследуемый участок был оформлен в виде отдельного слоя ГИС.

Данный участок акватории Карского моря используют для прохода до 95 % судов, находящихся в акватории СМП. Основными направлениями движения, которые проходят суда через этот участок, являются: Обская губа (порт Сабетта, Новый порт, мыс Каменный и др.), Енисейский залив, Восточная часть СМП (через пролив Вилькицкого). Движение судов по этим маршрутам осуществляется круглогодично, со входом в акваторию СМП через пролив Карские ворота и мыс Желания. В период летней навигации отдельные суда обходят этот участок по маршруту мыс Желания – пролив Вилькицкого, однако для такого перехода требуется высокий ледовый класс судна или проводка ледокола, поскольку северная часть Карского моря круглогодично покрыта льдом.

Для сбора информации были использованы данные с АИС и Администрации СМП о координатах местоположения судов, их скорости, курса и осадки (в балласте и грузовом состоянии). Данные были разделены на отдельные массивы по периоду навигации (летняя — четыре месяца с июля по октябрь, зимняя — восемь месяцев с ноября по июнь).

Методика отбора данных для исследований скоростных режимов включала два этапа. На первом этапе были сформированы отдельные группы судов в зависимости от их ледового

класса, всего было выделено три группы: суда с классом Arc7, суда с классом Arc4,5 и остальные суда (только грузовые). К судам *первой группы* были отнесены танкеры YamalMax проекта Ямал-СПГ, нефтеналивные танкеры, обслуживающие Новопортовское месторождение-терминал Ворота Арктики, суда ГМК «Норильский никель», все они имеют разрешения на круглогодичное навигацию, их осадка составляет от 8 до 12 м. Во *вторую группу* вошли суда, осуществляющие перевозку генеральных грузов и имеющие ограничения по районам и сезону плавания, их осадка составляет от 6 до 8,5 м. *Третья группа* — это грузовой флот, осуществляющий плавание только в период летней навигации (были отобраны суда с осадкой более 4,5 м). Для исследования скоростных режимов все данные вводились в ГИС в виде отдельных информационных слоев, количество судов по группам и их распределение более подробно было представлено нами в работе [12].

На втором этапе были определены средние скорости всех групп судов при входе(выходе) в акваторию СМП на безопасных(больших) глубинах, это участки прохода через пролив Карские ворота, мыс Желания, Обская губа и Енисейский залив. Эти данные необходимы для последующего сравнения со скоростями движения судов на мелководье. Исследуемые скорости были оформлены в виде отдельных ГИС-слоев, при этом дополнительно были разделены по признаку «летняя» и «зимняя» навигация, средние значения скоростей групп судов приведены в следующей таблице:

Средняя скорость групп исследуемых судов на безопасных глубинах при входе / выходе в акваторию СМП)

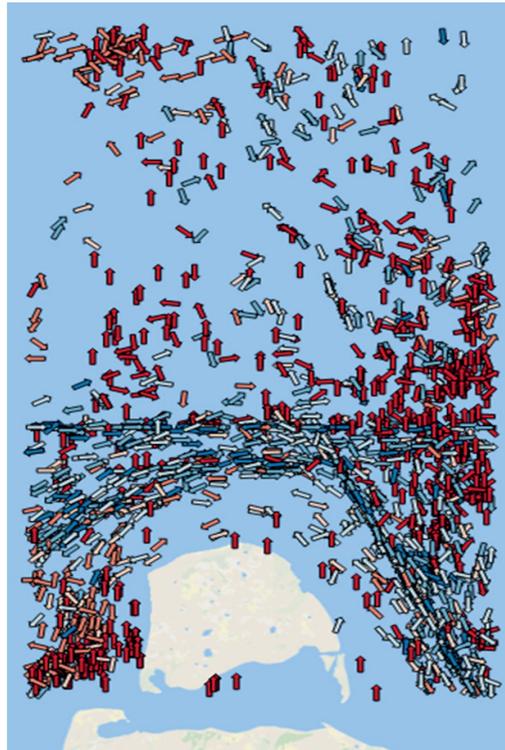
№ п/п.	Группа судов	Средняя скорость, уз (летняя навигация)	Средняя скорость, уз (зимняя навигация)
1	Суда* ледового класса Arc 7	12 – 14	9,5 – 11,5
2	Суда** ледового класса Arc 4,5	11 – 3	9 – 11 (под ледокольной проводкой)
3	Прочие суда (без ЛУ)	8 – 10	–

*Использовались данные о скорости следующих судов: CHRIS. DE MARGERIE (IMO 9737187), FEDOR LITKE (IMO 9768370), BORIS VILKITSKY (IMO 9768368), EDUARD TOLL (IMO 9750696), VLADIMIR RUSANOV (IMO 9750701), SHTURMAN SHCHERBININ (IMO 9759927), SHTURMAN OVTSYN (IMO 9752101), SHTURMAN MALYGIN (IMO 9752096), SHTURMAN ALBANOV (IMO 9752084), SHTURMAN KOSHELEV (IMO 9759939), SHTURMAN SKURATOV (IMO 9759915), MONCHEGORSK (IMO 9404015), TALNAKH (IMO 9404039), NORILSKIY NICKEL (IMO 9330836), NADEZHDA (IMO 9404041) и др.

**Использовались данные о скорости следующих судов: POLAR KING (IMO 8711320), ICE EAGLE (IMO 9171175), ICE CONDOR (IMO 9171187), ARCTICA-1 (IMO 9228980), ARCTICA-2 (IMO 9243801), IOHANN MAHMASTAL (IMO 8603406), INDIGA (IMO 7421942), Иван Рябов (IMO 7942348) и др.

Для исследования было отобрано порядка 2500 позиций судов в заданном районе — севернее острова Белый за период с 2013 по 2018 гг. Весь массив данных был введен в ГИС СМП, скорости судов были ранжированы в соответствии с цветовой легендой на рис. 1, направление стрелок на схеме соответствовало зафиксированному курсу движения судна.

Полный массив данных (см. рис. 1) сложно поддается анализу ввиду их большого количества, разнородности судов, периода навигации. Визуально можно выделить только отдельные локальные участки стоянки судов, где скорость равна нулю, на остальных участках диапазон скоростей различается во всем диапазоне. Выявить какие-либо отдельные маршруты с высокой или низкой скоростью на мелководье не представляется возможным. Также необходимо учитывать наличие льда, который оказывает существенное влияние на скорость. Для этого все данные были разделены по сезонам навигация (цветовая легенда соответствует рис. 1): рис. 2, *а* — летняя навигация, рис. 2, *б* — зимняя.



0 – 2,5	2,5 – 5,0	5,0 – 7,5
7,5 – 10,0	10,0 – 12,5	12,5 – 15,0

Рис. 1. Сформированный набор данных: положений судов, их узловых скоростей и направлений движения

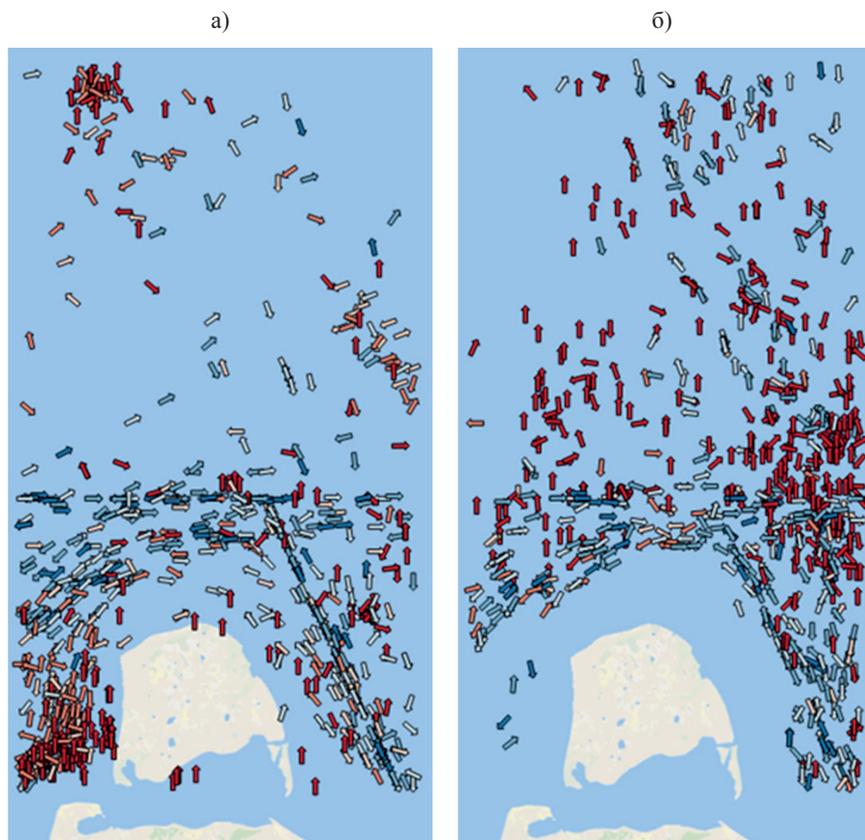


Рис. 2. Распределение скорости судов в зависимости от периода навигации:
 а — летняя навигация; б — зимняя навигация

Результаты (Results)

Полученные исходные данные: рис. 1 и 2 и данные таблицы, на последующих этапах подвергались более детальному анализу в зависимости от ледового класса судна, его осадки и периода навигации (летняя, зимняя). Анализируя плотность расположения судов на рис. 2, было выявлено, что в период зимней навигации расположение судов менее плотное и количество судов с минимальной скоростью (стоянка, дрейф или ожидание ледокола) увеличено по сравнению с летней навигацией, что объясняется следующими факторами:

- движением части судов вторым потоком со стороны мыса Желания;
- выбором маршрута судна с более легкими ледовыми условиями;
- ожиданием судном ледокола на расстоянии от рекомендованных маршрутов;
- ожиданием улучшения ледовой обстановки;
- проводкой групп судов ледоколами.

Рассматривая изменение скорости всех групп судов в пределах одного месяца года на выбранном участке мелководья по сравнению со скоростями движения на безопасной глубине (см. таблицу), было выявлено, что снижение скорости составляет до 17,5 % в период летней навигации и до 12,5 % в период зимней навигации, причем эта разница постепенно сокращается. Так, если в 2013 г. скорость на мелководье в среднем снижалась на 20 %, то уже по данным зимней навигации 2017 – 2018 гг. это снижение наблюдалось в пределах 9,5 %. Возможно, это связано с существенным накоплением опыта судоводителей, более легкими ледовыми условиями и появлением новых крупнотоннажных судов класса YamalMax, скорость которых в ледовых условиях существенно выше.

При последующих итерациях расчеты были отдельно выполнены для групп судов с ледовым классом Arc7 — рис. 3 и Arc4,5 — рис. 4. При этом средняя скорость судов Arc7 в зимнюю навигацию составила 10,0 уз (средние данные по 148 позициям — рис. 3, б), средняя скорость судов Arc7 в летнюю навигацию — 11,6 уз (средние данные по 67 позициям — см. рис. 3, а), средняя скорость судов Arc4,5 в зимнюю навигацию — 9,6 уз (средние данные по 132 позициям — см. рис. 4, б), средняя скорость судов Arc4,5 в летнюю навигацию — 11,2 уз (средние данные по 96 позициям — рис. 4, а).

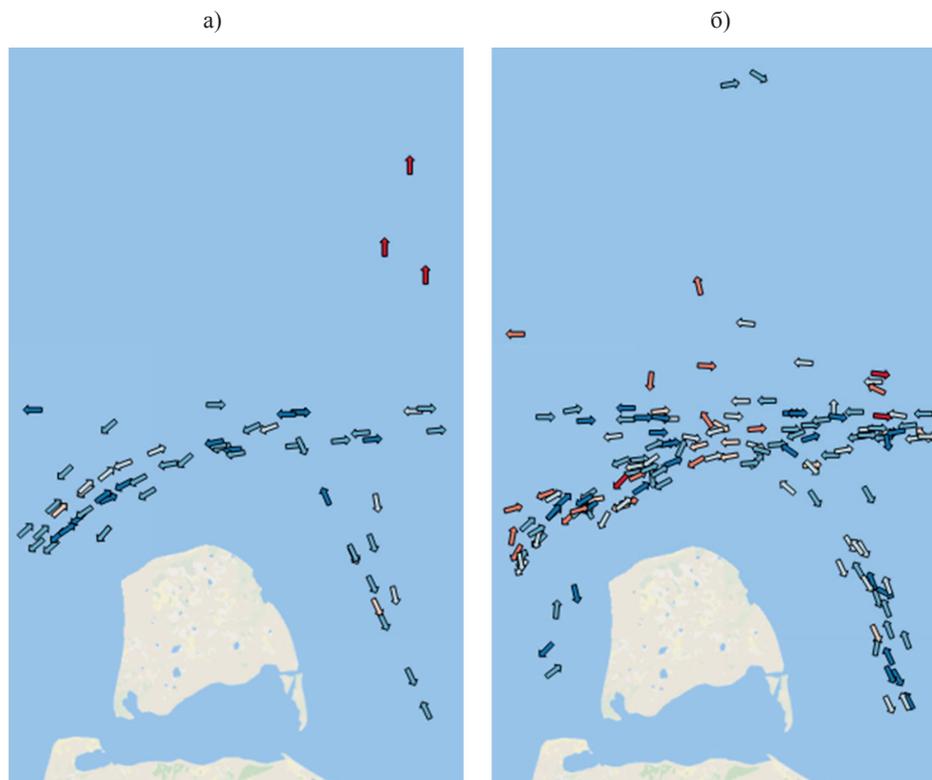


Рис. 3. Распределение скорости судов ледового класса Arc7 с осадкой 9,5 – 12 м в зависимости от периода навигации: а — летняя навигация; б — зимняя навигация



Рис. 4. Распределение скорости судов ледового класса Arc4,5 с осадкой от 5 до 8,5 м в зависимости от периода навигации:
а — летняя навигация; б — зимняя навигация

Отдельно были выделены маршруты движения пролив Карские Ворота – Обская губа. На рис. 5 показано изменение скорости при обходе о. Белый для всех групп грузовых судов с разделением на летнюю и зимнюю навигацию за период 2013 – 2017 гг.

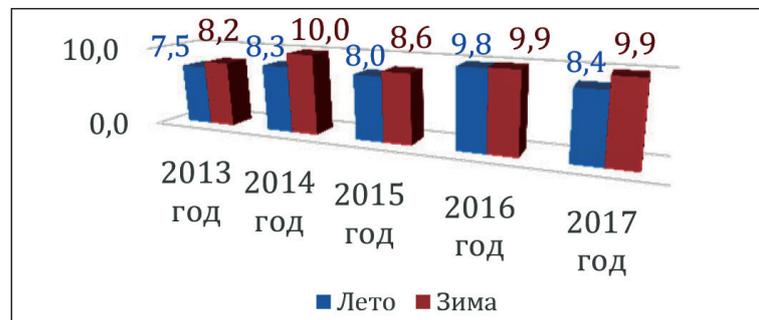


Рис. 5. Средние скорости при переходе из Карского моря в район пролива Обская губа (обход острова Белый) в 2013 – 2017 гг.

Обсуждение (Discussion)

Следует отметить, что начиная с 2012 г. количество крупнотоннажных судов ледового класса Arc7 с осадкой более 10 м увеличилось в два раза (с 12 судов в 2012 г. до 24 в 2018 г.) и будет ра-

сти в ближайшие годы, в соответствии с прогнозом, до 40 судов после 2020 г. В 2017 г. в акватории СМП использовалось примерно 100 судов с ледовым классом Arc4,5 и, скорее всего, их количество не будет увеличиваться нарастающим темпом, поскольку в основной массе это суда для перевозки генеральных грузов, объем которых резко не изменяется из года в год.

Поскольку период зимней навигации составляет большую часть года, снижение скорости на мелководье необходимо рассматривать совместно с ледовыми условиями плавания, где само понятие «ледовая скорость» имеет неоднозначную трактовку [13] и зависит как от конструктивных особенностей движительной установки [13], [14], так и от большого количества других факторов.

В период зимней навигации плотность судов в акватории СМП более разреженная, поскольку по направлению залива Обская губа – Енисейский залив суда движутся в два потока, первый — через пролив Карские ворота, второй — через мыс Желания.

Для судов класса Arc7, имеющих наибольшую осадку, маршруты движения севернее острова Белый достаточно плотные (см. рис. 3) и не имеют сильной зависимости от периода навигации. Появление в 2017 – 2018 гг. пять судов проекта Ямал-СПГ, имеющих возможность самостоятельного движения во льду толщиной 2,1 м, резко увеличивает среднюю скорость движения, при паспортной скорости в 19,5 уз они свободно движутся на мелководье в условиях льда со скоростью в 10 – 12 уз.

Для судов ледового класса Arc4,5 ситуация кардинально меняется, в летний период их небольшая осадка (до 8 м) позволяет достаточно уверенно двигаться на мелководье с небольшим снижением скорости, поскольку имеется запас глубин. В период зимней навигации такие суда идут в сопровождении ледокола, их плотность значительно разряжается по сравнению с летним периодом, а скорость во многом зависит от скорости ледокола, которая заведомо выше. Это подтверждается результатами исследования [15], где авторы приводят набор фактических данных по скоростям ледокольных проводок судов с осадкой до 8 м, в том числе и в стесненных условиях. Явное снижение скорости судов ледового класса Arc4,5 происходит севернее 75°N широты, где расположена зона наибольшего распространения айсбергов, столкновение с которыми на большой скорости весьма опасно.

Сопоставляя полученные результаты с данными работы [16], где авторы предложили систему для оценки рисков плавания в полярных водах можно сделать вывод о том, что суда класса Arc4,5 вынуждены в тяжелых ледовых условиях использовать практически всю мощность судовой энергетической установки, при этом снижение скорости на мелководье не будет являться более важной задачей по сравнению с преодолением ледовых полей. Для судов класса Arc7 риски, связанные с мелководьем, будут, наоборот, более существенными по сравнению с ледовыми условиями.

Сравнение результатов гибридного моделирования [10], [11] с фактическими данными прохода нескольких судов класса YamalMax [17] в период зимней навигации 2017 – 2018 гг. и имеющих осадку в 12 м показало, что расхождение результатов моделирования и фактических данных составляет более 1,5 сут и его основной причиной является снижение скорости в районе мелководья Новосибирских островов, на остальных участках модельный и скоростной режимы совпадали.

Отдельные локальные участки севернее о. Белый крупнотоннажные суда с осадкой до 12 м, очевидно, избегают при выборе прохода. Данное обстоятельство может быть связано с наличием «опасных изобат» и сложного рельефа дна, что совпадает с работой [18].

Выводы (Summary)

1. В данной работе для исследования скоростных режимов судов в условиях стесненной осадки (мелководья) впервые был использован новый подход, который заключался в анализе движения группы судов — морского транспортного потока, тогда как в большинстве известных работ использовалось только одно расчетное судно.

2. Исследование более чем 2000 позиций судов за период 2013 – 2017 гг. показало, что снижение скорости на мелководье в среднем составляет 10 – 20 %, при этом суда с максимальной осадкой 12 м и ледовым классом Arc7 имеют наибольшее снижение скорости в период летней навигации, в ледовых условиях такое снижение несущественно по причине того, что наибольшее силовое влияние на судно оказывают преодолеваемые ледовые поля.

3. Для судов с ледовым классом Arc4,5 снижение скорости практически не зависит от периода навигации, поскольку на чистой воде судно с осадкой до 7 – 8 м имеет достаточный запас глубин, а при зимней навигации оно движется в условиях ледокольной проводки и максимальная скорость определяется скоростью ледокола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. Утв. 20.02.2013 г. (с изм. и доп.).
2. Сазонов К. Е. Влияние мелководья на ледовые качества судна / К. Е. Сазонов, А. В. Рыжков // Мир транспорта. — 2013. — Т. 11. — № 4 (48). — С. 40–47.
3. Руководство для сквозного плавания судов по Северному морскому пути. — СПб: Изд-во ГУНИО МО РФ, 1995. — 415 с.
4. Кочнев Ю. А. Оптимизация элементов танкера на ранней стадии проектирования / Ю. А. Кочнев // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. — 2010. — № 4 (83). — С. 166–173.
5. Роннов Е. П. Обоснование основных характеристик архитектурно-конструктивного типа нефтеналивного судна / Е. П. Роннов, Ю. А. Кочнев // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 5 (70). — С. 30–32.
6. Богомья В. И. Анализ некоторых эксплуатационных свойств современных крупнотоннажных судов, методов и систем их обеспечения при плавании в стесненных условиях / В. И. Богомья, В. С. Давыдов, Р. В. Кожухаренко // Водный транспорт. — 2014. — № 3 (21). — С. 23–31.
7. Сазонов К. Е. Ледовая управляемость судов / К. Е. Сазонов. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2006. — 252 с.
8. Апполонов Е. М. Исследование ледовой ходкости ледокола «Санкт-Петербург» в Карском море / Е. М. Апполонов [и др.] // Судостроение. — 2011. — № 4. — С. 9–12.
9. Сазонов К. Е. Ледовая ходкость крупнотоннажных судов / К. Е. Сазонов, А. А. Добродеев. — СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2017. — 122 с.
10. Matsuzawa T. NSR Transit Simulations by the Vessel Performance Simulator “Vesta” Part 1 Speed Reduction and Fuel Oil Consumption in the Summer Transit Along NSR / T. Matsuzawa, N. Sogihara, M. Tsujimoto, S. Uto // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions. — 2015.
11. Uto S. NSR Transit Simulations by the Vessel Performance Simulator “VESTA” Part 2 Simple Resistance Formulae of Ships in Floe Ice / S. Uto, H. Shimoda, D. Wako, T. Matsuzawa // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions. — 2015.
12. Ольховик Е. О. Информационная модель морских транспортных потоков Северного морского пути / Е. О. Ольховик, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 97–105. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-97-105.
13. Шацбергер Э. М. Классификационные документы, ледовый паспорт и ходкость судов, удовлетворяющие основным требованиям эффективности ледокольных проводок / Э. М. Шацбергер // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 2. — С. 32–37.
14. Андреев А. А. Использование конструктивных возможностей азиподов на танкерах усиленного ледового класса при плавании в Арктике / А. А. Андреев, М. Ю. Андреева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 1–14. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-1-14.
15. Goerlandt F. An analysis of ship escort and convoy operations in ice conditions / F. Goerlandt, J. Montewka, W. Zhang, P. Kujala // Safety science. — 2017. — Vol. 95. — Pp. 198–209. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.01.004.
16. Fu S. Towards a probabilistic model for predicting ship besetting in ice in Arctic waters / S. Fu, D. Zhang, J. Montewka, X. Yan, E. Zio // Reliability Engineering & System Safety. — 2016. — Vol. 155. — Pp. 124–136. DOI:

10.1016/j.res.2016.06.010.

17. Ольховик Е. О. Анализ скоростных режимов СПГ-танкеров в акватории Северного морского пути в период зимней навигации 2017 – 2018 гг. / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.

18. Афонин А. Б. Исследование факторов, влияющих на навигационную аварийность в условиях мелководья / А. Б. Афонин, И. Ю. Королев, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 735–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-8-4-735-743.

REFERENCES

1. Strategiya razvitiya Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii i obespecheniya natsional'noi bezopasnosti na period do 2020 goda.
2. Sazonov, Cyril E., and Alexander V. Ryzhkov. "Shallow water impact on ice performance of the ships." *Mir transporta* 11.4(48) (2013): 40–47.
3. *Rukovodstvo dlya skvoznogo plavaniya sudov po Severnomu morskому puti*. SPb: Izd. GUNIO MO RF, 1995.
4. Kochnev U.A. "Optimization elements of tanker on initial design stage." *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* 4(83) (2010): 166–173.
5. Ronnov, E.P., and Yu.A. Kochnev. "Obosnovanie osnovnykh kharakteristik arkhitekturno-konstruktivnogo tipa nefenalivnogo sudna." *Rechnoi transport (XXI vek)* 5(70) (2014): 30–32.
6. Bohomya, V., V. Davydov, and R. Kozhuharenko. "Analysis system properties of large vessels in critical conditions." *Vodnyi transport* 3(21) (2014): 23–31.
7. Sazonov, K.E. *Ledovaya upravlyaemost' sudov*. SPb.: TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2006.
8. Appolonov, E.M., V.A. Belyashov, K.E. Sazonov, D.S. Skryabin, and E.V. Igoshin. "Investigation of ice performance of "SaintPetersburg" icebreaker in Kara sea." *Shipbuilding* 4 (2011): 9–12.
9. Sazonov, K.E., and A.A. Dobrodeev. *Ledovaya khodkost' krupnotonnazhnykh sudov*. SPb.: Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2017.
10. Matsuzawa, T., N. Sogihara, M. Tsujimoto, and S. Uto. "NSR Transit Simulations by the Vessel Performance Simulator "Vesta" Part 1 Speed Reduction and Fuel Oil Consumption in the Summer Transit Along NSR." *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions*. 2015.
11. Uto, S., H. Shimoda, D. Wako, and T. Matsuzawa. "NSR Transit Simulations by the Vessel Performance Simulator "VESTA" Part 2 Simple Resistance Formulae of Ships in Floe Ice." *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions*. 2015.
12. Olhovik, Evgeniy O., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezikov. "Information model of maritime transport flows of the North sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 97–105. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-97-105.
13. Shatsberger, E.M. "Classification documents, ice passport and the ice capability of the vessels, which satisfy the basic requirements of the effectiveness of ice-breaker installations." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (2012): 32–37.
14. Andreev, A.A., and M.Yu. Andreeva. "Additional potential of the azipod for ice-classed tankers operating in the Arctic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 1–14. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-1-14.
15. Goerlandt, Floris, J. Montewka, W. Zhang, and P. Kujala. "An analysis of ship escort and convoy operations in ice conditions." *Safety science* 95 (2017): 198–209. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.01.004.
16. Fu, Shanshan, D. Zhang, J. Montewka, X. Yan, and E. Zio. "Towards a probabilistic model for predicting ship besetting in ice in Arctic waters." *Reliability Engineering & System Safety* 155 (2016): 124–136. DOI: 10.1016/j.res.2016.06.010.
17. Ol'khovik, Evgeniy O. "Analysis of speed regime LNG-tankers in the Northern sea route in period of winter navigation 2017-18." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 300-308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.
18. Afonin, Andrej B., Ivan Ju. Korolev, and Aleksandr L. Tezikov. "A study of the factors influencing navigational accidents in shallow water." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni*

admirala S. O. Makarova 9.4 (2017): 735–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-8-4-735-743.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ol'khovik, Evgeniy O. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 2 мая 2018 г.

Received: May 2, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-506

ASSESSMENT OF REQUIRED TECHNOLOGICAL RESOURCES BY STATISTICAL SIMULATION

O. A. Izotov, A. V. Gulyaev

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

The article deals with the issues of ensuring the efficient operation of the terminal as a platform for active interaction at the “junction” of various modes of transport. Effective engineering, planning and management of the terminal is provided by its performance, which is defined as the number of operations performed for the selected time interval. In this case, the performance is described as the random and average value entered. The transformation of mathematical methods to the adequate definition of productivity has been performed, namely, multiple experiments and statistical tests (Monte Carlo method), using the confidence interval methods, simulated simulations to generate random variables according to a given distribution law to obtain the distribution of a new random quantity, the number of technological lines for mastering the estimated volume of the operation flow of the container terminal. The results allow us to formulate methods of calculation and analytical approach in terms of assessing the requirements for the calculations that ensure the implementation of time-varying volumes of operations. At the same time, we must understand that the consequences of time exceeding the requirements over the average values of this method cannot be estimated because it requires the use of a different paradigm that takes into account the internal state of the system – simulation modeling.

As a result of the study, the difference in the calculations according to the proposed methods was no more than 5 %, which testifies the reliability and applicability of the proposed approach.

The conclusion that the use of statistical testing methods, as well as the calculation of average values (which offer regulatory computational and analytical methods) can successfully be used to evaluate the requirements for the results, providing performance dynamic time volumes transport operations in order to optimize the transport process.

Keywords: logistics, port terminal, productivity, random variable, Monte Carlo method, Moore automaton, confidence intervals method, simulated simulation.

For citation:

Izotov, Oleg A., and Alexander V. Gulyaev. “Assessment of required technological resources by statistical simulation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-50.

УДК 656.076

ОЦЕНКА ТРЕБУЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПУТЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О. А. Изотов, А. В. Гультяев

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

В статье рассмотрены вопросы обеспечения эффективной работы терминала как площадки активного взаимодействия на «стыке» разных видов транспорта. Эффективное проектирование, планирование и управление работой терминала обеспечивается его производительностью, которая определяется как количество выполненных операций за выбранный интервал времени. В данном случае производительность описана как введённая случайная и средняя величина. Выполнена трансформация математических методов к адекватному определению производительности, а именно проведены многократные эксперименты и статистические испытания (метод Монте-Карло) с использованием доверительных интервалов и имитационного моделирования для генерации случайных величин по заданному закону их распределения для получения распределения уже новой случайной величины — числа технологических линий для освоения расчетного объема потока операций работы контейнерного терминала. Полученные результаты позволя-

ют сформулировать методы расчетно-аналитического подхода в части оценки требований к расчетам, обеспечивающим выполнение изменяющихся во времени объемов операций. При этом понимается, что последствия временного превышения требований над средними значениями данным способом оценены быть не могут, так как для этого требуется использование иной парадигмы, учитывающей внутреннее состояние системы — симуляционного моделирования.

В результате проведенного исследования разница в расчетах по предложенным методикам составила не более 5 %, что свидетельствует о достоверности и применимости предложенного подхода.

Обоснован вывод о том, что применение методов статистических испытаний, так же, как и расчетов по средним величинам, согласно нормативным расчетно-аналитическим методам, может успешно служить для оценки требований результатов, обеспечивающих выполнение динамичных во времени объемов транспортных операций в целях оптимизации перевозочного процесса.

Ключевые слова: логистика, портовый терминал, производительность, случайная величина, метод Монте-Карло, автомат Мура, метод доверительных интервалов, имитационное моделирование.

Для цитирования:

Изотов О. А. Оценка требуемых технологических ресурсов путем статистического моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гульгьяев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-50.

Введение (Introduction)

Развитие транспортной отрасли и коммуникационных связей на современном этапе привели к необходимости создания интегрированной системы, отвечающей за грузоперевозки и включающей в себя не только логистику, но и систему мультимодальных перевозок, обеспечивающую перевозки на большие расстояния с меньшими затратами.

Транспорт является одной из ключевых отраслей материального производства любого государства. Как объем транспортных услуг во многом зависит от развития транспортной инфраструктуры страны, так и статус транспортной системы стимулирует повышение уровня активности самих перевозок. Поэтому актуальным является совершенствование уже имеющихся транспортных продуктов и создание новых транспортных решений для дальнейшего развития транспортно-логистического рынка [1], [2].

Рост популярности мультимодальных транспортных технологий влечёт за собой разработку новых, порой неординарных подходов к функциональным элементам данной перспективной технологии. Отметим, что идея мультимодальности подразумевает партнёрское взаимодействие различных видов транспорта «на стыке», т. е., например, на портовом терминале [3]. В связи с этим востребованной является адекватная оценка эффективности работы терминала и его производительности для обеспечения непрерывности перевозочного процесса.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Допустим, цикл некоторой технологической операции состоит из K отдельных стадий, или «движений». Например, для транспортировки груза, в том числе генерального и навалочного, между различными операционными зонами терминала это будут следующие стадии: погрузка груза на средство горизонтальной транспортировки, выполняемое в исходной операционной зоне; перемещение груза к целевой операционной зоне; разгрузка транспортного средства для укладки груза; возвращение средства горизонтальной транспортировки в исходную позицию [4], [5].

Каждое из стадий, или «движений», имеет свою длительность T_k , $k = \overline{1, K}$, и полное время выполнения операционного технологического цикла составляет, таким образом, величину

$$T_{\text{оп}} = \sum_{k=1}^K T_k. \quad (1)$$

Для проектирования, планирования и управления работой терминалов, как правило, используется не длительность операций, а ее производительность, определяемая как количество вы-

полненных операций за выбранный интервал времени $T - P_T$. Традиционным способом расчета производительности является использование формулы [6]:

$$P_T = \frac{T}{T_{\text{оп}}} = \frac{T}{\sum_{k=1}^K T_k}, \quad (2)$$

применение которой в случае детерминированных значений T_k является очевидным и корректным способом оценки производительности операций в большинстве теоретических расчетов и нормативных методик. Однако на практике все переменные T_k , $k = \overline{1, K}$ являются случайными величинами [7], а следовательно, и величина P_T является случайной.

Отсутствие математических приемов выполнения вычислений со случайными величинами, которые необходимы для получения значения производительности, заставляет использовать вместо этого средние величины. Таким образом, математическое ожидание оценивается детерминированной величиной P'_T , которая рассчитывается через средние величины T_k ($k = \overline{1, K}$). С этой целью случайная величина T_k заменяется на ее математическое ожидание: $t_k = \text{МО}[T_k]$, и производительность операции рассчитывается как

$$P'_T = \frac{T}{\sum_{k=1}^K t_k}. \quad (3)$$

Такой математический прием превращает искомую величину производительности операций из случайной в детерминированную, не позволяя судить о характере разброса значений вокруг этого значения.

Следует подчеркнуть, что полученное по этой формуле значение также не является математическим ожиданием оцениваемой величины.

Величина $\frac{1}{\sum_{k=1}^K T_k}$ есть новая случайная величина, и значение ее математического ожидания вовсе не равно обратному значению математического ожидания исходной величины, т. е.

$$\text{МО} \left[\frac{1}{\sum_{k=1}^K T_k} \right] \neq \frac{1}{\text{МО} \left[\sum_{k=1}^K T_k \right]}. \quad (4)$$

Вычисленное таким образом значение P'_T в лучшем случае приближает математическое ожидание искомой производительности операций, но неизвестно с какой точностью и с каким разбросом вокруг этого, возможно, смещенного значения. Как следствие, для формирования закона распределения случайной величины — производительности операции — при известном законе распределения длительности составляющих ее движений приходится использовать специальный математический прием — метод Монте-Карло [8], [9].

Суть метода статистических испытаний, или метода Монте-Карло, в данном случае состоит в том, чтобы последовательно генерировать значения случайных величин — длительности движений, составляющих операцию, в соответствии с индивидуальным законом их распределения. Сгенерированные данные суммируются, что позволяет получить длительность цикла операции в ее единичной реализации. Далее выполняется генерация следующего набора движений, и время ее цикла складывается с предыдущими показателями времени. Как только это суммарное время превысит интервал расчета производительности T , генерация для данного статистического испытания прекращается. Общее количество выполненных в течение этого интервала

времени операций составляет конкретное значение искомой случайной величины — производительности операций, полученное в единичном статистическом испытании. Эти статистические испытания проводятся многократно, что позволяет построить гистограмму распределения и с ее помощью определить частоту наблюдаемых значений. С ростом числа испытания данная частота будет приближаться к плотности вероятности искомой случайной величины — производительности операций.

Для определения необходимого объема статистических испытаний используется идея *метода доверительных интервалов* [10]. При недостаточном количестве испытаний полученные гистограммы обладают высокой вариативностью: повторение серии экспериментов для такого же количества испытаний даст гистограмму, значительно отличающуюся от предыдущей. С ростом объема выборки (числа испытаний в серии) полученные гистограммы начинают отличаться друг от друга все меньше и меньше. Можно ввести меру близости гистограмм (например, квадратичное отклонение) и установить значение, достижение которого будет свидетельствовать о необходимой точности.

Результаты (Result)

В случае конкретной реализации метода предполагается, что операция состоит из следующих четырех стадий, или движений: погрузка, транспортировка, выгрузка, возврат. Пусть длительность соответствующих движений определена экспериментальным путем в результате хронометража и описывается величинами, показанными на рис. 1.

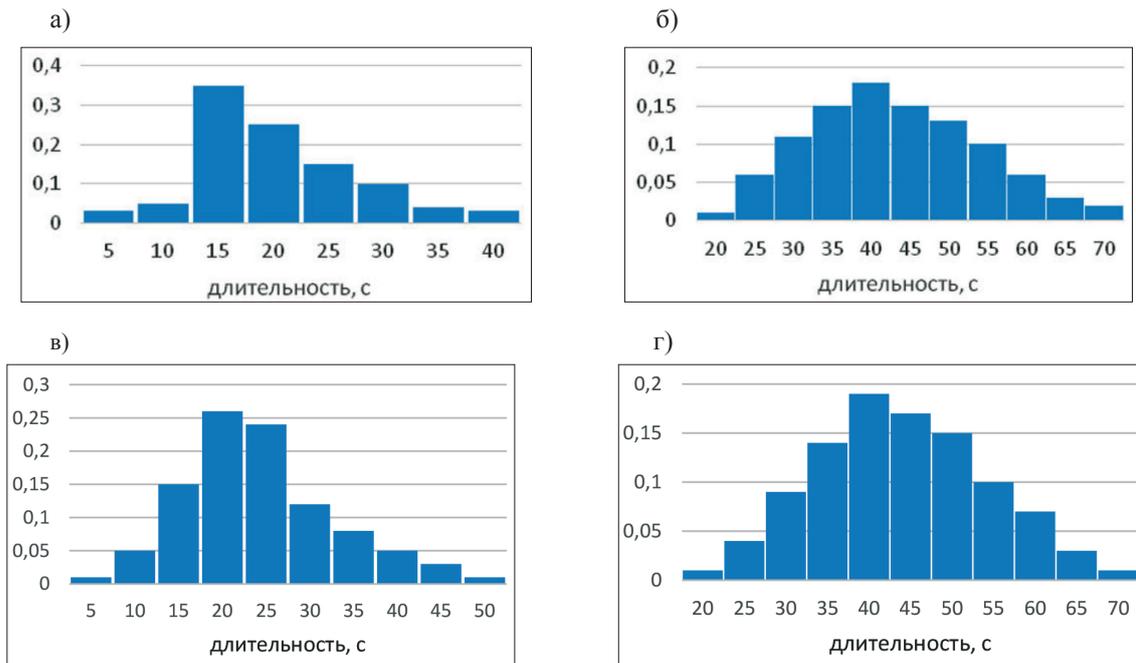


Рис. 1. Описание случайных величин:

а — длительности движения T_1 (погрузка); б — длительности движения T_2 (транспортировка);

в — длительности движения T_3 (выгрузка); г — длительности движения T_4

Условные обозначения: 0,1; 0,2, 0,3, 0,4 и т. д. по оси ординат — интервалы вероятности

Для приведенных на рис. 1 примеров средние математические ожидания составляют $MO[T_1] = 20,2$; $MO[T_2] = 43,1$; $MO[T_3] = 24,2$; $MO[T_4] = 43,9$.

Генерация, выполненная в объеме ста статистических испытаний, позволяет получить оценку случайной величины — производительности операций, приведенной на рис. 2, а. Если повторить эксперимент на такой же выборке, то полученная оценка будет отличаться от показанной на рис. 2, б.

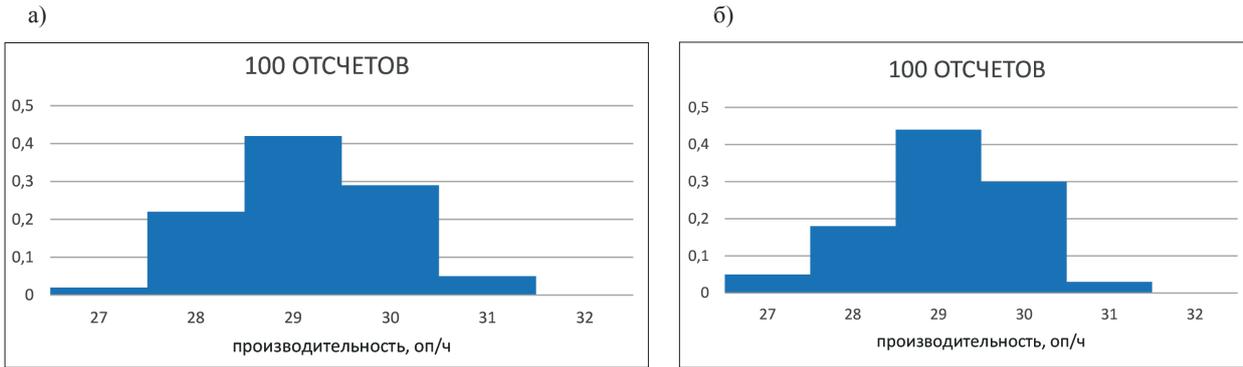


Рис. 2. Характеристика производительности как случайной величины:
 а — эксперимент 1; б — эксперимент 2

С ростом объема выборки статистических испытаний вариативность полученных кривых начинает снижаться (рис. 3). На этом рисунке каждая строка соответствует одному испытанию, а каждый столбец — различному объему выборок в нем. Видно, что при росте количества испытаний вариативность снижается (правый столбец показывает почти идентичные формы распределения).

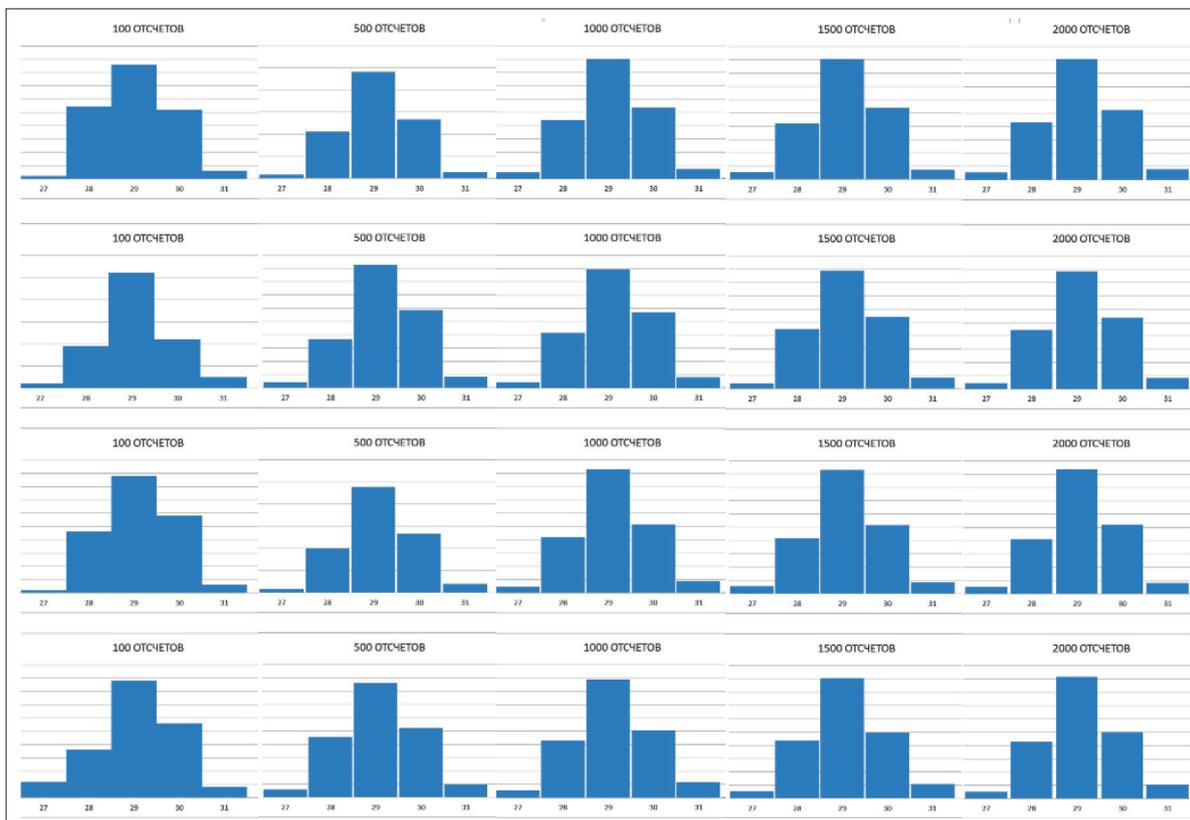


Рис. 3. Снижение вариативности оценок с ростом объема выборок

Для определения статистической достоверности выборки и, таким образом, момента прекращения испытаний в качестве меры близости между частотами распределений используется среднее квадратическое отклонение (СКО). Введем его следующим образом. Пусть p_i^m — значение разряда i в гистограмме, характеризующей частоту производительности, полученную в результате некоторого испытания n . Тогда расстоянием между испытаниями n и m назовем величину, определяемую по формуле

$$R_{m,n} = \sqrt{\sum_{i=1}^I (p_i^n - p_i^m)^2}. \quad (5)$$

На рис. 4 показано расстояние между частотами распределения, полученными для статистических испытаний объемом в 100, 500, 1500, и 2000 отсчетов.

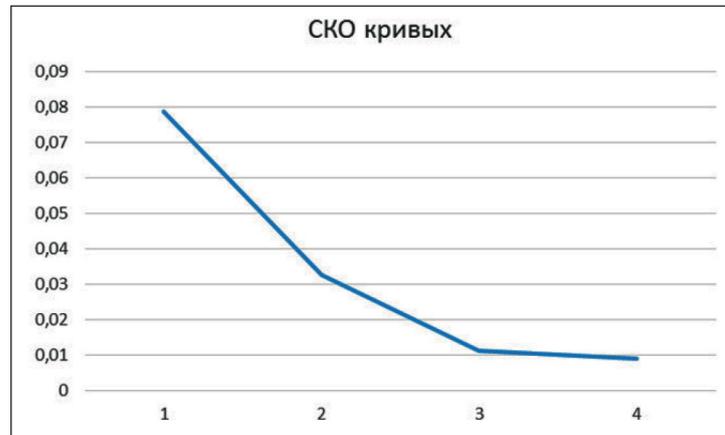


Рис. 4. Уменьшение расстояния между испытаниями с ростом объема выборки

Производительность технологической линии, рассчитанная по средним величинам (в соответствии с нормативными расчетно-аналитическими методами) [11], [12], для данного примера

$$P_T' = \frac{T}{\sum_{k=1}^K t_k} = \frac{3600}{20,2 + 43,1 + 24,2 + 43,9} = 27,8 \text{ оп./ч.}$$

Определенное с помощью статистических испытаний значение составляет значение $P_T = 29,1$, т. е. различие между оценками производительности составляет $\frac{29,1 - 27,8}{27,8} = 5\%$.

Обсуждение (Discussion)

Полученная оценка случайной величины P_T позволяет оценить число технологических линий, необходимых для обеспечения заданного объема операций в некоторый период $T_{\text{зад}} \gg T$. Обозначив этот объем как $Q_{\text{зад}}$, можно выразить среднюю потребность в обработке за интервал

$$T \text{ на протяжении периода } T_{\text{зад}}, \text{ как } q = \frac{Q_{\text{зад}}}{T_{\text{зад}}} = Q_{\text{зад}} \cdot \frac{T}{T_{\text{зад}}}.$$

Традиционным и единственным способом получения оценки числа требуемых технологических линий является формула $n = \frac{q}{P_T}$. В то же время, как и в предыдущем случае, в ней участвуют случайные величины: производительность P_T , определенная по изложенной ранее методике, и поток q за интервал T , значения которого также колеблются вокруг некоторого среднего значения

$$Q_{\text{зад}} \cdot \frac{T}{T_{\text{зад}}}.$$

Использование такого же метода генерации случайных величин по заданному закону их распределения позволяет получить распределение новой случайной величины — числа технологических линий для освоения расчетного объема потока операций. Результат проведения указанной процедуры на примере потока q в течение интервала T на уровне 100 операций показан на рис. 5.

Использование расчетно-аналитического подхода дает число технологических линий $n' = \frac{100}{27,1} = 3,6$. Как показывают расчеты и видно на рис. 5, даже математическое ожидание случайной величины составляет значение 3,8 технологических линий, т. е. нормативная методика дает заведомо заниженное число технологических линий.

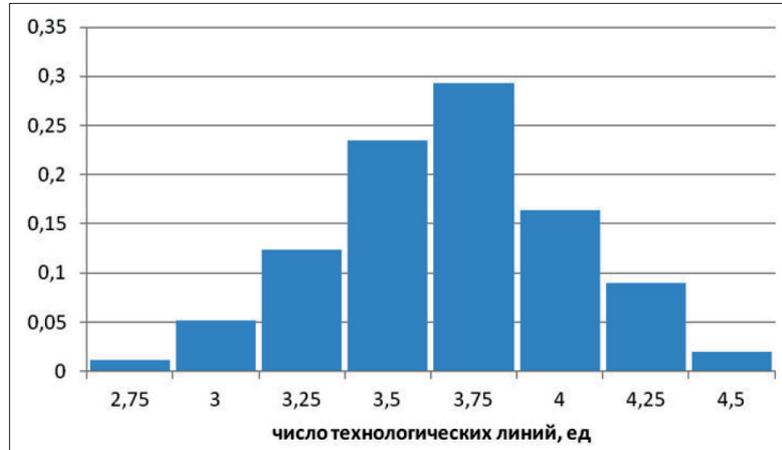
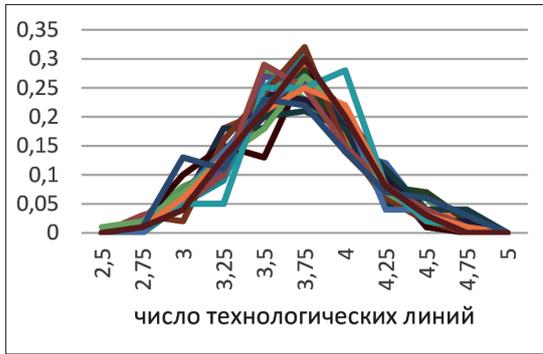


Рис. 5. Распределение искомой случайной величины n — числа технологических линий

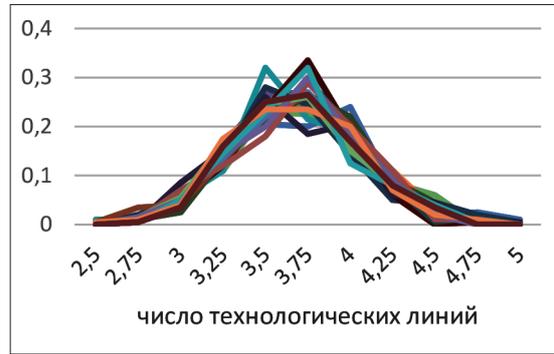
Выполним для данного расчета также анализ статистической достоверности получаемых результатов. С этой целью выполним генерацию расчетных значений на выборках разного объема. Для выборки каждого объема проведем по двадцать независимых статистических испытаний, в результате которых будут получены индивидуальные значения гистограмм, характеризующих распределение случайной величины, пример которой был приведен на рис. 5.

Каждая из этих двадцати гистограмм для выборки одного объема будет несколько отличаться от другой в этом кластере, поскольку ее получение носит случайный характер. Можно ожидать, что с ростом объема выборки различия между ними будут уменьшаться. Проведенные эксперименты подтверждают эту гипотезу (рис. 6). Как видно из рисунка, при выполнении статистических испытаний на выборке более 400 расчетных значений индивидуальные гистограммы начинают практически повторять друг друга, т. е. расстояние между ними стремится к нулю. Это позволяет предложить другую интерпретацию эмпирического принципа доверительных интервалов. Проведем K статистических испытаний на выборке объема N , т. е. получим K различных гистограмм вида, показанного на рис. 5 и 6. Пусть каждая гистограмма состоит из I разрядов и значение частоты для разряда i в выборке k есть p_i^k . Тогда для каждого разряда i можно определить среднее значение $p_i^0 = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K p_i^k$. Суммарный разброс значений частоты в рассматриваемом разряде i можно характеризовать суммой отклонений от этого среднего значения, т. е. дисперсией этого разряда, или $\sum_{k=1}^K (p_i^k - p_i^0)^2$. Суммарное отклонение во всех разрядах составит $\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (p_i^k - p_i^0)^2$, откуда СКО $\sigma_N = \sqrt{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (p_i^k - p_i^0)^2}$ будет являться мерой разброса гистограмм, полученных при генерации на объеме расчетных значений N . Пример вычисления значения σ_N как функции от объема выборки N приведен на рис. 7. Из этого рисунка видно, что разброс при значениях объема выборки, начиная с 400 практически отсутствует, что определяет необходимый объем статистических испытаний. Указанный вывод является объективным подтверждением интуитивного представления, приведенного на рис. 6.

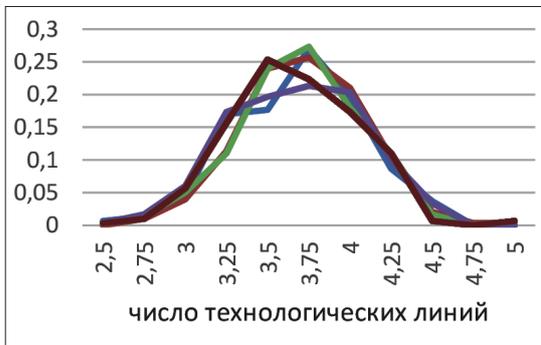
а)



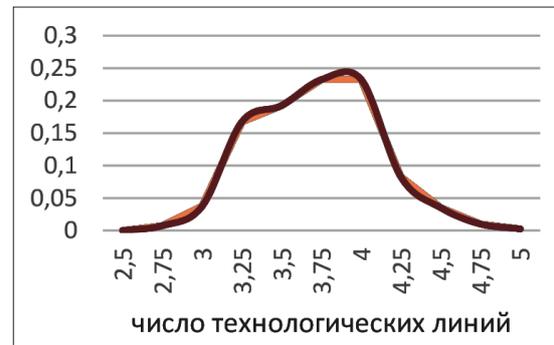
б)



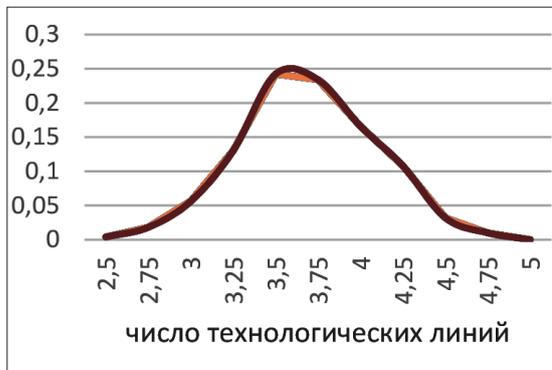
в)



г)



д)



е)

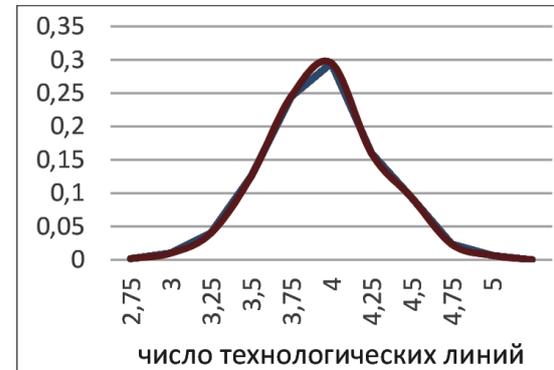


Рис. 6. Гистограммы случайной величины n для различного объема выборок N :
а — число выборок $N = 100$; б — число выборок $N = 200$; в — число выборок $N = 300$;
г — число выборок $N = 400$; д — число выборок $N = 500$; е — число выборок $N = 600$

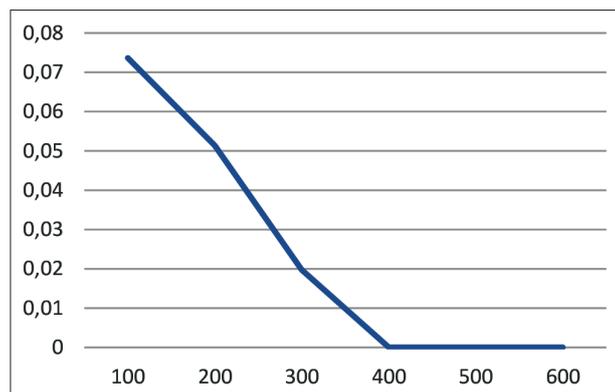


Рис. 7. Среднее квадратическое отклонение как функция от объема выборки

Приведенные ранее результаты касались уточнения методов расчетно-аналитического подхода в части оценки требований к результатам, обеспечивающим выполнение изменяющихся во времени объемов операций [13]. В то же время последствия временного превышения требований над средними значениями данной методикой оценить невозможно [14]. Для решения этой задачи требуется использование *иной парадигмы, учитывающей внутреннее состояние системы*, — симуляционного моделирования, составляющего следующий этап исследования.

Выводы (Summary)

1. Традиционный способ получения оценки числа требуемых технологических линий предполагает использование такой случайной величины как производительность самой технологической линии, значение которой колеблется вокруг некоторого среднего значения.

2. Использование предложенного метода генерации случайных величин по заданному закону позволяет получить распределение новой случайной величины — числа технологических линий для освоения расчетного объема потока операций. При этом разница в предложенных методах расчета производительности технологической линии составляет всего 5 %.

3. Применение методов статистических испытаний, так же, как и расчетов по средним величинам, в соответствии с использованием нормативных расчетно-аналитических методов, может успешно использоваться для оценки требований к результатам, обеспечивающим выполнение изменяющихся во времени объемов транспортных операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соляков О. В. Особенности развития национальных морских портов / О. В. Соляков, О. А. Изотов, В. В. Якунчиков // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15. — № 4 (71). — С. 110–121.
2. Robinson R. Ports as elements in value-driven chain systems: the new paradigm / R. Robinson // Maritime Policy & Management. — 2002. — Vol. 29. — Is. 3. — Pp. 241–255. DOI: 10.1080/03088830210132623.
3. Кузнецов А. Л. Эволюция показателей, характеризующих эксплуатационную работу портов и терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 909–924. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-909-924.
4. Майоров Н. Н. Исследование состояний контейнерного терминала на основе транспортной модели и имитационного моделирования / Н. Н. Майоров, А. В. Кириченко, В. А. Фетисов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 7–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-7-15.
5. Wil van der Aalst. Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes / Wil van der Aalst. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. — 352 p.
6. Деружинский Г. В. Концептуальный анализ моделей создания региональных логистических центров в транспортно-распределительных узлах / Г. В. Деружинский // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2012. — № 1 (1). — С. 55–62.
7. Кузнецов А. Л. Расчет времени ожидания и занятости причала для произвольных судов, неоднородных причалов и произвольных характеристиках потока судов / А. Л. Кузнецов, А. Н. Китиков, С. Н. Протопович // Транспортное дело России. — 2013. — № 1. — С. 36–40.
8. Бонтарюк М. В. К вопросу о новых направлениях развития портовой инфраструктуры / М. В. Бонтарюк, С. И. Кондратьев // Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2016. — № 1 (14). — С. 47–49.
9. Perego A. ICT for logistics and freight transportation: a literature review and research agenda / A. Perego, S. Perotti, R. Mangiaracina // International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. — 2011. — Vol. 41. — Is. 5. — Pp. 457–483. DOI: 10.1108/09600031111138826.
10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. — М.: Высш. шк., 2013. — 479 с.
11. РД 31.3.01.01-93. Руководство по технологическому проектированию морских портов. — М., 1993.
12. Фетисов В. А. Исследование и реализация оптимального варианта работы портовой логистической системы с использованием имитационных моделей систем массового обслуживания / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3. — С. 3–7.

13. Кузнецов А. Л. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 320 с.
14. Мицель А. А. Исследование операций и методы оптимизации: в 2 ч. / А. А. Мицель. — Томск: Изд. ТУСУР, 2016. — Ч. 1. — 167 с.

REFERENCES

1. Soliakov, Oleg V., Oleg A. Izotov, and Vladimir V. Yakunchikov. "Features of development of national seaports." *World of Transport* 15.4(71) (2017): 110–121.
2. Robinson, Ross. "Ports as elements in value-driven chain systems: the new paradigm." *Maritime Policy & Management* 29.3 (2002): 241–255. DOI: 10.1080/03088830210132623.
3. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "The evolution of indicators describing the operation of ports and terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 909–924. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-909-924.
4. Maiorov, Nikolai Nikolaevich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Vladimir Andreevich Fetisov. "Research operational management container terminal based on the transport model and simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(37) (2016): 7–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-7-15.
5. Wil van der Aalst. *Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
6. Deruzhinskiy, G.V. "Models conceptual analysis of founding regional logistic centers in transportation distributional junctions." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 1(1) (2012): 55–62.
7. Kuznetsov, A., A. Kitikov, and S. Protopovich. "Timing and employment expectations berth for arbitrary ships heterogeneous berths and any characteristic flow of vessels." *Transport business of Russia* 1 (2013): 36–40.
8. Botnaryuk, M.V., and S. Kondratiev. "To the question of the new directions of port infrastructure development." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 1(14) (2016): 47–49.
9. Perego, Alessandro, Sara Perotti, and Riccardo Mangiaracina. "ICT for logistics and freight transportation: a literature review and research agenda." *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 41.5 (2011): 457–483. DOI: 10.1108/09600031111138826.
10. Gmurman, V.E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika*. M.: Vysshaya shkola, 2013.
11. Russian Federation. Manual RD 31.3.01.01-93. Guide to Design of Seaports. M., 1993.
12. Fetisov, V.A., and N.N. Maiorov. "Research and realization of an optimum variant of work of port logistical system, using imitating models of systems of mass service." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3 (2012): 3–7.
13. Kuznetsov, A.L., A.V. Kirichenko, and A.A. Davydenko. *Morskaya konteynernaya transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.
14. Mitsel', A.A. *Issledovanie operatsii i metody optimizatsii: in 2 parts. Chast' 1*. Tomsk: Izd. TUSUR, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Гультяев Александр Вадимович — аспирант
Научный руководитель: Изотов Олег Альбертович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: alex_gulyaev@inbox.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Gulyaev, Alexander V. — Postgraduate
Supervisor: Izotov, Oleg A.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: alex_gulyaev@inbox.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 мая 2018 г.
Received: May 15, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519

STOCHASTIC METHOD FOR SEA PORT STORAGE CAPACITY CALCULATION

S. S. Valkova

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

Deals with the development and expanding of the analytical calculation method of the assessment of the characteristics of the sea port's cargo storage. The idea of the method is based on the transfer from determined values to stochastic ones. Traditional methods provide the resulting parameters in the form of constants, which explains why the correspondent approach is referred to as "static technique". The static values do not permit to form the perception of the possible range of dispersion of the characteristics around the mean values caused by random fluctuation of the input data for calculation. Accordingly, it does not provide any ways to study the sensitivity of the end results to the inaccuracy and indeterminacy of the primary values. The growth of the demands for the quality of the results of the technologic design procedure translates into the needs to receive all the parameters' assessments not in the form of constant values, but functional dependencies, describing possible methodological variety and stochastic fluctuations of input data. In the first head, this method should be practiced for calculation of the primal basic values which serve as the input for following flow calculation procedure, thus determining all main operational characteristics of the infrastructural object under design. Aiming at this target, in the beginning of the study main cargo operational functions of the sea port are analyzed, which enables to identify the cargo storage as the main element involved in their realizations. Based on this reasoning, the main operational lows govern the sea port's cargo storage operations. These lows take form of differential and integral equations and serve as the main tools in the study of the behavior of the cargo volume stored in the storage facilities of the sea trade port. This study is described in small details in the paper. The discussion of the results allows to conclude that as a result it is possible to obtain not only more accurate mean values, but also to estimate the spread around them

Keywords: sea port, storage, simulation, Monte-Carlo technique.

For citation:

Valkova, Svetlana S. "Stochastic method for sea port storage capacity calculation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.

УДК 656:6

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВМЕСТИМОСТИ СКЛАДА МОРСКОГО ПОРТА

С. С. Валькова

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

Описан способ уточнения результатов расчетно-аналитического подхода к оценке параметров грузового склада морского порта, суть которого заключается в замене детерминированных величин случайными. Традиционные методы дают результирующие значения в виде констант, поэтому соответствующий подход в современном проектировании носит название «статистического». Статические значения не дают представлений о возможном разбросе изучаемых характеристик при случайных вариациях исходных данных, т. е. не позволяют судить об их чувствительности к неточности и неопределенности входных величин. Ужесточение требований к качеству результатов технологического проектирования в части инструментария расчетных методов выражается в необходимости получать все промежуточные и окончательные значения не в виде констант, а в виде соответствующих функций, оценивающих возможную методическую вариативность расчетов и случайные флуктуации используемых в них данных. В первую очередь такой метод должен быть применен для расчета наиболее важных базовых величин, которые далее вовлекаются в потоковые вычисления технологических расчетов и определяют выходные структурные параметры всего проекта. С этой целью в начале статьи анализируются основные функции,

выполняемые морским портом в отношении обработки проходящих через него грузов, и выявляется ключевая роль грузового склада в их реализации. На основании этого формулируются законы функционирования склада, описываемые соответствующими интегральными, дифференциальными и конечно-разностными уравнениями. Эти уравнения служат основным инструментом исследования динамики поведения объема хранения груза на складе, детально описанным в статье. Обсуждение полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что в результате можно получить не только более точные средние значения, но и оценивать разброс вокруг них.

Ключевые слова: морские порты, склады, моделирование, методы Монте-Карло.

Для цитирования:

Валькова С. С. Вероятностно-статистический метод расчета вместимости склада морского порта / С. С. Валькова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.

Введение (Introduction)

В современных глобальных транспортно-логистических сетях морские порты играют ключевую роль, во многом определяя основные характеристики их функционирования [1]. Вопросы оптимизации работы морского порта являются предметом многих исследований, основа которых была заложена международным научным сообществом уже давно [2]. В то же время темпы развития индустрии морских перевозок настолько высоки, что технический прогресс опережает развитие фундаментальных исследований в этом направлении.

Появление новых технологий и изменение требований к эксплуатационным характеристикам морских портов заставляет более тщательно изучать все аспекты и составляющие элементы сложной системы, которую образует современный морской терминал [3]. Центральным элементом этой системы является грузовой склад, технологические параметры которого должны соответствовать не только изменяющимся грузопотокам, но и новой роли морских портов в системе товаропродвижения [4]. Данная задача не решается в полной мере с помощью использования существующего инструментария технологического проектирования, поэтому выбранный в качестве объекта исследования метод вероятностно-статистического расчета вместимости склада представляется актуальным.

Методы и материалы

По своему положению в логистической цепи поставок склад морского порта выполняет все или часть базовых функций [3], а именно:

- передача грузопотоков между видами транспорта (функция интерфейса);
- согласование размеров транспортных партий (технологическое хранение);
- сглаживание неравномерности движения транспортных средств (буферная функция);
- коммерческое хранение грузов (складская функция);
- преобразование грузопотоков (логистическая функция).

В то же время единым интегральным параметром, характеризующим работу склада, является объем хранимого в нем в каждый момент груза [5] – [6]. Изменение этого параметра во времени, т. е. то, что называется *поведением* в системном смысле, является совокупным результатом действия всех факторов, относящихся к перечисленным ранее функциям. В этом смысле очевидной становится задача идентификации и оценки степени влияния всех факторов, включенных в соответствующие выполняемым функциям кластеры.

Для решения этой задачи следует отметить, что динамика изменения объема хранимого на любом (обобщенном) складе груза определяется всего лишь двумя процессами: поступлением его на склад и вывозом со склада. По сути, физический объем хранимого груза в момент времени t есть мгновенная разница между количеством завезенного и количеством вывезенного груза к этому моменту времени, т. е.

$$E(t) = I(t) - O(t), \quad (1)$$

где $E(t)$ — объем хранения груза на складе в момент времени t ; $I(t)$ — объем завезенного на склад груза к моменту времени t ; $O(t)$ — объем вывезенного со склада груза к моменту времени t .

Величины, использованные в уравнении для склада (1), отсчитываются от некоторого произвольного момента времени $t = 0$, который характеризует начало деятельности соответствующего объекта. В то же время применение таких абсолютных величин является крайне неудобным и не используется в практике работы морских портов. Вместо этого используются величины относительные, а именно изменения значений объемов за некоторый выбранный интервал времени Δt : год, месяц, смена, час.

Если обозначить как $\Delta e(t)$, $\Delta i(t)$, $\Delta O(t)$ приращения объема хранимого, поступающего и убывающего груза, то соотношение (1) очевидным образом сохранится, преобразуясь в его конечно-разностный аналог:

$$\Delta e(t) = \Delta i(t) - \Delta O(t). \quad (2)$$

Действительно, изменение количества хранимого на терминале груза в сторону увеличения или уменьшения определяется разностью поступившего и убывшего на терминал груза не за весь период $[0, t]$, а за произвольный интервал $\Delta t \in [0, t]$.

Переход от значений $\Delta E(t)$, $\Delta I(t)$, $\Delta O(t)$ к относительным величинам в рассматриваемом случае близок к операции дифференцирования, т. е.

$$\frac{\Delta E(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta I(t)}{\Delta t} - \frac{\Delta O(t)}{\Delta t} \quad (3)$$

и при $\Delta(t) \rightarrow 0$ действительно им является:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{dI(t)}{dt} - \frac{dO(t)}{dt}. \quad (4)$$

Интерпретация выражений (3) и (4) не вызывает сложности: они означают, что скорость изменения объема складирования $e(t)$ есть разница между скоростями роста $i(t)$, т. е. скоростью поступления груза на склад и скоростью убывания $O(t)$ — скоростью вывоза груза со склада:

$$e(t) = i(t) - O(t). \quad (5)$$

Разница в уравнениях (3) и (5) состоит лишь в том, что в первом случае используются разностные, а во втором — дифференциальные уравнения.

Дифференцированием уравнения (1) получим уравнение (5), которому, как известно, соответствует целое семейство первообразных функций, т. е. уравнений вида

$$E(t) = \int_0^t e(t) dt = \int_0^t i(t) dt - \int_0^t O(t) dt = I(t) - O(t) + C, \quad (6)$$

где C — произвольная константа.

Действительно, разные склады, описываемые одним и тем же уравнением (6), будут демонстрировать одну и ту же динамику изменений, определяемую уравнением (5), но при этом абсолютные значения объемов хранения у них будут отличаться на произвольную постоянную величины C . Это рассуждение демонстрирует существующую методическую проблему: любые измерения, включая результаты, полученные моделированием, представлены величинами $i(t)$ и $O(t)$, в то время как делать выводы необходимо о величине $E(t)$.

В то же время полученный вывод о независимости этой величины от динамики входных и выходных величин позволяет принять решение о том, что именно эта постоянная величина характеризует компоненту склада, не зависящую от неравномерностей и размера транспортных партий, т. е. компоненту объема складирования, отвечающую за внешнее (коммерческое) складирование.

Следующий вывод, который можно сделать на основе сформулированных положений, состоит в том, что колебания объема хранимого на складе груза определяются пространственно-временными различиями величин $i(t)$ и $O(t)$. Под пространственными различиями понимается амплитуда величин, определяемых разбросом физического количества прибывающего и убывающего груза в рассматриваемый дискретный период, под временными — распределение объемов по отдельным дискретам этого периода. Очевидно, что пространственная компонента связана с различными типовыми размерами транспортных партий по видам и их флуктуациями, в то время как временная компонента связана с равномерностью поступления транспортных средств или отклонений от этой равномерности.

Пусть груз, составляющий некоторую произвольную партию n объема V_n , хранится на складе неравномерно: часть партии α_1 хранится в течение времени T_1 , часть партии α_2 хранится в течение времени T_2 и т. д. Хранение на складе партии объемом V_n требует, таким образом, определенное число место-суток, которое назовем *работой склада по хранению партии*:

$$a_n = \sum_{i=1}^l V_n \alpha_i T_i = V_n \sum_{i=1}^l \alpha_i T_i. \quad (7)$$

Величина $\sum_{i=1}^l \alpha_i T_i$ представляет собой средневзвешенное значение длительности хранения отдельных частей грузовой партии, или средний срок хранения груза на складе:

$$T_n = \sum_{i=1}^l \alpha_i T_i. \quad (8)$$

Иными словами, средний срок хранения груза в партии V_n представляет собой такой временной интервал, который при хранении постоянного объема V_n осуществляет ту же складскую работу, что и при неравномерном хранении, или

$$a_n = V_n \sum_{i=1}^l \alpha_i T_i = V_n T_n. \quad (9)$$

Общий объем работы склада при хранении всех партий $V_n, 1, \dots, N$ есть

$$A = \sum_{n=1}^N a_n = \sum_{n=1}^N V_n T_n. \quad (10)$$

Среднее значение объема хранения груза E есть величина, которая за время T дает то же значение объема работы склада, т. е.

$$ET = A. \quad (11)$$

Если рассматриваемый период T составляет год, т. е. $T = 365$ сут, все партии равны между собой: $V_n = V$, и средний срок хранения T_n для всех партий одинаков: $T_n = T_{xp}$, то имеем

$$E \cdot 365 = \sum_{n=1}^N V_n T_n = NV_n T_n \quad (12)$$

или

$$E = \frac{NVT}{365}. \quad (13)$$

Величина $NV = Q_T$ есть объем груза, проходящего через склад за период $T = 365$ сут, откуда имеем

$$E = \frac{NVT_{xp}}{365} = \frac{Q_{год} T_{xp}}{365}. \quad (14)$$

С другой стороны, величина $T_{инт} = \frac{T}{N} = \frac{365}{N}$ есть средний интервал между поступлениями грузовых партий на склад, откуда имеем

$$E = \frac{NVT_{xp}}{365} = \frac{VT_{xp}}{T_{инт}}. \quad (15)$$

Обе выведенные формулы (14), (15) допускают различную интерпретацию. Формула (14) может быть переписана в виде

$$Q_{год} = E \frac{365}{T_{xp}}. \quad (16)$$

Величина $\frac{365}{T_{xp}}$ в логистике известна как «оборотчиваемость склада», она показывает сколько раз склад полностью возобновляет свое содержимое за рассматриваемый период времени (в данном случае за год). Умножение среднего объема хранения склада E на этот показатель дает грузопоток за этот период $Q_{год}$.

Не менее очевидна интерпретация второй полученной формулы (15): величина $\frac{T_{xp}}{T_{инт}}$ показывает, сколько партий в среднем прибывает на склад за время хранения одной партии, т. е. сколько партий должно одновременно находиться на складе. Умножив это число на объем партии V , получим среднюю величину объема единовременного хранения E .

Итак, совпадение значений полученных соотношений (8) и (10) при внесении в них упрощающих предположений (12) с известными и используемыми в расчетно-аналитических методах формулами (15) и (16) подтверждает корректность сделанного вывода. В то же время зависимости соотношений (8) и (10) для целей, поставленных в настоящем исследовании, оказываются намного более продуктивными. В частности, введенные понятия (*срок хранения груза на складе и интервал его поступления*) позволяют объективно разграничить *технологическое хранение*, необходимое для согласования равномерной интенсивности обработки в порту смежного транспорта и пиковой обработки морских судов, и *внешнее коммерческое хранение*.

Обоснование этого заключается в следующем. Партии прибывают на склад морского порта или убывают со склада с интервалом $T_{инт}$. Если партия не хранится на складе сверх того времени, которое необходимо только для обслуживания судна в порту, то она должна целиком формироваться или расформировываться в течение этого интервала времени. При равномерном поступлении на терминал смежного наземного транспорта интенсивность накопления или убытия груза на складе постоянна, а сам объем линейно возрастает от 0 до V или убывает от V до 0 по треугольному закону. Следовательно, доля технологического хранения в среднем сроке T_{xp} составляет $\frac{T_{инт}}{2}$. Таким образом, период времени, превышающий эту величину, т. е. $T_{xp} - \frac{T_{инт}}{2}$, строго говоря, является дополнительным хранением.

Результаты (Results)

Целью оценки требований к объему единовременного хранения, как отмечалось ранее, является проактивное развитие инфраструктурных мощностей, которое требует не только значительных средств, но и длительного периода времени. При этом желательно получать не просто оценки возможных максимальных и близких к ним значений, но и распределение частот их наблюдения. Полученные ранее оценки средних значений не позволяют этого сделать, что подтверждают следующие рассуждения. Пусть, например, склад морского порта готовит к отправке судовую партию, график формирования которой показан на рис. 1.

Если эта партия является единственной в году, то среднее значение загрузки склада в этом случае составляет значение $E = \frac{NVT_{xp}}{365} = \frac{VT_{xp}}{365}$ (эквивалентное хранению 1/365 доли от работы VT_{xp} по хранению одной партии).

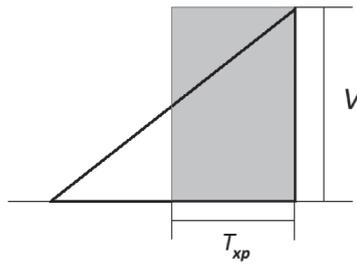


Рис. 1. Эпюра простейшей единичной партии

Если через склад проходят грузовые партии с интервалом поступления $T_{\text{инт}} = 2T_{\text{хр}}$, то динамика изменения объема хранения будет такова, как показано на рис. 2. Как следует из этого рисунка и формулы (15), средний объем запаса на склад составит величину $E = \frac{VT_{\text{хр}}}{T_{\text{инт}}} = \frac{V}{2}$.

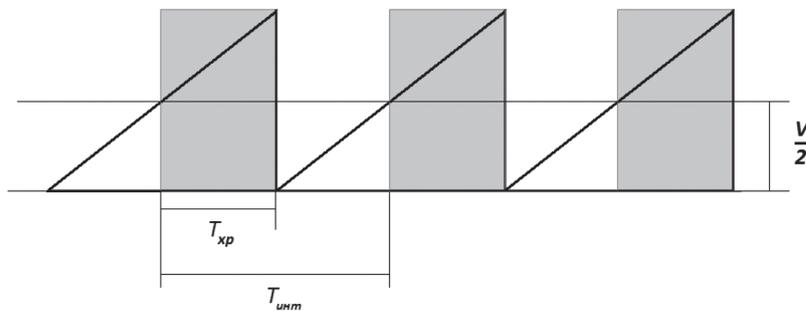


Рис. 2. Изменение объема складирования при $T_{\text{инт}} = 2T_{\text{хр}}$

Если уменьшить интервал между поступлением партий до значения граничного $T_{\text{инт}} = T_{\text{хр}}$, то средний объем хранения на складе составит $E = \frac{VT_{\text{хр}}}{T_{\text{инт}}} = V$, как это показано на рис. 3.

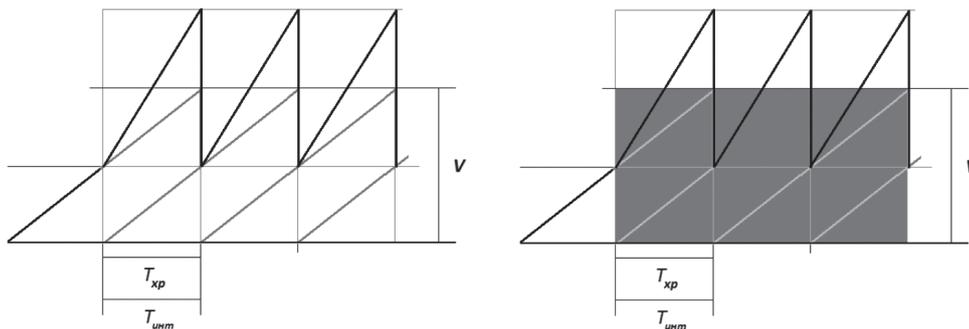


Рис. 3. Изменение объема складирования при $T_{\text{инт}} = T_{\text{хр}}$:
а — треугольная форма партии; б — прямоугольная форма партии

Дальнейшее снижение интервала прибытия партий для рассматриваемых в данном случае единичных партий вида, показанного на рис. 1, будет приводить лишь к повышению среднего уровня объема хранения, который определяется формулами (14) или (15), причем амплитуда колебаний треугольной формы вокруг этого среднего значения будет оставаться постоянной и равной $\frac{V}{2}$ (рис. 4).

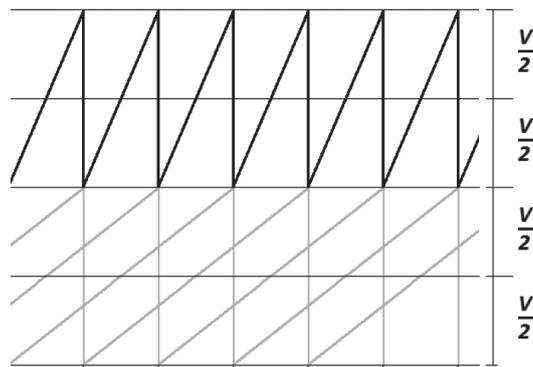


Рис. 4. Изменение объема складирования при $T_{\text{инт}} < T_{\text{хр}}$

Таким образом, для случаев простейшего треугольного закона формирования партий (1), регулярного интервала их поступления (2) и равенства их объема (3) максимальный объем хранения может быть получен добавлением к среднему значению величины указанной амплитуды, т. е.

$$E_{\text{max}} = \frac{VT_{\text{хр}}}{T_{\text{инт}}} + \frac{V}{2}. \quad (17)$$

Для рассматриваемого случая треугольного закона формирования партий время хранения является половиной времени формирования партии (времени от начала поступления груза данной партии до убытия ее со склада), т. е. $T_{\text{хр}} = 2T_{\text{форм}}$. В принятых обозначениях формула (17) может быть записана более компактно:

$$E_{\text{max}} = \frac{VT_{\text{хр}}}{T_{\text{инт}}} + \frac{V}{2} = \frac{VT_{\text{форм}}}{2T_{\text{инт}}} + \frac{V}{2} = \frac{V}{2} \cdot \left(\frac{T_{\text{форм}}}{T_{\text{инт}}} + 1 \right). \quad (18)$$

Именно такой вид формулы предлагается в нормах технологического проектирования морских портов [7] – [8]. В то же время на форму результирующей кривой оказывают более существенное влияние другие факторы из числа идентифицированных ранее.

Если при том же среднем периоде поступления партий груза на склад их отдельные значения подвержены флуктуациям, как это показано на рис. 5, а, то накопление груза будет иметь свои сгущения и разрежения относительно равномерного характера (см. рис. 5, б и в).

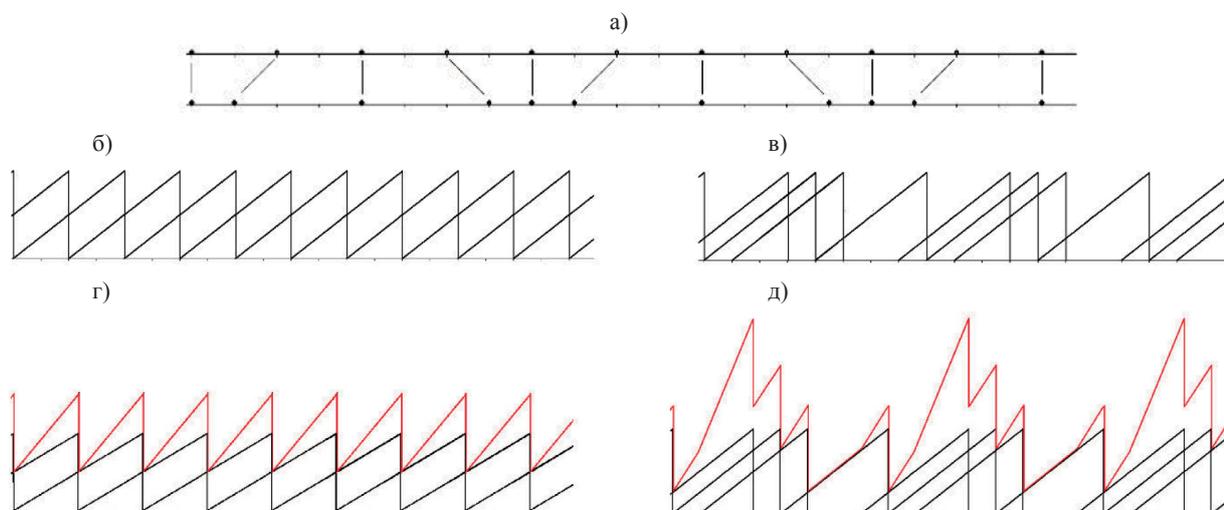


Рис. 5. Динамика изменения объема хранения при колебаниях интервала поступления:
 а — изменение регулярных и иррегулярных поступлений; б — эпюра для регулярного интервала поступления; в — эпюра для иррегулярного интервала поступления; г — суммарный объем хранения склада для регулярного интервала поступления; д — суммарный объем хранения склада для иррегулярного интервала поступления

При сохранении тех же средних значений результирующий график объема хранения будет показывать намного более высокую динамику (см. рис. 5, *з* и *д*). Аналогичный эффект будут иметь колебания размера партий вокруг среднего значения (рис. 6).

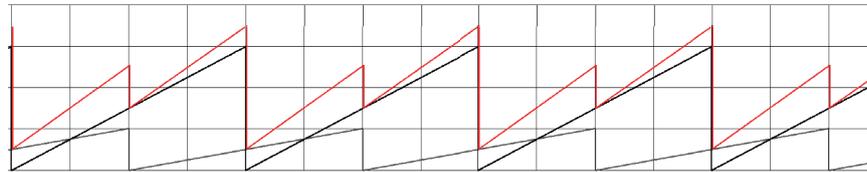


Рис. 6. Динамика изменения объема хранения при колебаниях размера партий

В соответствии с нормами технологического проектирования, расчет максимального размера склада выполняется добавлением половины размера партий, как это сделано в формуле (14), не учитывая ни действия указанных факторов по отдельности, ни их возможного совместного влияния.

В то же время, как показывают рассмотренные примеры, это влияние может быть весьма значительным и во много раз превышающим предлагаемую поправку. При этом рассмотренные примеры показывают неравномерные, но регулярные колебания значений, приводящие к появлению таких же регулярных «биений» в графиках изменения результирующих функций (см. рис. 5 и 6). Очевидно, что произвольные флуктуации значений будут приводить к иному характеру поведения результирующей функции. Задача оценки максимальных значений, решение которой требует планирования физических размеров склада как инфраструктурного элемента, предполагает использование иных методов.

Обсуждение (Discussion)

Как было установлено ранее, уравнения (14) и (15) представляют собой тождество, которое справедливо лишь для детерминированных значений входящих в эти формулы переменных. Если величины в правых частях уравнения являются случайными величинами, то случайной величиной является и выражаемое через них значение. Однако в правой части уравнения (14) находятся лишь две величины, а именно $\frac{Q_{\text{год}} T_{\text{xp}}}{365}$, в правой части уравнения (15) — три, а именно $\frac{VT_{\text{xp}}}{T_{\text{инт}}}$.

Следовательно, определяемая этими уравнениями новая случайная величина E может иметь иной статистический характер, и в этом случае уравнения (14) и (15) перестают быть тождественными.

Более того, поскольку случайные величины задаются своими законами распределения, а именно интегральной функцией или плотностью этого распределения, в алгебраические действия эти величины вовлекаться не могут. Традиционным инженерным решением данной проблемы является использование в уравнениях подобного типа значений математического ожидания соответствующих переменных, которые подставляются в уравнения типа (14) и (15). Однако при такой замене невозможно сделать вывод о распределении полученной случайной величины вокруг полученного значения, т. е. случайная величина необратимо подменяется детерминированным значением.

Иными словами, при инженерных расчетах уравнение (15) по умолчанию интерпретируется как $M[E] = \frac{[V] \cdot [T_{\text{xp}}]}{[T_{\text{инт}}]}$. Математические ожидания исходных величин в правых частях уравнений,

определяемые сбором статистических материалов, могут быть получены из справочных материалов или выбираются произвольным образом. Но здесь скрывается еще одна методическая проблема. Если даже известна произвольная случайная величина X , то математическое ожидание ее обратной величины $\frac{1}{X}$, т. е. $M\left[\frac{1}{X}\right]$, вовсе не есть $M\left[\frac{1}{X}\right]$, поскольку величина $\frac{1}{X}$ является иной

случайной величиной. Как следствие, использование арифметической операции деления в уравнении $\frac{VT_{xp}}{T_{инт}}$ будет приводить к погрешности оценки искомого значения даже при известном значении $M[T_{инт}]$.

Таким образом, использование традиционных методов расчета по рекомендуемым нормами формулам (14) и (15) имеет методическую погрешность в расчете предполагаемого центрального значения, не позволяя судить о характере случайных разбросов оцениваемой величины вокруг этого значения. Если, к примеру, в 10 случаях некоторых испытаний будет наблюдаться значение некоторой величины 50, и в 10 случаях — 950, то средним значением будет 500, т. е. величина, равноудаленная от реально наблюдаемых величин.

Предположим, что поставлена задача оценить требуемый размер склада для потока партий, имеющих одинаковый размер $V = 1000$ и характеризующихся одинаковым сроком хранения $T_{xp} = 10$ сут и одинаковым интервалом поступления $T_{инт} = 5$ сут. Формула $E = \frac{VT_{xp}}{T_{инт}}$ для выбранного примера дает значение $E = 1000 \cdot \frac{10}{5} = 2000$.

Пусть теперь интервал поступления партий $T_{инт}$ является случайной величиной, среднее значение которой составляет те же 5 сут. Объем хранения на складе E также будет являться случайной величиной, конкретные значения которой будут, как представляется, колебаться вокруг значения $E = 2000$. Рассмотрим это на числовых примерах.

Пример 1. Интервалы между поступлением партий составляют значения 2, 3, 5, 10. Средний интервал составляет величину $\frac{2+3+5+10}{4} = 5$. Расчет размера склада для каждого интервала по приведенной выше формуле дает значения 5000, 3333, 2000, 1000. Среднее значение склада в этом случае составит величину $\frac{5000+3333+2000+1000}{4} = 2833$, что значительно отличается от ожидаемых 2000.

Пример 2. Интервалы поступления составляют значения 1, 2, 8, 9. В среднем интервал составляет ту же величину $\frac{1+2+8+9}{4} = 5$. Расчет размера склада дает значения 10000, 5000, 1250, 1111. Среднее значение склада в этом случае составит величину $\frac{10000+5000+1250+1111}{4} = 4340$. Полученное значение более чем в два раза выше ожидаемого.

Как видно из этих примеров, одни и те же средние значения всех величин при разных разбросах только одной из них приводят к результатам, значительно отличающимся от расчетов по классической формуле.

В проведенных рассуждениях предполагалось, что $M\left[\frac{1}{T_{инт}}\right] = \frac{1}{M[T_{инт}]}$. В действительности, $\frac{1}{T_{инт}}$ есть новая случайная величина, значения которой составляют $\frac{1}{T_1}, \frac{1}{T_2}, \dots, \frac{1}{T_N}$. Ее среднее

значение (математическое ожидание) есть величина $\frac{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \dots + \frac{1}{T_N}}{N}$, вовсе не равная значению

$\frac{1}{\frac{T_1 + T_2 + \dots + T_N}{N}} = \frac{N}{T_1 + T_2 + \dots + T_N}$. Действительно, значения математического ожидания $\frac{1}{T_{инт}}$ в примерах

1 и 2 есть $\frac{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \dots + \frac{1}{T_N}}{N} = \frac{\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10}}{4} = 0,28$ и $\frac{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \dots + \frac{1}{T_N}}{N} = \frac{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{8} + \frac{1}{9}}{4} = 0,43$,

что при умножении на $VT_{xp} = 10000$ дает те же результаты, что и в приведенных примерах 1 и 2, что снимает кажущееся противоречие.

Если к точности расчетных значений не предъявляются особых требований и с методической погрешностью можно мириться, то подобный подход может быть использован [9] – [13]. В инженерной практике результаты получают расчетно-аналитическими методами этого класса в попытке избежать всевозможных ошибок и отклонений путем умножения на некоторый коэффициент запаса $K > 1$, который в различных дисциплинах, предметах, объектах и формулах называют по-разному, но который, по сути, является *коэффициентом незнания*. В тех случаях, когда требуется более адекватное суждение о случайном поведении оцениваемой величины, в науке используют иной подход, в основе которого лежит метод статистических испытаний, или метод Монте-Карло.

Идея метода Монте-Карло состоит в последовательной генерации значений наборов случайных величин, входящих в исследуемую зависимость, например, выраженную формулой (15). Полученная комбинация значений используется для вычисления одиночного значения функции по этой формуле, которое является результатом данного «статистического испытания». Многократное повторение таких испытаний позволяет получить массив значений этой случайной величины, статистическая обработка которого дает значение интегральной функции распределения, т. е. полностью описывает данную случайную величину.

Основным исполнительным механизмом метода Монте-Карло является генерация значений случайной величины по заданному закону ее распределения, что обычно выполняется с помощью метода обратной функции [14]. Функция распределения F случайной величины X есть вероятность того, что $X < x$, т. е. функция вида $F(x) = P(X < x)$. Областью определения функции F являются значения случайной величины, областью значений — интервал $[0,1]$, областью определения обратной F^{-1} — интервал $[0,1]$, областью значений — вероятные значения случайной величины. Если генерировать равномерно распределенные на интервале $[0,1]$ случайные числа, то значения F^{-1} будут группироваться плотнее там, где крутизна этой кривой выше, т. е. вероятность появления значений будет выше там, где выше плотность функции F , т. е. в статистическом смысле будет соответствовать заданному распределению случайной величины.

Ранее изложенное показано на рис. 7, где представлены интегральные функции распределения случайных величин: объема партии, срока хранения и интервала поступления партий, специально заданных в различном виде — как непрерывные и дискретные случайные величины.

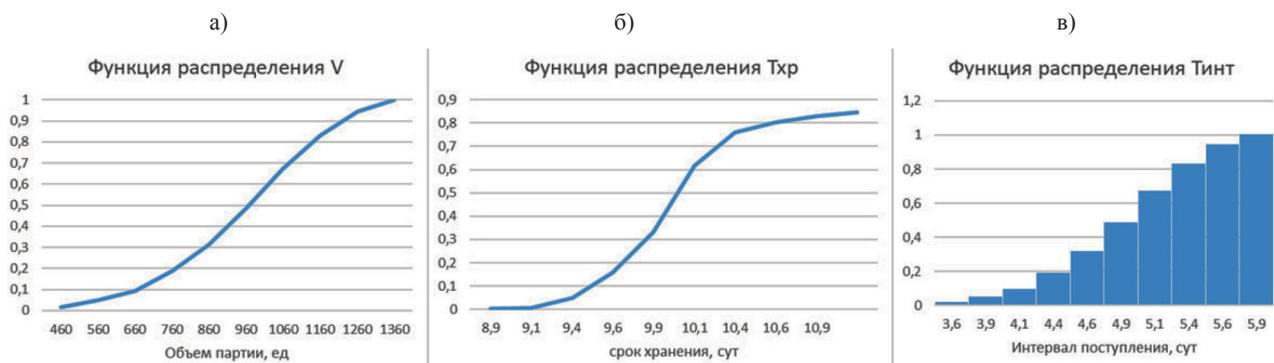


Рис. 7. Функции распределения исходных расчетных величин:
а — объема партии; б — срока хранения; в — интервала поступления

В таблице приведен пример массива статистических испытаний — сгенерированные значения исходных значений и вычисленные в каждом статистическом испытании значения объема хранения на складе E :

$N_{\text{исп}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
V	960	760	860	760	960	960	560	1060	1260	560	760	1060	760	1160	460	960	1260
T_{xp}	9,4	9,9	9,9	11,1	10,1	9,9	9,6	11,1	9,4	9,6	11,1	9,9	10,1	9,9	9,6	9,1	11,1
$T_{\text{инт}}$	4,6	3,6	4,6	4,9	4,9	4,9	4,9	4,4	4,1	5,1	4,9	4,6	5,6	5,4	5,6	4,9	3,9
E	1945,9	2070,3	1836,2	1734,4	1993,8	1944,6	1105,6	2695,4	2863,6	1051,7	1734,4	2263,2	1368,0	2131,2	787,1	1796,9	3617,4

На рис. 8 для данного примера приведен результат статистической обработки массива значений — гистограмма плотности распределения вероятности значений объема хранения на складе E .



Рис. 8. Гистограмма плотности распределения объема хранения груза на складе

Математические ожидания объема партии, срока хранения и интервала прибытия партий для примера на рис. 7 составляют, соответственно: $M[V] = 1000$, $M[T_{\text{xp}}] = 10$ сут и $M[T_{\text{инт}}] = 5$ сут, т. е. совпадают с данными рассмотренных выше примеров.

Как видно из рис. 8, значения E действительно располагаются в районе 2000 единиц, т. е. совпадают с ожидаемыми, полученными в расчетном примере. В то же время точное среднее значение, подсчитанное по массиву статистических испытаний, составляет детерминированную величину, равную 1900, а кривая на рис. 8 позволяет судить о возможных отклонениях и их вероятности, что дает возможность принимать более обоснованные инженерные и предпринимательские решения.

Выводы (Summary)

1. Динамика изменения объема хранения на грузовом складе морского порта полностью определяется интенсивностью мгновенного поступления и убытия груза, что описывается дифференциальным или конечно-разностным уравнением.
2. Способ определения динамики изменения объема хранения позволяет получить соответствующую зависимость с точностью до произвольной постоянной величины, которая математически определяется начальными условиями, а фактически отражает коммерческую компоненту хранения груза на складе.
3. Средние значения объема хранения при детерминированных исходных данных определяются несколькими инвариантными алгебраическими соотношениями.
4. Максимальные значения объема хранения в случае детерминированных величин могут быть учтены аналитическими поправками, зависящими от параметров формирования и расформирования грузовых партий.
5. При рассмотрении всех значений как случайных величин эти поправки становятся мало-значимыми, а сами математические методы утрачивают свою применимость.
6. Возможным решением является использование методов статистических испытаний, которые позволяют получать не только более точные средние значения, но и оценивать разброс вокруг них.

Заключение (Conclusion)

Ужесточение конкуренции на рынке транспортных услуг наблюдается на всех уровнях (от международного до корпоративного) и во всех сегментах (от транспортировки сырья до готовой продукции). Как следствие, в последние десятилетия кардинальным образом изменились требования к характеристикам и параметрам основных элементов инфраструктурной инфраструктуры. В полной мере это относится к морским портам, проектирование которых регламентируется нор-

мами, созданными в прошлом веке. Использование новых методов, уточняющих и развивающих привычный инструментарий технологического проектирования, позволяет достичь качественно нового уровня технико-экономических показателей работы транспортной системы государства. Примером такого инструмента, эффективность которого доказана экспериментальными исследованиями, является описанный в данном исследовании вероятностно-статистический метод расчета вместимости склада морского порта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thorensen C. A. *Port designer's handbook* / C.A. Thorensen. — London: Thomas Telford Limited, 2010. — 554 p.
2. UNCTAD *Monographs on Port Management. Monograph № 9. Multipurpose port terminals. Recommendations for planning and management.* — March 1991.
3. Кузнецов А. Л. Классификация и функциональное моделирование эшелонированных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
4. *Current issues in shipping, ports and logistics* / T. Notteboom (ed.). — Asp/Vubpress/Upa, 2011. — 608 p.
5. Елисеева А. С. Принципы организации грузового терминала / А. С. Елисеева. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. — 329 с.
6. Маликов О. Б. Склады и грузовые терминалы / О. Б. Маликов. — М.: АСТ, 2005. — 560 с.
7. РД 31.3.05-97. Нормы технологического проектирования морских портов. — М., 1998.
8. Кузнецов А. Л. О несовершенстве нормативной базы технологического проектирования морских портов / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин // Морские порты. — 2017. — № 6. — С. 18–22.
9. Щербакова-Слюсаренко В. Н. Разработка функциональной модели контейнерного терминала типа «сухой порт» и принципов ее использования в технологическом проектировании / В. Н. Щербакова-Слюсаренко, В. А. Погодин, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.
10. Михаэль Д. Складская логистика. Новые пути системного планирования / Д. Михаэль; пер. с нем.; под ред. Г. П. Манжосова. — М: КИА центр, 2004. — 136 с.
11. *International Handbook of Maritime Economics* / K. Cullinane (ed.). — Edward Elgar Publishing, 2011. — 520 p.
12. European Commission. Directorate-General for Mobility and Transport. *White Paper on Transport: Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a Competitive and Resource-efficient Transport System.* — Publications Office of the European Union, 2011.
13. Памбучхиянц В. К. Организация, технология и проектирование торговых предприятий / В. К. Памбучхиянц. — М.: ИВЦ «Маркетинг», 1999. — 320 с.
14. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 813 с.

REFERENCES

1. Thorensen, C.A. *Port designer's handbook*. London: Thomas Telford Limited, 2010.
2. UNCTAD *Monographs on Port Management. Monograph № 9. Multipurpose port terminals. Recommendations for planning and management.* March 1991.
3. Kuznetsov, Aleksandr Lvovich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Aleksandr Aleksandrovich Davydenko. "Classification and functional modeling of echeloned container terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
4. Notteboom, Theo, ed. *Current issues in shipping, ports and logistics*. Asp/Vubpress/Upa, 2011.
5. Eliseeva, A.S. *Printsipy organizatsii gruzovoye terminala*. Rostov-na-Donu: Feniks, 2003.
6. Malikov, O.B. *Sklady i gruzovye terminaly*. M.: AST, 2005.

7. Russian Federation. Guidance Document RD 31.3.05-97. Engineering Design Standards for Seaports. M., 1998.
8. Kuznetsov, A.L., and V.A. Pogodin. "O nesovershenstve normativnoi bazy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov." *Morskie porty* 6 (2017): 18–22.
9. Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N., Vladimir A. Pogodin, and Andrei S. Tkachenko. "The development of the functional model for the "dry port" type container terminal and principles of its use in the technologic design." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.
10. Mikhael', D. *Skladskaya logistika. Novye puti sistemnogo planirovaniya*. Edited by G.P. Manzhosov. M: KIA tsentr, 2004.
11. Cullinane, Kevin, ed. *International handbook of maritime economics*. Edward Elgar Publishing, 2011.
12. European Comission. Directorate-General for Mobility and Transport. *White Paper on Transport: Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a Competitive and Resource-efficient Transport System*. Publications Office of the European Union, 2011.
13. Pambukhchiyants, V. K. *Organizatsiya, tekhnologiya i proektirovanie torgovykh predpriyatii*. M.: IVTs «Marketing», 1999.
14. Kobzar', A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika*. M.: FIZMATLIT, 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Валькова Светлана Сергеевна — соискатель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vlvalkov@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Valkova, Svetlana S. — Applicant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: vlvalkov@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 15 мая 2018 г.
Received: May 15, 2018.*

ON THE SELECTION OF THE FORMAT FOR THE CONTAINER TERMINAL SIMULATION MODEL'S STRUCTURE

A. L. Kuznetsov, V. N. Sherbakova-Slyusarenko, A. S. Tkachenko

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

The paper deals with the analyses of the reasons that turned the simulation from a direction of theoretical researches into a practical tool of modern technologic design. The first results gained by this new paradigm made simulation to be an obligatorily component of any infrastructural project in the area of transport industry. Large investment projects today require the support and maintenance of highly advanced computer models, whose existence was made possible as the result of software engineering development, achievements of computer sciences and progress in hardware. The new level of detalisation and new opportunities offered by the modern generation of simulation models totally change the perception of the content and functional profile of project decisions expected from the designers. The extended horizons of evaluations of the variety of project parameters and a new level of quality of the sensitivity analyses of the output values to the external disturbances, fluctuations of the project constants, alternations of the inner and outer constrains enable to reduce considerably the investment risks connected with large infrastructural projects. In the same time, high labor consumption, narrow specialization and rigid orientation on the inner functional structure of the simulated object make the instrument of simulation rather poorly fitted for the technological design goals and objectives which are principally assume many variants and data volatility. The study concludes the main gnoseologic reason for this inadequacy and the loss of models' universality is in inadequate format of the functional structure of the simulated object, container terminal of a general appearance. A generic solution of this problem is offered by the use of the general format of this structure's representation with analytic list form of the relevant structural graph.

Keywords: sea port, "dry" port, simulation modeling, data presentation, modeling algorithm, container terminal model.

For citation:

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

УДК: 656:6

ВЫБОР ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА

А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, А. С. Ткаченко

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

Статья содержит анализ причин, превративших имитационное моделирование контейнерных портов и терминалов из направления научных исследований в практический инструмент современного технологического проектирования. Показано, что первые же результаты, полученные в новой парадигме проектной деятельности, быстро превратили моделирование в обязательный компонент любого инфраструктурного проекта в сфере транспортного бизнеса. Отмечается, что масштабные инвестиционные проекты сегодня поддерживаются сложными и более совершенными компьютерными моделями, существование которых стало возможным в результате развития технологии программирования, достижений дискретной математики, развития вычислительной техники. Новый уровень детализации и новые возможности, которые предоставляют имитационные модели нового поколения, коренным образом меняют представления о составе проектной документации и функций, ожидаемых от проектных решений. Расширенные возможности оценки вариативности проектных параметров и качественно более высокий

уровень анализа чувствительности выходных характеристик к внешним возмущениям, флуктуациям проектных констант, изменениям внешних и внутренних ограничений позволяют снизить инвестиционные риски, связанные с масштабами инфраструктурными проектами. В то же время высокая трудоемкость, узкая специализация и жесткая ориентация на внутреннюю структуру моделируемого объекта делают инструмент имитационного симуляционного моделирования плохо приспособленным для технологического проектирования вследствие его принципиальной многовариантности и волатильности проектных данных. В статье сделан вывод о том, что гносеологической причиной этой высокой трудоемкости и снижения универсальности моделей в значительной мере является форма представления функциональной структуры моделируемого объекта — контейнерного терминала общего вида, и предлагается общее решение указанной проблемы в виде аналитического формата представления соответствующего ей графа.

Ключевые слова: морской порт, «сухой порт», имитационное моделирование, представление данных, алгоритмы моделирования, модель контейнерного терминала.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Выбор формы представления структуры универсальной имитационной модели контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 520–532. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-520-53.

Введение (Introduction)

В начале XXI в. контейнерные терминалы стали играть ключевую роль в транспортно-технологической системе доставки генеральных грузов [1]. Сначала контейнеризация сделала цепи поставок более эффективными и, следовательно, более конкурентными [2], а затем и вовсе превратила их в безальтернативное направление развития перевозок потребительских товаров, компонентов и даже сырья [3]. В то же время качественный рост эффективности транспортировки потребовал иных масштабов затрат на строительство и эксплуатацию новой системы и в первую очередь оборудования (судов и контейнеров). Сегодня в мире насчитывается около 6 тыс. контейнерных судов [4] средней вместимостью 4 тыс. контейнеров [5] и средней стоимостью постройки около 100 млн долл. каждое [6], которые одновременно перемещают по морю в среднем около 250 млн т грузов, капитализируя при этом более 100 млрд долл. [7]. Не менее затратными в строительстве являются и морские контейнерные терминалы, стоимость строительства которых обычно оценивается в 500 долл. за единицу проектного годового грузопотока. Таким образом, стоимость каждого из ста мировых контейнерных мегатерминалов составляет миллиарды долларов [8]. Стоимость крупных терминалов с оборотом около 600 тыс. TEU, средних с оборотом около 200 тыс. TEU и малых терминалов с оборотом около 30 тыс. TEU также измеряется миллионами долларов. Как следствие, это вызывает не только повышение порога вхождения в бизнес [9], но и угрожающий рост предпринимательского риска на рынке свободной конкуренции, которым всегда характеризовалась морская транспортная индустрия [10].

Борьба за контроль над глобальными сетями товаропродвижения и осознание преимуществ контейнерной транспортно-технологической схемы привели к быстрому проникновению такой схемы в форленд и хинтерленд морских торговых портов, запустив тем самым механизм глобализации и формирования нового мирового транспортного порядка [11]. При этом каждый новый возникающий инфраструктурный элемент данной системы изначально предполагается работающим на грани себестоимости, под тяжелым давлением управления затратами [12].

Совершенно естественно, что такая среда ведения бизнеса потребовала коренного изменения принципов проектирования, планирования работы и управления контейнерными терминалами во всех уровнях цепей поставок [13]. Рост требований к точности и надежности результатов привели к смене парадигмы технологического проектирования инфраструктурных элементов транспортной системы, обусловившей, в свою очередь, появление нового инструментария для этого вида деятельности [14]. Таким инструментарием постепенно стало имитационное моделирование, сначала лишь расширявшее и поддерживающее методологию расчетно-аналитического детерминированного подхода, а затем постепенно взявшее на себя всю ответственность за проектные решения и их качество [15].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Первые результаты, показавшие новые возможности имитационного моделирования как средства технологического проектирования морских портов, были получены на относительно простых по структуре, а также своему положению в логистической системе и одновременно глубоко специализированных по объекту моделей [16]. С их помощью впервые удавалось получить зависимости ключевых эксплуатационных характеристик портов, в первую очередь описывающих технико-экономический аспект их деятельности и качество оказываемых ими услуг как функций от проектных инфраструктурных параметров [17]. Более того, эти функции характеризовали выходные характеристики как случайные величины, которые до этого было возможно получать лишь при помощи использования методов статистического моделирования, и которые имели весьма ограниченную пригодность и точность [18]. Новые имитационные модели не только более адекватно описывали связи проектных величин, но и позволяли быстро и эффективно выполнять различный анализ чувствительности вида: *что будет, если...* [19]. В то же время практика двух десятилетий выявила и принципиальные проблемы, связанные с этим подходом.

Во-первых, следует отметить высокую трудоемкость создания подобных моделей. Действительно, поскольку указанная парадигма предполагает не моделирование леса, но моделирование деревьев [20], адекватность агрегированных свойств модели зависит от точности и детализации свойств всех ее взаимодействующих элементов. Однозначного критерия выбора уровня детализации в общем случае не имеется.

Во-вторых, имитационная модель в подавляющем большинстве случаев строится применительно к конкретному единичному объекту моделирования, т. е. является инструментом *ad hoc* [21]. Проект создания модели для близкого по структуре порта чаще всего начинается практически с нуля, за исключением накопленного опыта и возможной библиотеки составных элементов [22].

В-третьих, высокая трудоемкость и специализация модели входит в противоречие с острой необходимостью ее использования на ранних стадиях технологического проектирования, отличающейся неопределенностью детализации и наличием многих параллельно рассматриваемых вариантов.

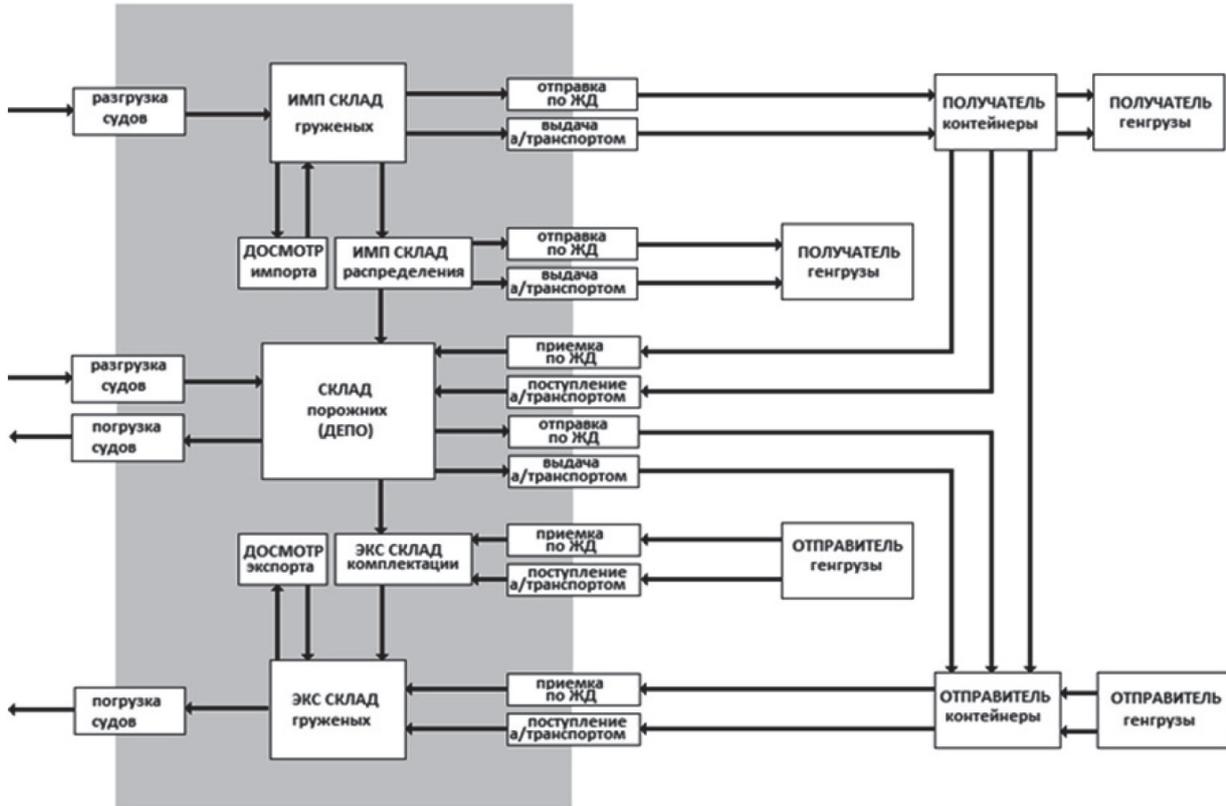
Различными исследователями были предложены несколько вариантов решения этой проблемы, которые были направлены на сохранение общности расчетно-аналитического подхода с возможностью представления конкретного моделируемого объекта [23]. В основном эти решения можно охарактеризовать как формирование некоторой универсальной обобщенной модели, структурной параметризацией которой и выбором значений внутренних параметров достигался приемлемый баланс универсальности и специализации, т. е. в иных терминах трудоемкости создания и адекватности [24].

В то же время указанные модели оказались недостаточно универсальными и удобными для параметризации. Основным положением, защищаемым в этой публикации, является *тезис о ключевой роли выбора формы представления структуры универсальной имитационной модели контейнерного терминала общего вида.*

Результаты (Results)

Наиболее полная классификация всех возможных грузовых терминалов, составляющих элементную базу любой сколь угодно сложной и развитой контейнерной транспортно-технологической системы, содержится в работе [25]. На рис. 1 приведены две крайних позиции этой классификации: полнофункциональный морской контейнерный терминал и производственный терминал предприятия. Между этими двумя крайними формами терминалов лежит широкий спектр различных классов контейнерных терминалов, отличающихся между собой набором выполняемых ими функций. В то же время каждый из указанных классов представляет собой обобщенный портрет целого кластера близких по функциональным свойствам и структуре терминалов, тем самым образуя вышеупомянутый универсум соответствующих структурных схем.

а)



б)

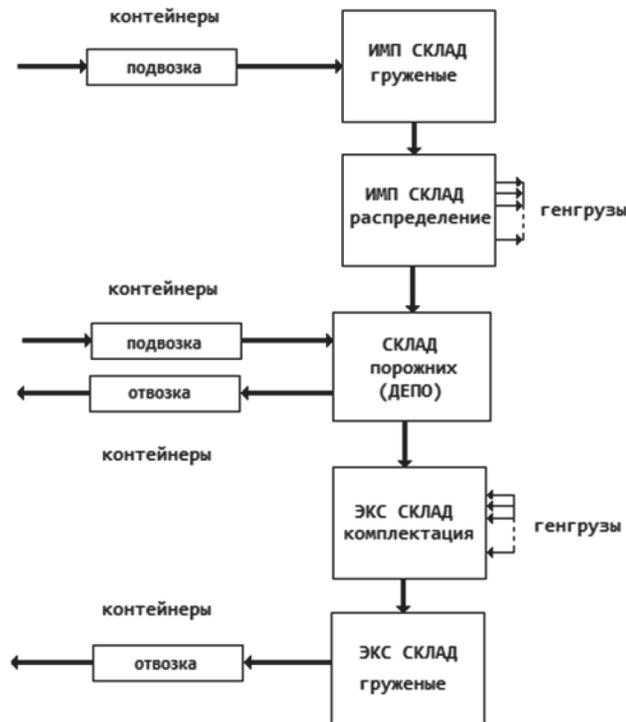


Рис. 1. Примеры классов контейнерных терминалов: а — полнофункциональный морской контейнерный терминал; б — производственный терминал предприятия

Реализация моделей кластера существенным образом опирается на выделенную таким образом функциональную структуру каждого класса объектов, что служит побудительным мотивом

проведения вышеуказанной классификации. Как показывает опыт реализации соответствующих имитационных моделей, лежащая в их основе внутренняя структура требует построения своей обобщенной модели функционального универсума, учитывающей особенности и частоту вариационных признаков.

В работе [26] показано, как за счет структурной параметризации каждой из моделей, сводящейся к устранению избыточных связей из некоторого их универсума, можно получить любой терминал с заданными структурными и эксплуатационными свойствами. Примеры подобной параметризации и использования полученных с ее помощью моделей для практических применений описаны в [27]. В то же время само по себе наличие нескольких классов моделей и трудоемкость их параметризации заставляют искать способ обойти эти методологические сложности. Как представляется авторам исследования, во многом эта проблема является методологическим следствием нерационального выбора формы представления функциональной структуры, обход которого составляет цель данного исследования.

Обсуждение (Discussion)

В основе большинства алгоритмов моделирования работы терминала лежит декомпозиция проходящего через него материального потока на отдельные компоненты, различающиеся между собой совокупностью выполняемых над ним операций и их последовательностью. Любая модель терминала, таким образом, представляет собой некоторый объект, входными сигналами которого являются поступающие для обработки грузы, а выходными сигналами — грузы, обработанные на терминале. Значения выходных сигналов в некоторый момент времени определяются как входными сигналами, так и внутренним состоянием этого объекта в предыдущий момент времени. Таким образом, по определению эта модель представляет собой дискретный абстрактный автомат [28], изменение выходных сигналов и внутреннего состояния которого во времени характеризует поведение моделируемого объекта.

Целью моделирования является изучение поведения исследуемого объекта как реакции на входные сигналы при различных параметрах, описывающих входные воздействия, управляющие и возмущающие, внутреннюю структуру и состояние объекта. Как правило, это изучение сводится к оценке близости наблюдаемого при моделировании поведения объекта к желаемому. При недостаточной степени совпадения наблюдаемого и желаемого поведения выполняется изменение внутренних параметров модели, а затем процедура анализа повторяется. Многократное повторение процедуры анализа позволяет производить направленный поиск в пространстве состояния параметров объекта, тем самым решая задачу их синтеза. Выходные сигналы, зависящие от входных последовательностей сигналов и внутреннего состояния, т. е. передаточная функция абстрактного дискретного автомата, реализуется структурно-функциональной схемой объекта. Эта же схема позволяет определять новое состояние.

По своему телеологическому назначению модель является средством синтеза (выбора значений) различных технологических параметров (стратегический уровень). В то же время возможность изучения последствий от различных неблагоприятных комбинаций входных сигналов и состояний позволяет использовать этот же инструмент практически без изменений в тактических целях как средство анализа чувствительности. Кроме того, он (данный инструмент) служит объективным и эффективным средством оперативного планирования и управления, т. е. операционного уровня. При этом во всех этих функциях модель остается одной и той же, т. е. выступает единым целостным механизмом управления всей процедурой планирования и управления работой.

Грузопотоки терминала делятся на *внешние (входящие и исходящие)*, пересекающие функциональный периметр терминала, и *внутренние* (преобразуемые или не преобразуемые), целиком находящиеся внутри указанного периметра. Любая приемка или отправка внешних потоков, любая передача внутренних потоков, их преобразование и складирование выполняются специализированными соответствующими производственно-технологическими мощностями и оборудованием, образующим отдельные функциональные элементы терминала как транспортно-логистической

системы. Функциональным назначением системы, т. е. ее целевым назначением, является преобразование входящих грузопотоков в исходящие, выполняемое по заданным временным законам и в соответствии с выбранными критериями оптимальности. Связями между функциональными элементами являются сами материальные грузопотоки, передаваемые между функциональными элементами. Соответственно любой терминал может рассматриваться как совокупность двух множеств: функциональных элементов и связей между ними. Естественной математической моделью такой совокупности множеств является граф. Граф G есть упорядоченная пара множества вершин и ребер $G = (V, E)$. Любой граф может быть задан одним из следующих способов: графически, аналитически, матрицей смежности, матрицей инцидентности.

На рис. 2 показан пример структурной схемы модели терминала типа «сухой порт», полученный структурной параметризацией модели из универсума.

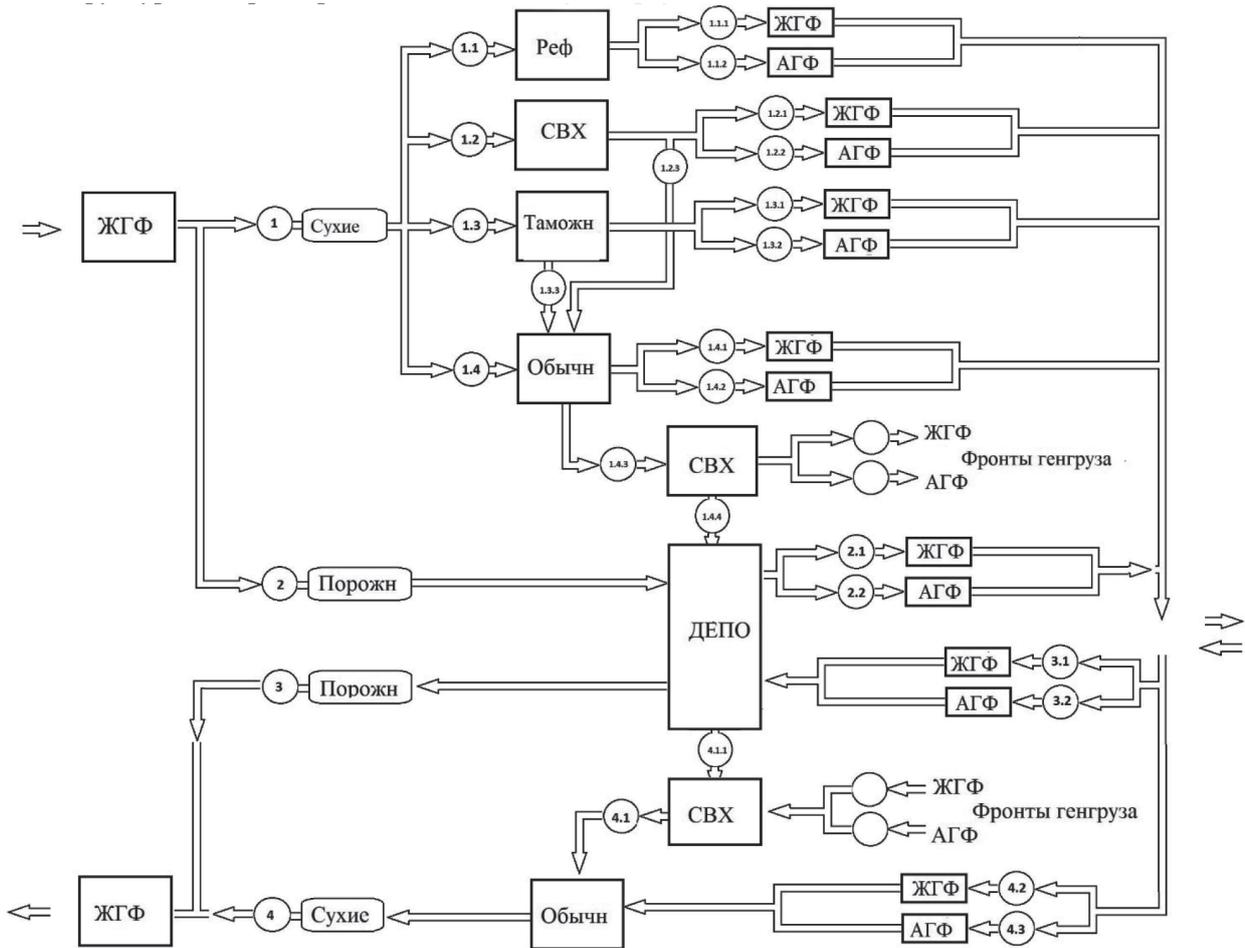


Рис. 2. Структурно-параметризованная функциональная структура модели терминала

Основную идею такого представления составляет поиск структуры максимальной функциональной полноты, т. е. не полного графа, в котором присутствуют все связи между элементами, а включающего всевозможные связи в реальных условиях и реальных требованиях к функциональности. В таком случае устранением избыточных связей может быть получена любая требуемая конфигурация. Очевидно, что графическая форма здания любого графа, включая граф функциональной структуры контейнерного терминала, является наиболее наглядной и доступной для восприятия. В то же время графическое представление информации при существующем уровне развития информационных технологий, так же, как и действия над ними, не могут служить непосредственной формой ввода данных. От этого недостатка свободны матричные формы

представления графов общего вида, широкая популярность и распространение которых во многом объяснялись тем, что в свое время они обеспечивали единственный механизм так называемых «интенсивных» математических представлений и формальных действий над такими объектами, идеально подходящих для первых фаз развития программирования. Пример представления матрицей смежности модели, показанной на рис. 2, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Представление функциональной структуры матрицей смежности

Функциональные элементы	ЖГФ	Груженные	Рефконтейнеры	СВХ	Таможенные	Обычные	Депо	АГФ	Порожние	CFS	ДП
ЖГФ	-	1	-	-	-	4.2	3.1	4.3	2	-	-
Груженные	-	4	1.1	1.2	1.3	1.4	-	-	-	-	-
Рефконтейнеры	1.1.1	-	-	-	-	-	-	1.1.2	-	-	-
СВХ	1.2.1	-	-	-	-	-	-	1.2.2	-	-	-
Таможенные	1.3.1	-	-	-	-	1.3.3	-	1.3.2	-	-	-
Обычные	1.4.1	4	-	-	-	-	-	1.4.2	-	1.4.3	-
Депо	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1.1	-
АГФ	-	-	-	-	-	-	3.2	-	-	-	-
Порожние	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
CFS	-	-	-	-	-	4.1	-	-	-	-	1.4.4
ДП	2.1	-	-	-	-	-	-	1.2	-	-	-

В то же время формат матричного представления, предназначенный в первую очередь для фиксации самой связи между выделяемыми функциональными элементами, в лучшем случае допускает введение некоторых ограниченных характеристик этих связей в виде веса ребер. Введение сколько-нибудь сложного описания или агрегатированных характеристик соответствующего ребра, т. е. операций над соответствующим грузопотоком, лишает матричные формы как простоты, так и наглядности. В этом смысле аналитическое представление графа функциональной структуры терминала в виде списка кортежей произвольной структуры становится наиболее привлекательным (табл. 2).

Таблица 2

Представление функциональной структуры в виде списка

Код операции	Содержание операции	$Q_{год}$	$Q_{сут}$	$Q_{шик}$	Технология операции			Зада-ние Конт./ч	Производительность операции		
		Конт./год	TEU/сут	Конт./сут	взять	перевезти	положить		взять	перевезти	положить
1.	Выгрузка груженых контейнеров с ЖГФ	55501,714	154,171	154,171	RS	-	-	6,424	12,000	-	-
1.1.	Перемещение рефконтейнеров на Скл.	2775,086	7,709	7,709	-	TT+TR	RTG	0,321	-	4,918	9,000
1.1.1.	Выдача рефконтейнера со Скл. на Ж/Д	0,000	0,000	0,000	RTG	TT+TR	-	0,000	20,000	4,918	-
1.1.2.	Выдача рефконтейнера со Скл. на А/М	2775,086	7,709	7,709	RTG	-	-	0,321	20,000	-	-

Таблица 2
 (Продолжение)

1.2.	Перемещение таможенных контейнеров на СВХ	1581,799	4,394	4,394	RS	TT+TR	RS	0,183	12,000	4,918	12,000
1.2.1.	Выдача таможенного контейнера с СВХ на Ж/Д	0,000	0,000	0,000	RS	TT+TR	-	0,000	12,000	4,918	-
1.2.2.	Выдача таможенного контейнера с СВХ на А/М	0,000	0,000	0,000	RS	TT+TR	-	0,000	12,000	4,918	-
1.2.3.	Перемещение растаможенного контейнера с СВХ на Скл.	1581,799	4,394	4,394	RS	TT+TR	-	0,183	12,000	4,918	-
1.3.	Перемещение таможенных контейнеров на ТСкл.	8963,527	24,899	24,899	RS	TT+TR	-	1,037	12,000	4,918	-
1.3.1.	Выдача таможенного контейнера с ТК _{скл} на Ж/Д	0,000	0,000	0,000	RS	-	-	0,000	12,000	-	-
1.3.2.	Выдача таможенного контейнера с ТК _{скл} на А/М	0,000	0,000	0,000	RS	-	-	0,000	12,000	-	-
1.3.3.	Транспортировка ТК на Скл.	8963,527	24,899	24,899	RS	-	-	1,037	12,000	-	-
1.4.	Перемещение обычных контейнеров на Скл.	42181,303	117,170	117,170	RS	-	-	4,882	12,000	-	-
1.4.1.	Выдача обычных контейнера со Скл. на Ж/Д	0,000	0,000	0,000	RS	-	-	0,000	12,000	-	-
1.4.2.	Выдача обычных контейнера со Скл. на А/М	52726,629	146,463	146,463	RS	-	-	6,103	12,000	-	-
1.4.3.	Перемещение груженых контейнеров на CFS под затарку	0,000	0,000	0,000	RS	-	-	0,000	12,000	-	-
1.4.4.	Перемещение порожних контейнеров с CFS в депо	0,000	0,000	0,000	RS	-	-	0,000	12,000	-	-
2.	Выгрузка порожнего контейнера с ЖГФ	2921,143	8,114	8,114	RS	TT+TR	ECH	0,338	12,000	4,918	12,000
2.1.	Выдача порожнего контейнера на ЖГФ	0,000	0,000	0,000	ECH	TT+TR	-	0,000	6,000	4,918	-

Таблица 2
 (Окончание)

2.2.	Выдача порожнего контейнеров на А/М	29503,543	81,954	81,954	ECH	-	-	3,415	6,000	-	-
3.	Погрузка порожних контейнеров на Ж/Д	23369,143	64,914	64,914	ECH	TT+TR	-	2,705	6,000	4,918	-
3.1.	Прием порожних в депо с Ж/Д	0,000	0,000	0,000	RS	TT+TR	RS	0,000	12,000	4,918	12,000
3.2.	Прием порожних в депос А/М	49951,543	138,754	138,754	RS	-	-	5,781	12,000	-	-
4.	Погрузка груженых контейнеров на Ж/Д	35053,714	97,371	97,371	RS	-	-	4,057	12,000	-	-
4.1.	Перемещение порожнего контейнера с CFS в контейнерное депо	35053,714	97,371	97,371	RS	TT+TR	ECH	4,057	12,000	4,918	12,000
4.1.1.	Перемещении порожнего под затарку на склад комплектации	0,000	0,000	0,000	ECH	TT+TR	RS	0,000	6,000	4,918	12,000
4.2.	Прием груженых контейнеров с ЖГФ	0,000	0,000	0,000	RS	TT+TR	RTG	0,000	12,000	4,918	20,000
4.3.	Прием груженых контейнеров с АГФ	35053,714	97,371	97,371	RS	TT+TR	RTG	4,057	12,000	4,918	20,000

Как видно из таблицы, формат аналитического представления, к которому относится список кортежей, сохраняет наглядную форму и предоставляет естественную основу для создания дружелюбного к пользователю интерфейса. В составленные списки кортежей могут вноситься любые отдельные или агрегированные поля данных, что идеально соответствует современным подходам к представлению и обработке информации в программно-аппаратных средах. Кроме того, в списке представлении полностью отсутствует избыточность, поскольку в нем представляются лишь реально присутствующие связи. Это позволяет одновременно легко вносить изменения в сам функциональный универсум терминалов при появлении новых черт, требующих учета в нем.

Основным преимуществом такого представления является единая форма представления всех классов терминалов, примеры которых были приведены на рис. 1, поскольку ранее указанные преимущества аналитической формы одинаковым образом описывают все возможные классы и их экземпляры.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Контейнерные терминалы составляют основу инфраструктуры современной транспортно-логистической системы.
2. Инвестиционная емкость соответствующих инфраструктурных проектов обуславливает необходимость использования нового инструментария технологического проектирования контейнерных терминалов, методологическую платформу которых составляет современное имитационное (симуляционное) моделирование.
3. Широкий спектр функциональности и разнообразие требований к контейнерным терминалам в зависимости от их размеров и занимаемого места в иерархии цепей поставок приводит к появлению различных классов этих инфраструктурных объектов.

4. Реализация моделей контейнерных терминалов значительным образом опирается на функциональную структуру, определяемую соответствующим классом и существенно отличающуюся друг от друга.

5. Контекстная зависимость от функциональной структуры приводит к возникновению соответствующей классификации типовых моделей, содержание и форма которых учитывают содержание и форму родительского объекта.

6. Наличие нескольких классов моделей и трудоемкость их структурной параметризации заставляют искать способ обойти эти методологические сложности

7. Гносеологической причиной указанных сложностей является нерациональный выбор формы представления базовой функциональной структуры моделируемых объектов, поэтому предлагается универсальный формат, позволяющий решить эту проблему.

Заключение (Conclusion)

Переход на списковую форму представления функциональной структуры моделируемого терминала позволяет унифицировать этот формат для разных классов этих инфраструктурных объектов — от морских контейнерных мегатерминалов до контейнерных площадок производственных предприятий. При этом сама идея формирования типовых классов контейнерных терминалов не отвергается, но переходит в разряд методических приемов при составлении описания модели конкретного терминала в этом универсальном формате. Переход на эту парадигму позволяет создавать модульную программную среду, инвариантную к функциональным классам терминалов, что существенно снижает трудоемкость создания и поддержания работоспособности имитационных моделей контейнерных терминалов различного типа, размера и положения в глобальной сети товаропродвижения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gharehgozli A. H. Sea container terminals: New technologies and OR models / A.H. Gharehgozli, D. Roy, R. de Koster // *Maritime Economics & Logistics*. — 2016. — Vol. 18. — Is. 2. — Pp. 103–140. DOI 10.1057/mel.2015.3.

2. McGinley K. Preparing port container terminals for the future: making the most of Intelligent Transport Systems (ITS) / K. McGinley // *Urban Transport XX*. — 2014. — Vol. 138. — Pp. 419–427. DOI: 10.2495/UT140351.

3. Levinson M. The box: how the shipping container made the world smaller and the world economy bigger / M. Levinson. — Princeton University Press, 2006. — 376 p.

4. The world merchant fleet in 2016. Statistics from Equasis – European Maritime Safety Commission [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.equasis.org/EquasisWeb/public/HomePage?fs=HomePage> (дата обращения: 05.05.2018).

5. Review of maritime transport. UNCTAD/RMT/2017. — United nations publication, 2017. — Sales No. E.17.II.D.10. — 115 p.

6. Corbett J.J. The Impacts of Globalisation on International Maritime Transport Activity / J.J. Corbett, J. Winebrake // *Global Forum on Transport and Environment in a Globalising World*. — 2008. — 31 p.

7. Corbett J.J. Sustainable Goods Movement: Environmental Implications of Trucks, Trains, Ships, and Planes / J.J. Corbett, J. Winebrake // *RIT Scholar Works*. — 2007. — No. 11. — Pp. 8–12.

8. European Energy and Transport: Trends to 2030 – update 2007 // European Commission, Directorate-general for energy and transport. — Brussels, Belgium: European Communities, 2008. — 157 p.

9. Годовой отчет ПАО «ТрансКонтейнер». — 2017 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.trcont.ru/fileadmin/content/Documents/Annual_Reports/2018/180428_TrCont_Annual_report_2017_RUS.pdf (дата обращения: 05.05.2018).

10. Shipping Industry Almanac – 2016. — No. 01259-164Gbl. — EYGM Ltd., 2016. — 512 p.

11. Schmertzing L. Global Trends to 2035. Geo-politics and international power. European Parliamentary Research service. Global trends Unit. PE 603.263 / L. Schmertzing. — Brussels © European Union, 2017. — 112 p. DOI:10.2861/800293.

12. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems / J.-P. Rodrigue. — New York: Routledge, 2017. — 440 p.

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

14. Кузнецов А. Л. Моделирование сетей контейнерного грузораспределения / А. Л. Кузнецов, С. С. Павленко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — №5 (33). — С. 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-33-42.

15. Li B. Modeling and simulation of container terminal logistics systems using Harvard architecture and agent-based computing / B. Li, W. Li // Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2010 Winter. — IEEE, 2010. — Pp. 3396–3410. DOI: 10.1109/WSC.2010.5679030.

16. Оценка пропускной способности контейнерного терминала с помощью Anylogic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/container-terminal-throughput-evaluation-with-anylogic> (дата обращения: 05.05.2018).

17. Кузнецов А. Л. Роль имитационного моделирования в технологическом проектировании и оценке параметров грузовых терминалов / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, М. Н. Горынец // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 3. — С. 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-3-100-108.

18. Kroese D. P. Why the Monte Carlo method is so important today / D. P. Kroese, T. Brereton, T. Taimre, Z. I. Botev // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. — 2014. — Vol. 6. — Pp. 386–392. DOI: 10.1002/wics.1314.

19. Галин А. В. Обобщенная имитационная модель процесса развития портов / А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 43–51. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-43-51.

20. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. Книги CAD / Ю. Г. Карпов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 400 с.

21. Кузнецов А. Л. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко [и др.]. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 320 с.

22. Щербакова-Слюсаренко В. Н. Представление операций контейнерного терминала сематическими сетями / В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Транспортное дело России. — 2017. — № 1. — С. 127–129.

23. Zhang Y. The research of trailer scheduling based on the hybrid flow shop problem with blocking / Y. Zhang, S. Wang // Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on. — IEEE, 2008. — Pp. 3936–3940. DOI: 10.1109/WCICA.2008.4593558.

24. Кузнецов А. Л. Базовая модель логистических потоков через контейнерный терминал / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2. — С. 18–20.

25. Кузнецов А. Л. Классификация и функциональное моделирование эшелонированных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 7–16.

26. Кузнецов А. Л. Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-141-153.

27. Щербакова-Слюсаренко В. Н. Разработка функциональной модели контейнерного терминала типа «сухой порт» и принципов ее использования в технологическом проектировании / В. Н. Щербакова-Слюсаренко, В. А. Погодин, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.

28. Хопкрофт Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений / Д. Хопкрофт, Р. Мотвани, Д. Ульман. — 2-е изд.: пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2008. — 528 с.

REFERENCES

1. Gharehgozli, Amir Hossein, Debjit Roy, and René de Koster. “Sea container terminals: New technologies and OR models.” *Maritime Economics & Logistics* 18.2 (2016): 103–140. DOI 10.1057/mel.2015.3.

2. McGinley, K. “Preparing port container terminals for the future: making the most of intelligent transport systems (ITS).” *Urban Transport XX* 138 (2014): 419–427. DOI: 10.2495/UT140351.

3. Levinson, M. *The box: how the shipping container made the world smaller and the world economy bigger*. Princeton University Press, 2006.
4. The world merchant fleet in 2016. Statistics from Equasis - European Maritime Safety Commission. Web. 5 May 2018 <<http://www.equasis.org/EquasisWeb/public/HomePage?fs=HomePage>>.
5. *Review of maritime transport. UNCTAD/RMT/2017*. United nations publication, 2017. Sales No. E.17.II.D.10.
6. Corbett, James J., and James Winebrake. "The Impacts of Globalisation on International Maritime Transport Activity." *Global Forum on Transport and Environment in a Globalising World*. 2008.
7. Corbett, James J., and James Winebrake. "Sustainable Goods Movement: Environmental Implications of Trucks, Trains, Ships, and Planes." *RIT Scholar Works* 11 (2007): 8–12.
8. *European Energy and Transport: Trends to 2030 – update 2007*. European Commission, Directorate-general for energy and transport. Brussels, Belgium: European Communities, 2008.
9. Godovoi otchet PAO «TransKonteiner». 2017. Web. 5 May 2018 <http://www.trcont.ru/fileadmin/content/Documents/Annual_Reports/2018/180428_TrCont_Annual_report_2017_RUS.pdf>.
10. *Shipping Industry Almanac – 2016*. No. 01259-164Gbl. EYGM Ltd., 2016.
11. Schmertzing, L. *Global Trends to 2035. Geo-politics and international power*. European Parliamentary Research service. Global trends Unit. PE 603.263. Brussels © European Union, 2017. DOI: 10.2861/800293.
12. Rodrigue, Jean-Paul. *The Geography of Transport Systems*. New York: Routledge, 2017.
13. Kuznetsov, Alexander L'vovich, Alexander Viktorovich Kirichenko, Vladimir Alekseyevich Pogodin, and Victoria Nikolaevna Shcherbakova-Slyusarenko. "Importance of simulation modelling for technological design and evaluating parameters of cargo terminals." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2017): 93–102. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-93-102.
14. Kuznetsov, Alexander Lvovitch, Sergei Sergeyevich Pavlenko, and Victoria Nickolaevna Scherbackova-Slyusarenko. "Container distribution networks modeling." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-33-42.
15. Li, Bin, and Wen-feng Li. "Modeling and simulation of container terminal logistics systems using Harvard architecture and agent-based computing." *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2010 Winter. IEEE*, 2010. 3396–3410. DOI: 10.1109/WSC.2010.5679030.
16. Otsenka propusknoi sposobnosti konteiner'nogo terminala s pomoshch'yu Anylogic. Web. 5 May 2018 <<https://www.anylogic.ru/container-terminal-throughput-evaluation-with-anylogic>>.
17. Kuznetsov, Alexander L'vovich, Vladimir Alekseyevich Pogodin, Victoria Nikolaevna Shcherbakova-Slyusarenko, and Mikhail Nikolaevich Goryntsev. "The role of the simulation in the technological design and parameter assessment of cargo terminals." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2017): 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-3-100-108.
18. Kroese, Dirk P., T. Brereton, T. Taimre, and Z.I. Botev. "Why the Monte Carlo method is so important today." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 6 (2014): 386–392. DOI: 10.1002/wics.1314
19. Galin, Aleksandr Valentinovic. "Generalized imitation model of ports development process." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 43–51. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-43-51.
20. Karpov, Yu.G. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5. Knigi CAD*. SPb.: BKhV-Peterburg, 2005.
21. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, A. A. Davydenko, S. V. Latukhov, V. L. Mikheev, and V. A. Nikitin. *Morskaya kontejnernaya transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.
22. Scherbakova-Slyusarenko, V. "The representation of the container terminal's operations with the semantic networks." *Transport business of Russia* 1 (2017): 127–129.
23. Zhang, Yu, and Shaomei Wang. "The research of trailer scheduling based on the hybrid flow shop problem with blocking." *Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on. IEEE*, 2008. 3936–3940. DOI: 10.1109/WCICA.2008.4593558.
24. Kuznetsov, A. L., and E. Yu. Kozlova. "Base model of logistical flows through container terminal." *Jek-spluatatsija morskogo transporta* 2 (2008): 18–20.
25. Kuznetsov, Aleksandr Lvovich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Aleksandr Aleksandrovich Davydenko. "Classification and functional modeling of echeloned container terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 7–16.

26. Kuznetsov, A.L., and A. V. Galin. “The genesis of port development models in modern transportation science.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiralа S.O. Makarova* 2(30) (2015): 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-141-153.

27. Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N., Vladimir A. Pogodin, and Andrei S. Tkachenko. “The development of the functional model for the “dry port” type container terminal and principles of its use in the technologic design.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiralа S.O. Makarova* 9.1 (2017): 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.

28. Hopcroft, John E., Rajeev Motwani, and Jeffrey D. Ullman. *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. Addisonwesley Publishing Company, 2008. — 528 p.

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

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

Ткаченко Андрей Станиславович — соискатель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: atk2@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Tkachenko, Andrey S. — Applicant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: atk2@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 16 мая 2018 г.
Received: May 16, 2018.*

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-533-546

CALCULATION OF STRESS-DEFORMED CONDITION OF CRACK IN THE STATE OF THE LOWER HEAD OF THE CLASS 2 OF THE BELOUSOVSKY HYDROELECTRIC POWER STATION

E. A. Lunev¹, K. P. Morgunov², G. G. Ryabov²

¹ — Limited liability company «Marine construction and technology»,
St. Petersburg, Russian Federation

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

The results of the investigation of the causes of excess sediments of the locks № 2 of the Belousovsky hydrounit of the Volga-Baltic channel of the FBU «Administration «Volgo-Balt» are presented. Precipitation, which began in 1980, led to the appearance of a crack in the concrete massif of the left pillar of the lower head of the lock. Analysis of soil characteristics showed the presence in the bottom of the lower head of weak sandy soils: a sublayer of loose formations, layers of unconsolidated sand. The study of concrete in the massif of the lower head indicates that it has a very heterogeneous structure: areas of loose fractured concrete and areas of highly porous concrete have been identified. A significant variation in the values of the strength of the samples was recorded, a low grade of concrete was identified for frost resistance and water resistance. Calculations of the stress-strain state of the structure were performed in the SCAD program using the finite element method taking into account the loads and the configuration of the structure. The geometry of the calculation area was determined taking into account the terrain, the configuration of the structure and the geological structure of the base of the lower head. The design area included the structure itself and the active base zone. The base was set with the help of rods located along the contour of the structure, the longitudinal stiffness of which was assigned in accordance with the characteristics of the ground and backfill. Calculations showed that, without taking into account changes in the characteristics of the soil and concrete, reliable results can not be obtained in the course of continuous operation. Weakening the characteristics of the foundation soils by reducing the stiffness of the support rods of the model confirmed the redistribution of stresses in the design of the lower head, which led to the formation of a crack in the concrete massif. To stop the development of the crack at the base and to stabilize the sediment of the lower head, it is recommended to install the prestressed anchors in the mass of the lower head and strengthen the head with an additional stabilizing structure.

Keywords: navigable gateway, stress-strain state of structures, properties of concrete, load diagrams on structures, shear and strength calculations.

For citation:

Lunev, Evgeny A., Konstantin P. Morgunov, and Georgiy G. Ryabov. "Calculation of stress-deformed condition of crack in the state of the lower head of the class 2 of the Belousovsky hydroelectric power station." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 533–546. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-533-5.

УДК 626.421.4

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕЩИНЫ В УСТОЕ НИЖНЕЙ ГОЛОВЫ ШЛЮЗА № 2 БЕЛОУСОВСКОГО ГИДРОУЗЛА

Е. А. Лунев¹, К. П. Моргунов², Г. Г. Рябов²

¹ — ООО «Морстройтехнология», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Представлены результаты исследования причин сверхнормативных осадок конструкций шлюза № 2 Белоусовского гидроузла Волго-Балтийского канала ФБУ «Администрация «Волго-Балт». Осадки, начав-

шиеся в 1980 г., привели к возникновению трещины в массиве бетона левого устоя нижней головы шлюза. Анализ характеристик грунтов показал наличие в основании нижней головы слабых песчаных грунтов: подслоя рыхлых образований, прослоек разуплотненного песка. Исследование бетона в массиве нижней головы свидетельствует о том, что он имеет весьма разнородную структуру: выявлены участки неплотного трещиноватого бетона, а также зоны высокопористого бетона. Зафиксирован существенный разброс значений по прочности образцов, отмечена низкая марка бетона по морозостойкости и водонепроницаемости. Расчеты напряженно-деформированного состояния конструкции выполнялись в программе SCAD с использованием метода конечных элементов с учетом нагрузок и конфигурации конструкции. Геометрия расчетной области определялась с учетом рельефа местности, конфигурации конструкции и геологического строения основания нижней головы. Расчетная область включала в себя само сооружение и активную зону основания. Основание задавалось с помощью стержней, расположенных по контуру сооружения, продольная жесткость которых назначалась в соответствии с характеристиками грунта основания и обратной засыпки. Расчеты показали, что без учета изменения характеристик грунта и бетона в процессе продолжительной эксплуатации достоверных результатов получить не удастся. Ослабление характеристик грунтов основания путем снижения жесткости опорных стержней модели подтвердило перераспределение напряжений в конструкции нижней головы, которое привело к образованию трещины в массиве бетона. Для остановки процесса развития трещины в устое и стабилизации осадок нижней головы рекомендовано установить в массиве нижней головы преднапряженные анкеры и укрепить голову дополнительной стабилизирующей конструкцией.

Ключевые слова: судоходный шлюз, напряженно-деформированное состояние конструкций, свойства бетона, схемы нагрузок на конструкции, расчеты на сдвиг и прочность.

Для цитирования:

Лунев Е. А. Расчет напряженно-деформированного состояния трещины в устое нижней головы шлюза № 2 Белоусовского гидроузла / Е. А. Лунев, К. П. Моргунов, Г. Г. Рябов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 533–546. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-533-5.

Введение (Introduction)

Судоходный шлюз № 2 Белоусовского гидроузла расположен на основной трассе Волго-Балтийского канала, входящего в транспортный коридор «Север – Юг». Безопасная и безаварийная эксплуатация шлюза обеспечивает надежность и бесперебойность перевозок на этом важнейшем участке внутренних водных путей России. Шлюз № 2 введен в постоянную эксплуатацию 21 ноября 1963 г. В 1980 г. эксплуатационным персоналом гидроузла была отмечена тенденция оседания конструкций шлюза, которая была охарактеризована как опасная, с высокой интенсивностью осадок. В 1985 г. в результате таких осадок на левом устое нижней головы шлюза образовалась трещина, которая развивается до настоящего времени (рис. 1).



Рис. 1. Трещина в монолитном бетоне левобережного устоя нижней головы



Рис. 2. Выщелачивание вдоль трещины

Для наблюдения и контроля за состоянием трещины тогда же, в 1985 г., на ней был установлен рамочный трехкоординатный щелемер. История наблюдения и анализ возможных причин воз-

никновения трещины приведены в работе [1]. Трещина имеет, по-видимому, сквозную природу. Вдоль нее наблюдаются значительные следы выщелачивания (рис. 2), которые свидетельствуют о снижении прочностных характеристик бетона в характерных местах.

Эксплуатационным персоналом шлюза неоднократно предпринимались попытки устранения трещины. В 1994 г. в межнавигационный период были выполнены работы по ликвидации фильтрации из ниши ремонтного затвора нижнего бьефа водопроводных галерей. В следующем 1995 г. проведена цементация основания устоя нижней головы из водопроводной галереи, а также цементация потолка водопроводной галереи, которая была продолжена в 2000 г. Поскольку процесс раскрытия трещины продолжался, в межнавигационный период 2002 – 2003 гг. была выполнена цементация основания левого устоя нижней головы: закачан цементный раствор в восемь скважин на глубину 2,8 м. Однако каждый из этапов ремонтно-восстановительных работ приводил лишь к временному результату — развитие трещины ненадолго останавливалось (максимальный период — до трех лет), после чего интенсивность развития осадок и трещины восстанавливалась до опасного состояния.

На сегодняшний день наибольшая осадка левого устоя нижней головы шлюза зафиксирована на его тыловой грани с верховой стороны. Кроме того, наблюдается ежегодное увеличение расстояния между устоями нижней головы, что привело к проблемам в работе механического оборудования, таким как сверхнормативное отклонение оси вращения левой створки нижних двустворчатых ворот от вертикали и уменьшение стрелы прогиба арки двустворчатых ворот. Значительная неравномерность осадки привела к возникновению вертикальной трещины на границе с башней, что дополнительно свидетельствует о нестабильном состоянии нижней головы и требует незамедлительного вмешательства.

Для анализа состояния бетона нижней головы шлюза и определения причин, обусловивших возникновение и развитие трещины, был выполнен ряд исследований, основные результаты которых приведены в настоящей работе, а именно: анализ характеристик грунтов основания нижней головы, анализ состояния бетона, расчет напряженно-деформированного состояния конструкций нижней головы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Анализ характеристик грунтов основания. В 2007 г. ЗАО «Водопад» было проведено исследование с использованием радиолокационного метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования [2] на предмет уточнения характеристик грунтов основания нижней головы, выявления возможных пустот и зон разуплотнения, мест возможных размывов. Результаты показали, что в прикровельной части девонских песков, занимающих большую часть в толще коренных пород участка, имеет место подслон рыхлых образований. Аналогичные исследования, проведенные ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева [3], подтвердили, что в основании нижней головы находятся супеси и суглинки различной плотности и консистенции, пески разномерные девона. Выявлены также зоны разуплотненных грунтов — прослойки разуплотненного песка.

Исследования, выполненные ОАО «Ленгидропроект» в 2013 г. [4], [5], установили, что основания левого и правого устоев представлены чередованием полутвердых и твердых суглинков и плотных песков. Линзы галечников и гравийных грунтов с песком мелким или пылеватым в заполнителе вскрыты в толще флювиогляциальных отложений в западной части левого устоя. Линза рассечена котлованом устоя, фильтрация по грунтам линзы возможна только по контакту с бетоном устоя. На основании результатов исследования сделаны выводы о том, что скорости фильтрации в грунтах значительно меньше критических; полученные значения гидравлически эквивалентных диаметров поровых каналов значительно меньше диаметров частиц, которые могут вымываться фильтрационным потоком; грунты, вмещающие устои нижней головы, суффозионно устойчивы, в том числе девонские пески в основании западной части устоев. При обследовании состояния откосов обратной засыпки установлено, что состояние откосов удовлетворительное, за-

ложение соответствует проектному; выходы фильтрационных вод, провалы и вынос материалов на откосах и у их подножья не зафиксированы.

Таким образом, можно заметить, что слабые свойства грунта хоть и являются серьезной проблемой сооружения, однако не могут быть единственной причиной перемещений устоев нижней головы и возникновения в них трещин.

Анализ состояния бетона нижней головы. Исследования свойств бетона нижней головы шлюза № 2, проведенные ЗАО «Водопад» в 2007 г. [2], выполнялись двумя способами: методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования и выбуриванием кернов с последующим их испытанием. Исследования показали, что бетонный массив устоев крайне неоднороден. В бетоне имеются участки неплотного трещиноватого бетона, а также зоны высокопористого бетона. Строение бетона, слагающего основание нижней головы, представлено тремя качественными группами, соотносимыми с различным состоянием материала — от хорошего к плохому. Внешний вид выбуренных кернов и самих скважин, их которых выбуривались керны, свидетельствовал о неоднородности бетонного массива. Выход кернов в целом составил около 70 %, однако в некоторых скважинах он был равен 30 %. В ходе выбуривания некоторые части кернов рассыпались на мелкие фрагменты, не связанные вяжущей составляющей.

Аналогичные исследования свойств бетона шлюза № 2 проводились ОАО «Ленгидропроект» в 2010 г. в рамках разработки комплексного проекта реконструкции Волго-Балтийского водного пути [6]. Оценка прочности бетона нижней головы показала, что фактическая прочность бетона ниже проектной марки. При этом был зафиксирован существенный разброс значений по прочности отбираемых образцов, коэффициент вариации прочности бетона по нижней голове составил 26,5 %. В соответствии с ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля прочности» [7] предельный коэффициент вариации для массивных гидротехнических конструкций не должен превышать 20 %. Высокий коэффициент вариации свидетельствует о том, что бетон нижней головы имеет весьма разнородную структуру. Отмечена также низкая марка бетона по морозостойкости и водонепроницаемости, т. е. одной из причин разрушений бетона, вполне вероятно, является его низкая стойкость к циклическому замораживанию и оттаиванию при высокой водонасыщенности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что сочетание проблем в виде некачественного бетона и слабых грунтов и явилось причиной возникновения интенсивных осадок, а также трещин в устоях нижней головы.

Расчет напряженно-деформированного состояния конструкций нижней головы. Для оценки технического состояния нижней головы шлюза № 2, в том числе трещины в левом её устое, был выполнен ряд поверочных расчетов.

Расчет гидротехнических сооружений выполняется по методу предельных состояний [8] – [13]. При расчете необходимо учесть все нагрузки, действующие на конструкции шлюза, а именно:

- собственный вес сооружений;
- вес воды в камерах;
- вес грунта засыпки в естественном состоянии;
- вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;
- давление воды в камерах: при наполненной камере — это нормальный подпорный уровень (для шлюза № 2 НПУ = 58,75 м); при опорожненной камере — судоходный уровень нижнего бьефа (УНБ = 46,00 м);
- активное давление грунта со стороны засыпки;
- давление грунтовых вод в засыпке при различных уровнях;
- взвешивающее давление на днище со стороны основания.

При функционировании шлюза различают следующие случаи:

- эксплуатационный случай, при котором камера заполнена водой до уровня верхнего бьефа;
- эксплуатационный случай, при котором камера опорожнена до уровня нижнего бьефа;
- ремонтный случай, при котором камера полностью осушена.

Помимо этих случаев необходимо выполнить расчет для случая особого сочетания нагрузок, при котором в камере шлюза устанавливается уровень воды, равный форсированному подпорному уровню (ФПУ). Для шлюза № 2 ФПУ = 59,25 м.

Расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния нижней головы шлюза № 2 для эксплуатационного случая приведена на рис. 3 (высотные отметки на рисунке и далее приведены в Балтийской системе высот, линейные размеры — в сантиметрах).

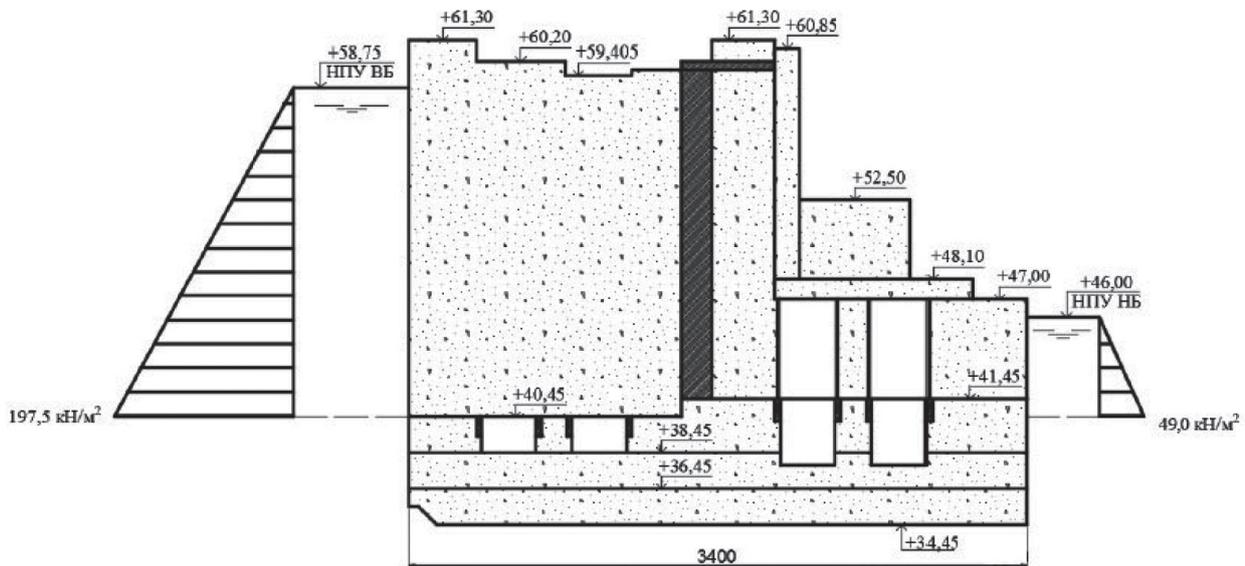


Рис. 3. Расчетная схема для эксплуатационного случая (продольный разрез нижней головы по оси шлюза)

Основные учитываемые нагрузки:

– гидростатическое давление на отметке 40,45 м от НПУ = 58,75 м ($h = 58,75 - 40,45 = 18,30$ м):

$$p = \rho g h \gamma_f = 197,5 \text{ кНм}^2; \quad (1)$$

– гидростатическое давление на отметке 40,45 м от УНБ = 46,00 м ($h = 46,00 - 40,45 = 5,55$ м):

$$p = \rho g h \gamma_f = 49,0 \text{ кНм}^2; \quad (2)$$

– удельное (на 1 пог. м длины) взвешивающее давление при уровне грунтовых вод $h_{\text{ГВ}} = 12,92$ м и ширине нижней головы в поперечном направлении $b_{\text{НГ}} = 41,2$ м:

$$W_{\text{взв}} = \rho g h_{\text{ГВ}} b_{\text{НГ}} \gamma_f = 5 \text{ 483,0 кНм}; \quad (3)$$

– вес сооружения при плотности бетона $\rho_6 = 14 \text{ 930 кг/м}^3$:

$$G = \rho_6 g V_6 \gamma_f = 316 \text{ 368 кН}; \quad (4)$$

– вес воды:

$$G_{\text{в}} = \rho g V_{\text{в}} \gamma_f = 316 \text{ 368 кН}. \quad (5)$$

Расчетная схема для случая особого сочетания нагрузок приведена на рис. 4. Основные учитываемые нагрузки рассчитываются так же, как и для эксплуатационного случая.

Для оценки влияния существующей в устье нижней головы трещины была разработана дополнительная схема (рис. 5) для эксплуатационного случая при уровне верхнего бьефа. В представленной схеме трещина принимается сквозной и свободно заполняется водой при наполнении камеры шлюза. Такое допущение является довольно грубым, однако позволяет рассмотреть работу сооружения при самых неблагоприятных условиях.

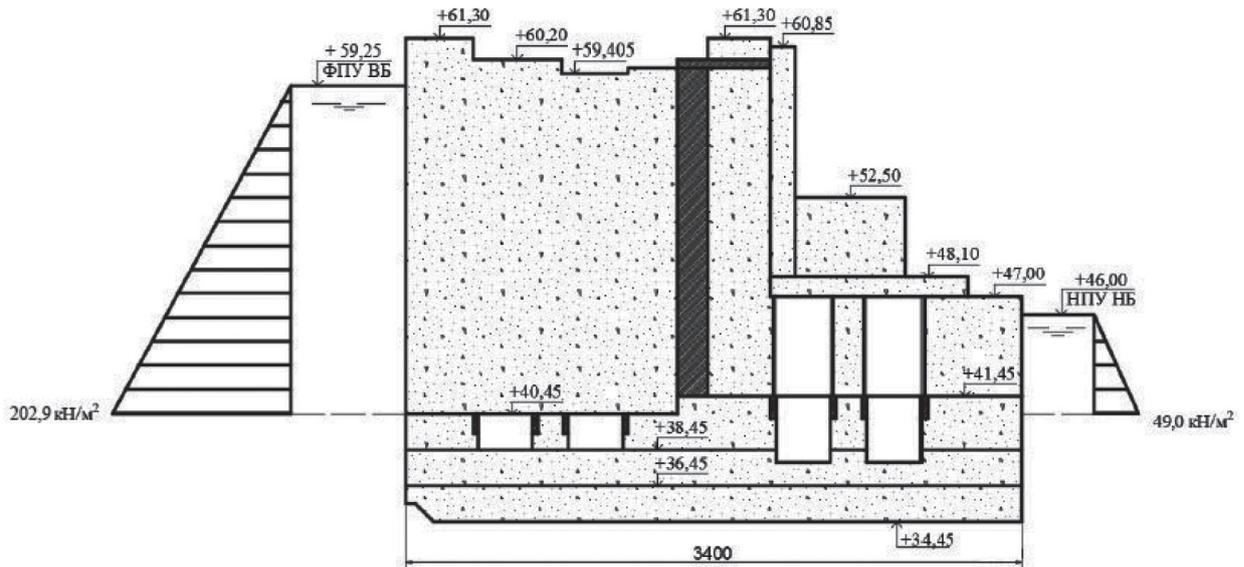


Рис. 4. Расчетная схема для особого сочетания нагрузок

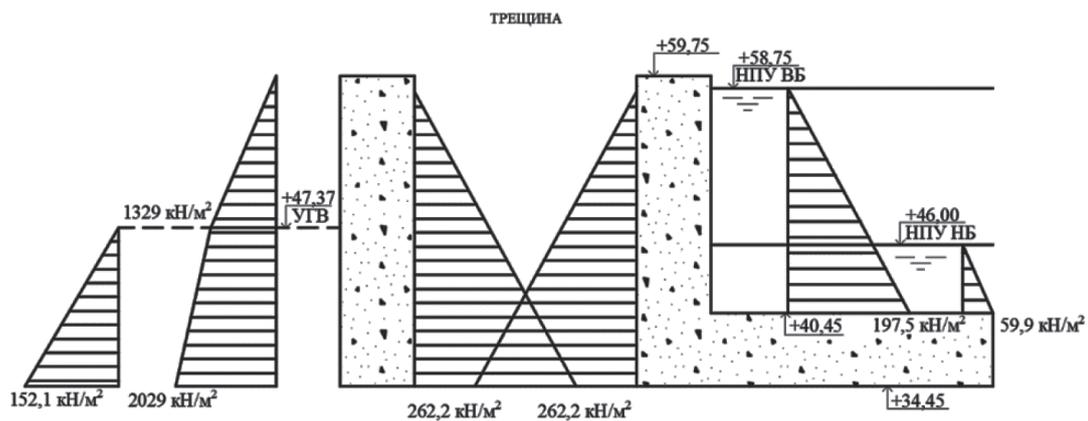


Рис. 5. Расчетная схема сил, влияющих на трещину

Целью расчета по схеме с трещиной являлась оценка сил, способствующих раскрытию трещины, к которым относится гидростатическое давление воды внутри трещины, и удерживающих сил, включающих пассивное давление грунта с учетом изменения отметки грунта по длине нижней головы, давление грунтовых вод, гидростатическое давление в камере, а также распорное усилие от ворот.

Выполнялись расчеты на глубинный сдвиг и прочность нижней головы шлюза. Для оценки напряженно-деформированного состояния нижней головы была создана плоская модель с учетом нагрузок и конфигурации конструкции в программе SCAD (рис. 6). Модель представляла собой поперечный разрез нижней головы, образованный треугольными конечными элементами с размерами сторон не более 1,3 м. Толщина каждого элемента принималась равной 1 м, в качестве материала был принят тяжелый бетон класса В15 с соответствующими ему нормативными характеристиками. Основание задавалось с помощью стержней (основание Винклера [14]), расположенных по контуру сооружения, продольная жесткость которых назначалась в соответствии с характеристиками грунта основания и обратной засыпки.

Геометрия расчетной области определялась с учетом рельефа местности, а также конфигурации конструкции и геологического строения основания нижней головы. Расчетная область включала в себя непосредственно само сооружение и активную зону основания. Взаимодействие

с прилегающими конструкциями шлюза (камерой и палами нижнего подхода) не учитывалось, что создавало определенный запас при расчетах. На основе геометрической модели была выполнена конечно-элементная аппроксимация расчетной области [15].

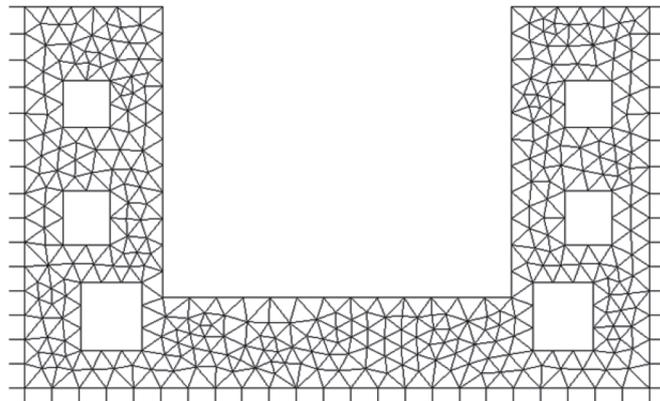


Рис. 6. Расчетная схема нижней головы

Определение напряженно-деформированного состояния конструкции проводилось с учетом последовательности возведения сооружения и приложения нагрузки. На первом этапе моделировалось исходное «бытовое» состояние грунтового массива, на последующих этапах — возведение бетонного массива, устройство обратной засыпки и наполнение камеры. Для описания механического поведения грунтов использовалась упругопластическая модель Мора–Кулона, описываемая характеристиками деформируемости грунта (модулем Юнга — E и коэффициентом Пуассона — ν) и прочностными характеристиками грунта (углом внутреннего трения ϕ и сцеплением c). Бетон моделировался материалом с линейно-упругими свойствами, описываемыми характеристиками деформируемости: модулем Юнга — E и коэффициентом Пуассона — ν . Элементы конечно-элементной модели показаны на рис. 7, где соответствующим цветом выделены области с различными характеристиками грунта.

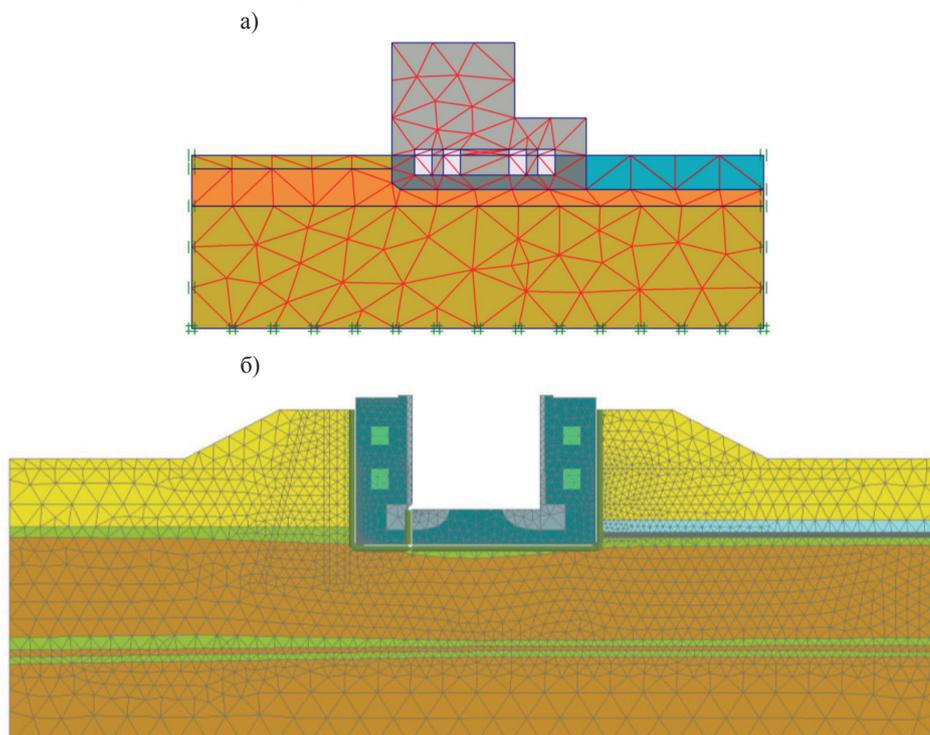


Рис. 7. Конечно-элементные модели:
 а — продольное сечение; б — поперечное сечение

Принятые при расчете характеристики грунтов [3], окружающих нижнюю голову шлюза, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики грунтов

Цвет	Ед. изм.					
γ_{unsat}	кН/м ³	19,00	20,60	19,00	21,70	17,10
γ_{sat}	кН/м ³	20,30	21,40	22,00	22,00	20,10
E	кН/м ²	10,00	20,00	50,00	45,00	20,00
ν	–	0,3000	0,3500	0,2700	0,2700	0,2700
c_{ref}	кН/м ²	10,00	40,00	1,000	80,00	3,000
φ	град.	22,00	18,80	37,00	19,30	24,30

Были приняты следующие характеристики бетона конструкций:

- класса бетона по прочности — В15;
- плотность — 2,40 т/м³;
- модуль упругости — 24 000 МПа;
- коэффициент Пуассона — 0,15.

Расчетное сопротивление растяжению установленной по первоначальному проекту арматуры принималось равным 220 МПа.

Согласно нормативным требованиям [16], полученные при расчете значения коэффициента устойчивости K должны удовлетворять неравенству

$$K \geq K_s = \frac{\gamma_n \gamma_{lc}}{\gamma_c}, \quad (6)$$

где γ_c — коэффициент условий работы ($\gamma_c = 1,00$);

γ_n — коэффициент надежности по ответственности сооружения (принимается равным 1,20 для сооружений II класса).

γ_{lc} — коэффициент сочетаний нагрузок ($\gamma_{lc} = 1,00$ — для основного сочетания нагрузок, $\gamma_{lc} = 0,95$ — для ремонтного случая и особого сочетания нагрузок).

В рассматриваемом случае шлюза № 2 (сооружения II класса) условия устойчивости будут следующими:

- для основного сочетания нагрузок должно быть

$$K \geq K_s = \frac{\gamma_n \gamma_{lc}}{\gamma_c} = \frac{1,2 \cdot 1,0}{1,0} = 1,2; \quad (7)$$

- для ремонтного случая и особого сочетания нагрузок

$$K \geq K_s = \frac{\gamma_n \gamma_{lc}}{\gamma_c} = \frac{1,2 \cdot 0,95}{1,0} = 1,14. \quad (8)$$

Наиболее распространенным вариантом потери устойчивости шлюза по схеме плоского сдвига является смещение сооружения по основанию. Коэффициент устойчивости нижней головы шлюза определяется для первой группы предельных состояний по формуле

$$K = \frac{F}{R}. \quad (9)$$

Здесь R — сдвигающая сила, которая включает взвешивающее давление и гидростатическое давление со стороны верхнего бьефа;

F — удерживающая сила, включающая вес сооружения, вес воды и гидростатическое давление со стороны нижнего бьефа:

$$F = (G_{\text{соор}} + G_{\text{в}} - W_{\text{взв}})f + P_{\text{НБ}}, \quad (10)$$

где $G_{\text{соор}}$, $G_{\text{в}}$ — вес сооружения и воды соответственно;

$W_{\text{взв}}$ — сила взвешивающего давления;

$f = \text{tg } \varphi$ — коэффициент трения (φ — угол внутреннего трения грунта основания);

$P_{\text{НБ}}$ — сила гидростатического давления со стороны нижнего бьефа.

Условие прочности бетона при расчете по первой группе предельных состояний имеет вид

$$\sigma_{\text{max}} \leq R_{b(bt)} \frac{\gamma_c}{\gamma_n \gamma_{lc}}, \quad (11)$$

где σ_{max} — максимальное значение растягивающего (сжимающего) напряжения, полученное при расчете;

R — расчетные сопротивления бетона при растяжении (R_b) и сжатии (R_{bt}) для предельных состояний первой группы.

Нормативные значения напряжений:

– для основного сочетания нагрузок:

$$R_b \frac{\gamma_c}{\gamma_n \gamma_{lc}} = 0,75 \frac{1,00}{1,20 \cdot 1,00} = 0,63 \text{ МПа} \text{ — для растяжения}; \quad (12)$$

$$R_{bt} \frac{\gamma_c}{\gamma_n \gamma_{lc}} = 8,90 \frac{1,00}{1,20 \cdot 1,00} = 7,42 \text{ МПа} \text{ — для сжатия}; \quad (13)$$

– для ремонтного случая и особого сочетания нагрузок:

$$R_b \frac{\gamma_c}{\gamma_n \gamma_{lc}} = 0,75 \frac{1,00}{1,20 \cdot 0,95} = 0,66 \text{ МПа} \text{ — для растяжения}; \quad (14)$$

$$R_{bt} \frac{\gamma_c}{\gamma_n \gamma_{lc}} = 8,90 \frac{1,00}{1,20 \cdot 0,95} = 7,81 \text{ МПа} \text{ — для сжатия}. \quad (15)$$

Результаты (Results)

Расчеты на плоский сдвиг для эксплуатационного случая с камерой, наполненной до уровня верхнего бьефа, дают:

– удерживающая сила

$$F = (G_{\text{соор}} + G_{\text{в}} - W_{\text{взв}})f + P_{\text{НБ}} = (316\,368 + 60\,493 - 186\,417) \cdot 0,325 + 2\,448 = 64\,342 \text{ кН};$$

– сдвигающая сила

$$R = P_{\text{гидр ВБ}} = 32\,532 \text{ кН}.$$

Тогда коэффициент устойчивости

$$K = \frac{F}{R} = \frac{64\,342}{32\,532} = 1,98 \geq 1,20 = K_s. \quad (16)$$

Аналогично определяются коэффициенты для других расчетных случаев (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета на плоский сдвиг

Расчетный случай	Коэффициент устойчивости
Эксплуатационный случай при наполненной камере	1,98
Эксплуатационный случай при опорожненной камере	1,98
Особое сочетание нагрузок (в камере — ФПУ)	1,89

Таким образом, устойчивость на сдвиг обеспечивается во всех расчетных случаях. Расчет на раскрытие трещины показал, что гидростатическое давление непосредственно внутри трещины превышает значения удерживающих сил со стороны камеры шлюза. В результате расчетов

на прочность в программе SCAD были получены поля главных напряжений, а также смещения конструкции (рис. 8), позволяющие оценить напряженно-деформированное состояние нижней головы.

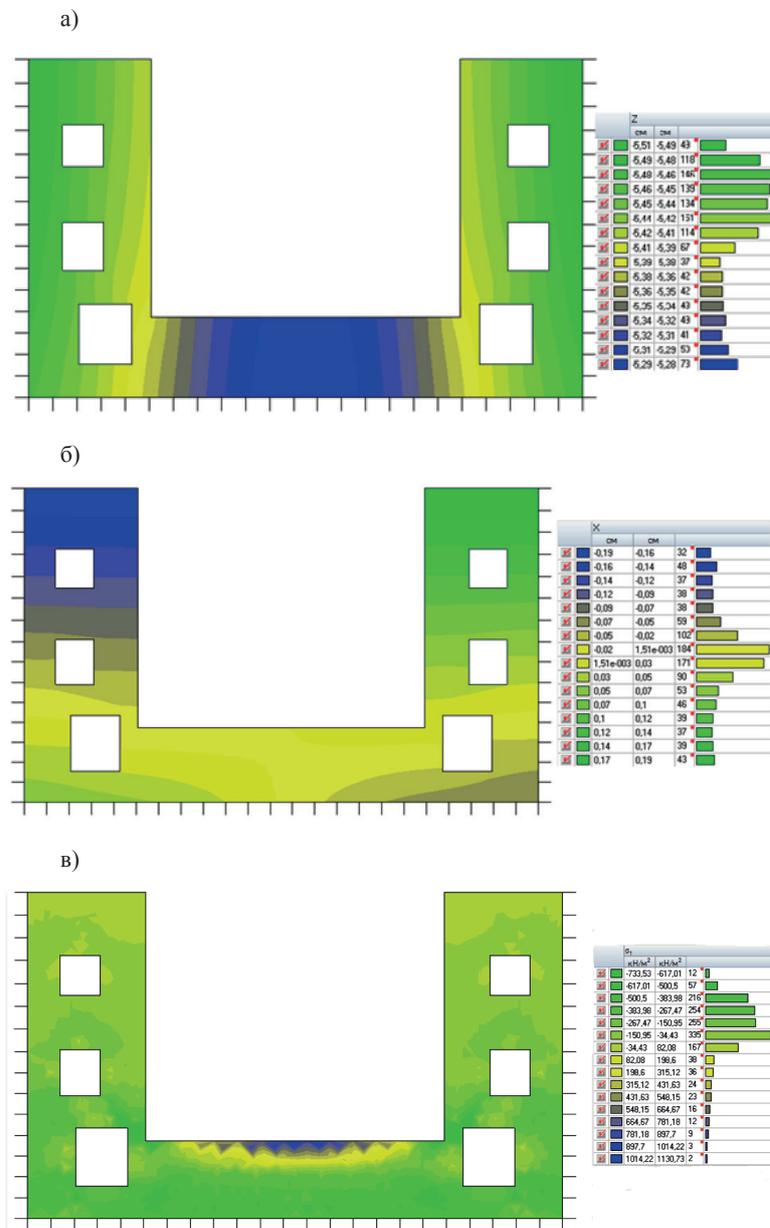


Рис. 8. Поля распределения:

- а — вертикальных смещений (положительное направление принято снизу вверх);
- б — горизонтальных смещений (положительное направление принято слева направо);
- в — главных напряжений (положительные значения соответствуют растяжению)

Результаты расчетов показали, что максимальные растягивающие напряжения в днище достигают 1,1 МПа, что превышает критериальные значения, однако это компенсируется за счет арматуры. Сжатие достигает 0,7 МПа, что не превышает критериальных значений. Растягивающие напряжения в устоях не превышают 0,2 МПа, сжимающие — 0,5 МПа, что удовлетворяет критериям. Полученные данные показали, что разработанная в программе SCAD расчетная схема, скорее всего, не соответствует реальным условиям работы сооружения ввиду следующих причин:

- полученные напряжения в устоях нижней головы не превышают допускаемых значений;

– положение максимальных напряжений не соответствует месту образования трещины.

Причинами такого несоответствия могут быть некорректные данные о характеристиках бетона, а также ошибочно заданные параметры основания. Как отмечалось ранее, исследования [2] – [4] показали, что в основании нижней головы присутствуют зоны сильного разуплотнения грунта, точное местоположение которых не определено. В этой связи были рассмотрены различные варианты ослабления основания путем снижения жесткости опорных стержней модели. Результаты таких расчетов приведены на рис. 9.

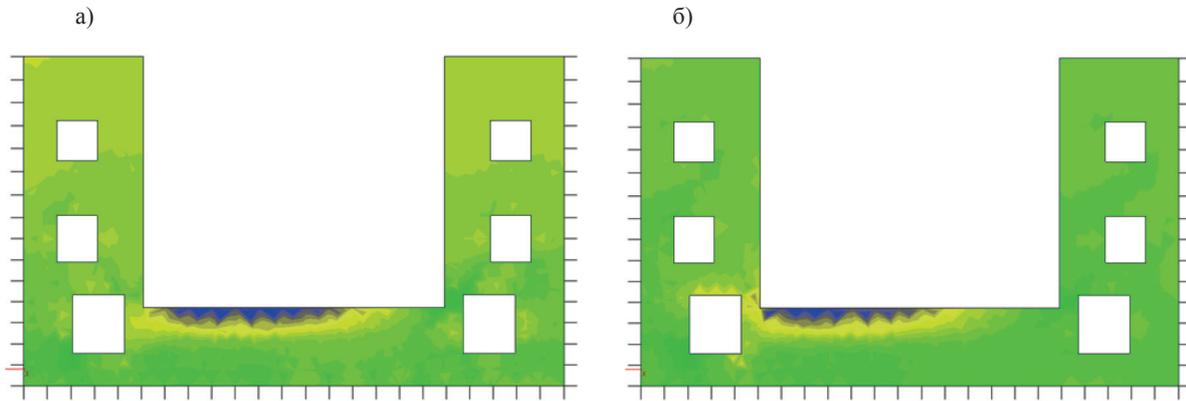


Рис. 9. Поля распределения главных напряжений при снижении на половине ширины головы жесткости стержней основания в пять раз:
 а — у каждого второго стержня; б — у каждого стержня

Обсуждение (Discussion)

Полученные в результате расчетов схемы (см. рис. 9) наглядно демонстрируют перераспределение напряжений в конструкции нижней головы при ослаблении основания путем изменения жесткости стержней модели, что, вполне вероятно, и происходит в реальных условиях. Изменение напряжений в теле сооружения происходит не только за счет изменения положения критических зон с максимальными напряжениями, но и за счет возрастания величин этих напряжений. Вместе с тем результаты расчетов показали, что даже при значительном ослаблении основания (наполовину ширины головы) напряжения в устоях не достигают критических значений, а значит, разуплотнение грунта не являлось первопричиной образования трещины. Поэтому определяющим объективным фактором, вызвавшим, по нашему мнению, образование трещины, мог быть только некачественный бетон в устоях нижней головы, который проявил себя в ослабленном сечении, пересекающем полости, заполненные местным грунтом, и галерею.

Для остановки процесса развития трещины в устой и стабилизации конструкции нижней головы рекомендуется выполнить усиление конструкции устоев, например, установкой в массиве нижней головы предварительно напряженных анкеров и дополнительной стабилизирующей конструкции. Анкеровка по всей длине нижней головы позволит компенсировать превышение напряжений в массиве конструкции.

Заключение (Conclusion)

В настоящей работе выполнен анализ вероятных причин сверхнормативных осадок конструкций шлюза № 2, вызвавших возникновение трещины в массиве бетона левого устоя нижней головы. На основе выполненных расчетов на плоский сдвиг нижней головы, а также расчетов напряженно-деформированного состояния конструкции установлено, что возникновение и развитие трещины произошло в результате наличия комплекса причин: слабые песчаные водонасыщенные грунты в основании головы и некачественный бетон. Каждой из причин в отдельности было недостаточно для развития трещины, тем не менее, по нашему мнению, определяющим фактором явилось низкое качество бетона устоя нижней головы. Для обеспечения безопасной эксплуатации

шлюза необходима разработка и выполнение комплекса мероприятий по укреплению конструкции и снижению в ней напряжений, превышающих безопасный уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Моргунов К. П.* Анализ возможных причин образования трещины в левом устье нижней головы шлюза № 2 Белоусовского гидроузла / К. П. Моргунов, Г. Г. Рябов // Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений водных путей: сб. материалов конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — Т. 1. — С. 115–131.
2. Капитальный ремонт устоев нижней головы шлюза № 2 ВРГСЦ: пояснительная записка к рабочему проекту. — ЗАО «Водопад», 2007. — Т. 1: Сооружения. — 78 с.
3. Обследование состояния грунтов и обратных засыпок нижней головы шлюза № 2 ВРГСЦ: технический отчет по договору №ВН-1770/НТУ. — Этап 2. — СПб.: ОАО ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2007. — 123 с.
4. Разработка и реализация комплексного проекта реконструкции Волго-Балтийского водного пути. Разд. 1: Пояснительная записка. Прил. 9.1: Инженерные изыскания на участке нижней головы шлюза № 2 Белоусовского гидроузла. — СПб.: ОАО «Ленгидропроект», 2013. — Т. 1-1.9.1. — 180 с.
5. Разработка и реализация комплексного проекта реконструкции Волго-Балтийского водного пути. Разд. 1: Пояснительная записка. Прил. 9.2: Технический отчет об инженерных изысканиях на участке нижней головы шлюза № 2 Белоусовского гидроузла. — СПб.: ОАО «Ленгидропроект», 2013. — Т. 1-1.9.2. — 133 с.
6. Разработка и реализация комплексного проекта реконструкции Волго-Балтийского водного пути. Визуальное и инструментальное обследование состояния бетона шлюза № 2: отчет о НИР по теме № НТ01/03. — СПб.: ОАО «Ленгидропроект», 2010. — Кн. 1. — Т. 1-4.2.1. — 221 с.
7. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля прочности. — М.: Стандартинформ, 2012. — 15 с.
8. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. — М.: Минрегион России, 2012. — 39 с.
9. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). — М.: Минрегион России, 2014. — 112 с.
10. *Голоскоков Д. П.* Моделирование напряженно-деформированного состояния камеры судоходного шлюза с помощью полиномов / Д. П. Голоскоков, В. А. Данилюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 4. — С. 16а–21.
11. *Голоскоков Д. П.* Моделирование напряженно-деформированного состояния упругих тел с помощью полиномов / Д. П. Голоскоков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1. — С. 8–14.
12. *Левачев С. Н.* Напряженно-деформированное состояние бетона стен камер шлюзов канала имени Москвы / С. Н. Левачев, Т. С. Федорова // Вестник МГСУ. — 2013. — № 8. — С. 137–149.
13. *Моргунов К. П.* Анализ напряженно-деформированного состояния элементов камер шлюзов Волгоградского гидроузла при различных условиях эксплуатации / К. П. Моргунов, М. В. Красникова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 74–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-74-85.
14. Соппротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г. С. Варданян [и др.]. — М.: ИНФРА-М, 2014. — 512 с.
15. *Перельмутер А. В.* Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. — М.: Издательство SCAD Soft, 2011. — 732 с.
16. СП 101.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07-87. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Нормы проектирования. — М.: Минрегион России, 2012. — 70 с.

REFERENCES

1. Morgunov, K.P., and G.G. Ryabov. "Analiz vozmoznykh prichin obrazovaniya treshchiny v levom ustoe nizhnei golovy shlyuza № 2 Belousovskogo gidrouzla." *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya gidrotekh-*

nicheskikh sooruzhenii vodnykh putei: sbornik materialov konferentsii. Vol. 1. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2017. 115–131.

2. *Kapital'nyi remont ustoev nizhnei golovy shlyuza № 2 VRGSiS.* Poyasnitel'naya zapiska k rabochemu proektu. Tom 1. Sooruzheniya. ZAO «Vodopad», 2007.

3. *Obsledovanie sostoyaniya gruntov i obratnykh zasypok nizhnei golovy shlyuza № 2 VRGSiS. Tekhnicheskii otchet po dogovoru №VN-1770/NTU–Etap 2.* SPb.: OAO VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 2007.

4. *Razrabotka i realizatsiya kompleksnogo proekta rekonstruktsii Volgo-Baltiiskogo vodnogo puti. Razdel 1. Poyasnitel'naya zapiska. Prilozhenie 9.1. Inzhenernye izyskaniya na uchastke nizhnei golovy shlyuza № 2 Belousovskogo gidrouzla.* Vol. 1-1.9.1. SPb.: OAO «Lengidroproekt», 2013.

5. *Razrabotka i realizatsiya kompleksnogo proekta rekonstruktsii Volgo-Baltiiskogo vodnogo puti. Razdel 1. Poyasnitel'naya zapiska. Prilozhenie 9.2. Tekhnicheskii otchet ob inzhenernykh izyskaniyakh na uchastke nizhnei golovy shlyuza № 2 Belousovskogo gidrouzla.* Vol. 1-1.9.2. SPb.: OAO «Lengidroproekt», 2013.

6. *Razrabotka i realizatsiya kompleksnogo proekta rekonstruktsii Volgo-Baltiiskogo vodnogo puti. Vizual'noe i instrumental'noe obsledovanie sostoyaniya betona shlyuza № 2. Otchet o NIR po teme № NT01/03. Book 1.* Vol. 1-4.2.1. SPb.: OAO «Lengidroproekt», 2010.

7. Russian Federation. Interstate Standard EN 206-1: 2000, NEQ (GOST 18105-2010). Concretes. Rules for control and assessment of strength. M.: Standartinform, 2012.

8. Russian Federation. Set of rules SP 58.13330.2012. Hydraulic Structures. Basic statements. M.: Minregion Rossii, 2012.

9. Russian Federation. Set of rules SP 38.13330.2012. Loads and impacts on Hydraulic structures (from wave, ice and ships). M.: Minregion Rossii, 2014.

10. Goloskokov, D. P., and V. A. Daniljuk. “Modelling of the intense-deformed condition of the navigable sluice chamber by means of polynoms.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4 (2011): 16a–21.

11. Goloskokov, D. P. “Simulation of stress-strain state of elastic bodies with polynomials.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2013): 8–14.

12. Levachev, Stanislav Nikolaevich, Tat'yana Sergeevna Fedorova. “Stress-strain state of concrete in the walls of lock chambers of the Moscow channel.” *Vestnik MGSU* 8 (2013): 137–149.

13. Morgunov, K. P., and M. V. Krasnikova. “Analysis of stress-strain state elements lock chamber Volgograd hydroelectric complex under different operating conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 74–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-74-85.

14. Vardanyan, G.S., V.I. Andreev, N.M. Atarov, and A.A. Gorshkov. *Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti.* M.: INFRA-M, 2014.

15. Perel'muter, A.V., and V.I. Slivker. *Raschetnye modeli sooruzhenii i vozmozhnost' ikh analiza.* M.: Izdatel'stvo SCAD Soft, 2011.

16. Set of Rules SP 101.13330.2012. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP 2.06.07-87. Podpornye steny, sudokhodnye shlyuzy, rybopropusknye i rybozashchitnye sooruzheniya. Normy proektirovaniya. M.: Minregion Rossii, 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лунев Евгений Александрович — инженер-гидротехник 3-й категории ООО «Морстройтехнология», 195220, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, дом 21, корпус 2, лит. А
 e-mail: kaf_gsk@gumrf.ru

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lunev, Evgeny A. — hydraulic engineering engineer Limited liability company «Marine construction and technology» 21/2A Gzhatskaya Str., St. Petersburg, 195220, Russian Federation
 e-mail: kaf_gsk@gumrf.ru

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

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

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

*Статья поступила в редакцию 17 мая 2018 г.
Received: May 17, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-547-554

EXPRESS-METHODOLOGY A COASTAL ZONE ASSESSMENT

N. I. Doroshenko^{1, 2}, D. M. Belov², A. V. Spesivtsev³

¹ — Ltd “Saint-Petersburg Ecology”, St. Petersburg, Russian Federation

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

³ — Military space Academy named after A. F. Mozhaysky, St. Petersburg, Russian Federation

The article was used the methods of mathematical modeling in predicting the processes of transformation of the coastal zone as an alternative to hydraulic modeling. The processes of coastal zone re-formation take place in conditions of significant uncertainty due to a variety of active factors of different physical nature and impossibility of accurate quantitative measurement of some parameters. Studies in such unfavorable conditions relate to complex problems, for which the use of deterministic mathematical methods is limited. In the absence of the necessary information in such situations, expert information is widely used. Currently, a method (method) of constructing logical-linguistic models based on expert knowledge has been developed, which is successfully used in various fields of science and technology, including for solving environmental problems. The essence of the method consists in the synthesis of fuzzy set theory elements in the form of linguistic variables and the theory of planning experiments. This article presents the methodology, i.e. a set of methods for constructing a logical-linguistic model to describe changes in the Gulf of Finland coastal zone under the influence of external factors. Thus adequacy of the received model is confirmed by full-scale observations in several characteristic points. The correlation coefficient between the actual data and the calculated values was 0.957. The constructed model is universal and gives the chance of the analysis of the processes occurring on separate sites, and forecasting of transformation of a coastal zone.

Keywords: logical-linguistic model, expertise, coastal zone, coastal zone reformation, modeling, forecast.

For citation:

Doroshenko, Nadezhda I., Daniil M. Belov, and Aleksandr V. Spesivtsev. “Express-methodology a coastal zone assessment.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 547–554. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-547-554.

УДК 551.4.038

ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МОРФОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ

Н. И. Дорошенко^{1, 2}, Д. М. Белов², А. В. Спесивцев³

¹ — ООО «Санкт-Петербург Экология», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

³ — ФГБ ВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Методы математического моделирования при прогнозировании процессов переформирования береговой зоны использовались в работе как альтернатива физического (гидравлического) моделирования. Процессы переформирования береговой зоны протекают в условиях существенной неопределенности как из-за множества действующих факторов различной физической природы, так и невозможности точного количественного измерения некоторых параметров. Исследования в таких неблагоприятных условиях относят к сложным слабоструктурированным задачам, для которых применение детерминированных математических методов ограничено. В отсутствие необходимой информации в подобных ситуациях широко используют экспертную информацию. В настоящее время разработан способ (метод) построения логико-лингвистических моделей на основе экспертных знаний, который успешно применяется в различных областях науки и техники, в том числе и для решения экологических задач. Суть метода состоит в син-

тезе элементов теории нечетких множеств в виде лингвистических переменных и теории планирования экспериментов. В данной статье приведена методика, т. е. совокупность приёмов построения логико-лингвистической модели, для описания изменений в береговой зоне Финского залива под влиянием внешних действующих факторов. При этом адекватность полученной модели подтверждена натурными наблюдениями в нескольких характерных точках. Коэффициент корреляции между фактическими данными и расчетными значениями составил 0,957. Построенная модель универсальна и дает возможность не только анализировать процессы, происходящие на отдельных участках, но и прогнозировать переформирование береговой зоны в целом.

Ключевые слова: логико-лингвистическая модель, экспертные знания, береговая зона, переформирование береговой зоны, моделирование, прогноз.

Для цитирования:

Дорошенко Н. И. Экспресс-методика оценки морфодинамических процессов в береговой зоне моря / Н. И. Дорошенко, Д. М. Белов, А. В. Спесивцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 547–554. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-547-554.

Введение (Introduction)

Оценка качественного состояния береговой зоны всегда представляла большой интерес не только с точки зрения градостроительства, но и с точки зрения предоставления территорий под рекреационные цели [1]. На данный момент, проведение сценарных моделирований практически полностью исключено. Для математического моделирования прогнозов изменений состояния береговой зоны необходимо большое количество исходной информации, получение которой — весьма дорогостоящий, трудоемкий и длительный процесс [2]. Как правило, процессы переформирования береговой зоны протекают под действием множества факторов различной физической природы, которые не всегда поддаются количественным измерениям, а некоторые можно охарактеризовать только вербально. Например, при планировании строительства необходимо знать качественную составляющую процессов, идущих в береговой зоне, а именно — к какому виду относится тот или иной участок береговой зоны: абразионному или аккумулятивному, при этом количественная составляющая — количество материала, намываемого или размываемого в течении определенного отрезка времени, — отходит на второй план.

В условиях такой неопределенности применение детерминированных методов математического моделирования ограничено, но широко используются экспертные знания с построением логико-лингвистических моделей: при управлении рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации [3]; при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования [4]; при оценке уровня аварийных ситуаций [5]; при определении степени опасности столкновения судов в зоне чрезмерного сближения [6]; при оценке устойчивости сетевой информационной системы к негативным внешним воздействиям в условиях неполноты априорных сведений [7] и даже при построении системы ответов на вопросы для перевода Корана на английский язык [8]. Метод построения логико-лингвистических моделей находит применение для решения задач описания процессов или явлений, протекающих в условиях существенной неопределенности, в том числе и экологических, таких как решение агроэкологических проблем [9], оценка экологической безопасности на основе логико-лингвистического моделирования процессов утилизации жидкого навоза [10], автоматизированный анализ и полагание целей рыбохозяйственного комплекса [11].

Целью настоящей статьи является построение методики определения изменений в береговой зоне Финского залива в результате влияния действующих факторов, основанной на способе построения логико-лингвистической модели.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Метод построения логико-лингвистической модели использует экспертные знания, поэтому в начале, в ходе теоретических рассуждений, определяется факторное пространство, в котором

эксперт принимает решения по данному конкретному вопросу [3]. На этом этапе было определено, что на переформирование береговой зоны существенное влияние оказывают следующие факторы:

X_1 — скорость волноэнергетического течения, качественная переменная;

X_2 — наличие пляжеобразующего материала на береговом склоне, качественная переменная;

X_3 — крупность частиц пляжеобразующего материала, мм;

X_4 — угол заложения надводного откоса, град.;

X_5 — наличие частиц пляжеобразующего материала в потоке, качественная переменная.

В качестве выходной зависимой выбрана переменная Y — градиент изменения переформирования высоты пляжа, м/год.

Выбранные факторы представляются лингвистическими переменными. Так, на рис. 1 представлен Y в виде лингвистической переменной, которая содержит три шкалы и позволяет лингвистические оценки эксперта (верхняя шкала по оси абсцисс) переводить в численные (нижняя шкала по оси абсцисс), а по оси ординат представлена функция принадлежности в интервале $[0, 1]$. При этом для количественных переменных в лингвистической шкале обозначены: Н — низкое значение, НС — ниже среднего, С — среднее, ВС — выше среднего, В — высокое.

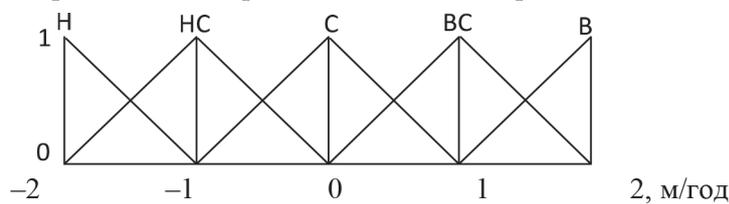


Рис. 1. Y — градиент изменения переформирования высоты пляжа как лингвистическая переменная

Исходные значения количественных входных переменных, в соответствии с теорией планирования экспериментов, переводятся в стандартизованный масштаб на интервале $[-1, +1]$ по формуле

$$x_i = \frac{\bar{X}_i - X_i}{\Delta X_i}, \quad (1)$$

где X_i — наблюдаемое (измеренное) значение переменной в соответствующих физических единицах; $\bar{X}_i = \frac{X_{i\min} + X_{i\max}}{2}$ — среднее арифметическое значение переменной; $\Delta X_i = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}$ — интервал изменения переменной.

Качественные (неколичественные, вербальные) переменные X_1, X_2, X_5 содержат только концы лингвистических шкал и маркируются «-1» для Н и «+1» для В.

Логико-лингвистическая модель оценки строится по результатам обработки матрицы экспертного опроса, при этом используется структура полного факторного эксперимента типа 2^n , где n — число факторов. В данном случае при $n = 5$ количество строк опросной матрицы составит $N = 2^5 = 32$. Фрагмент опросной матрицы с экспертными оценками Y_i и расчетными значениями Y по модели приведен в табл. 1. Вопросы, адресуемые экспертам, в табл. 1 представлены в виде нечеткого продукционного правила, имеющего имплицативную конструкцию «если ..., то ...». В свою очередь, каждая продукция представляла собой сочетание «ситуация – состояние береговой зоны». Так, например, 10-я строка табл. 1 читается так: «Если (x_1) скорость потока «высокая» и (x_2) материал на пляже «отсутствует», и (x_3) размер частиц «мелкий», и (x_4) угол заложения надводного откоса «высокий», и (x_5) концентрация частиц в потоке «низкая», то градиент переформирования высоты пляжа (Y) оценивается состоянием между значениями «низкий – ниже среднего».

Для построения полиномиального разложения вербальные оценки эксперта переводят по шкале рис. 1 в количественный вид. Так, в случае строки 10 табл. 1 состоянию «низкий – ниже среднего» соответствует числовое значение «-1,5». Расчет коэффициентов полинома производится по правилам, принятым в теории планирования экспериментов. При этом следует отметить, что коэффициенты полинома в рассматриваемом случае представляют опыт эксперта и принципиально отличаются от таковых в полиноме, построенном по данным и представляющем только исходную совокупность этих данных и применяемый математический аппарат [3].

Таблица 1

Фрагмент опросной матрицы с экспертными оценками Y_3 и расчетными значениями Y по модели

№ п/п.	Скорость потока	Наличие материала	Размер частиц	Угол заложения надводного откоса	Концентрация частиц в потоке	Градиент изменения переформирования высоты пляжа, м/год		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Y_3	Y	$Y_3 - Y$
...
6	1	-1	1	-1	-1	-1,50	-1,563	0,063
7	-1	1	1	-1	-1	0,00	0,000	0,000
8	1	1	1	-1	-1	-1,00	-1,063	0,063
9	-1	-1	-1	1	-1	-0,50	-0,500	0,000
10	1	-1	-1	1	-1	-1,50	-1,563	0,063
11	-1	1	-1	1	-1	0,00	0,000	0,000
12	1	1	-1	1	-1	-1,00	-1,063	0,063
13	-1	-1	1	1	-1	-0,50	-0,625	0,125
14	1	-1	1	1	-1	-2,00	-1,688	-0,313
...

Результаты (Results)

В результате обработки матрицы экспертного опроса в численном виде было получено аналитическое выражение в виде полинома

$$Y = 0,531x_1 + 0,156x_2 - 0,156x_3 - 0,156x_4 + 0,781x_5 - 0,094x_2x_3x_4. \quad (2)$$

Полученное выражение (2) является функцией отклика, которая отражает совокупные изменения состояния береговой зоны в зависимости от воздействующих на нее факторов. Корреляция, представленная на рис. 2, дает возможность визуально убедиться в адекватности результатов расчета экспертными оценками.

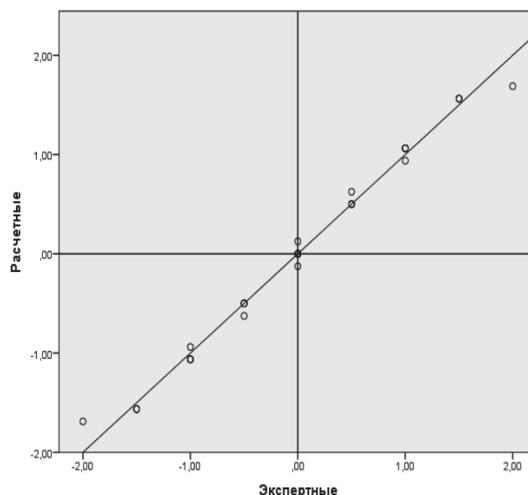


Рис. 2. Корреляция между расчетными данными и экспертными оценками

Высокое значение коэффициента корреляции 0,997 указывает на то, что полиномиальное выражение (2) адекватно представляет знания эксперта.

На следующем этапе необходимо оценить адекватность расчетов исследуемого явления по выражению (2). Для этого были проведены специальные натурные наблюдения за изменением береговой зоны Финского залива в результате влияния действующих факторов, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетной оценки и фактических данных

№ п/п.	Наименование точки	Скорость потока	Наличие материала	Размер частиц, мм	Угол заложения надводного откоса, град.	Концентрация частиц в потоке	Градиент изменения переформирования высоты пляжа, м/год		Разница расчетных и фактических данных
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_ϕ	Y	
1	Причал турбазы «Янтарный берег»	1	-1	0,3 – 0,1	7–10	-1	-1	-1,67	-0,67
2	Рыболовный коллектив 295	-1	1	0,3 – 0,1	7,5	-1	0	-0,10	-0,10
3	Пляж у дороги с родником	-1	1	5 – 1	6	-1	0	0,11	0,11
4	Пляж в районе МЧС	-1	1	0,3 – 0,1	4,5	1	+1,5	1,53	0,03
5	У причала МЧС	-1	1	0,3 – 0,1	6	1	+2	1,49	-0,51
6	Лоцманский поселок	1	-1	5 – 1	9	-1	-1	-1,21	-0,21
7	За сооружениями дороги 58 км	1	-1	20 – 70	13	-1	-2	-1,31	0,69
8	На 50 м восточнее точки 7	1	-1	2 – 0,3	10	-1	-1,5	-1,54	-0,04

Корреляция между данными фактических наблюдений и расчетными значениями по формуле (2) представлена на рис. 3 и оценивается коэффициентом корреляции 0,957, который при числе опытов, равном восьми, существенно отличается от нуля с доверительной вероятностью более 0,99.

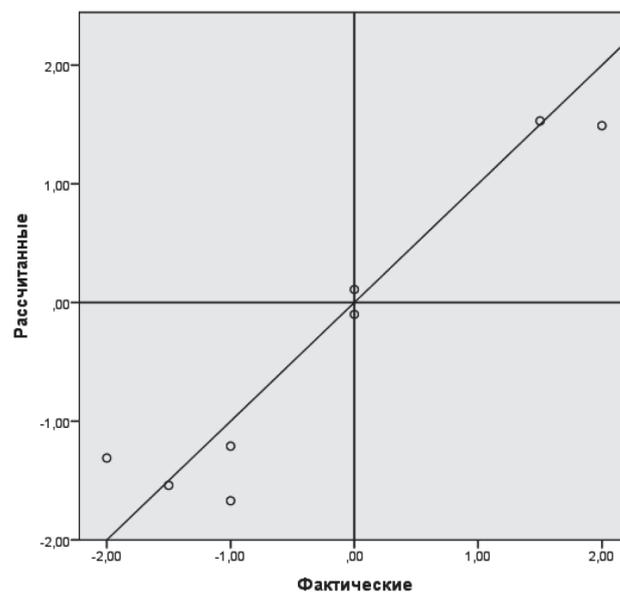


Рис. 3. Корреляция между фактическими данными и расчетными значениями по формуле (2)

Обсуждение (Discussion)

Проведенные исследования показали принципиальную возможность использования экспертных знаний для исследования процесса переформирования береговой зоны Финского залива. При этом высокая степень адекватности расчетных значений фактическим наблюдениям (коэффициент корреляции 0,957) позволяет с высокой достоверной вероятностью считать полиномиальное выражение (2) математической моделью изучаемого явления. Такой результат проведенного исследования позволяет использовать модель не только для мониторинга состояния берегов [12], но и прогнозирования их переформирования в условиях изменения внешней среды [13], например, при возведении сооружений или дамб в акватории залива.

Следует отметить особенности применения метода построения логико-лингвистических моделей, состоящие в том, что, во-первых, используются знания высококвалифицированных специалистов вместо накопления необходимого количества исходной информации, во-вторых, вся существующая статистика по конкретному вопросу служит для проверки адекватности модели, в-третьих, экономические затраты и сроки создания таких моделей на порядки ниже построения математических моделей при традиционном подходе, и, в-четвертых, логико-лингвистические модели позволяют сохранять и тиражировать знания и опыт высококвалифицированных специалистов, которые обычно выступают в качестве экспертов.

Заключение (Conclusion)

Разработанная методика определения переформирования береговой зоны под влиянием внешних действующих факторов позволила построить логико-лингвистическую модель для количественной оценки как отдельных факторов, так и их совокупного воздействия в береговой зоне Финского залива. Это дает огромные возможности для использования данной модели не только с целью анализа локальных участков территории, но и прогнозирования переформирования участка береговой зоны в целом.

Метод построения логико-лингвистических моделей обладает универсальностью и может быть рекомендован для решения многих классов экологических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pinder D.* Seaport decline and cultural heritage sustainability issues in the UK coastal zone / D. Pinder // *Journal of Cultural Heritage*. — 2003. — Vol. 4. — Is. 1. — Pp. 35–47. DOI: 10.1016/S1296-2074(03)00006-2.
2. *Белов Д. М.* Основы методики управления морфодинамикой береговой зоны / Д. М. Белов, Н. И. Дорошенко // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 6 (34). — С. 99–110. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-99-110.
3. *Спесивцев А. В.* Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации / А. В. Спесивцев; под ред. проф. В. С. Артамонова. — СПб.: Изд-во СПбПТехУ, 2004. — 238 с.
4. *Спесивцев А. В.* Логико-лингвистическая модель оценивания вероятности возникновения нештатных ситуаций при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования РКК / А. В. Спесивцев, А. М. Астанков // *Фундаментальные исследования*. — 2016. — № 11–4. — С. 728–732.
5. *Седова Н. А.* Логико-лингвистическая модель оценки уровня аварийных ситуаций / Н. А. Седова, В. А. Седов // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технические науки*. — 2016. — № 2. — С. 65–69.
6. *Седова Н. А.* Логико-лингвистическая модель определения степени опасности столкновения судов в зоне чрезмерного сближения / Н. А. Седова, Д. Ю. Сясин // *Бюллетень транспортной информации*. — 2014. — № 12 (234). — С. 23–26.
7. *Александров Е. Ю.* Моделирование оценки устойчивости сетевой информационной системы к негативным внешним воздействиям в условиях неполноты априорных сведений / Е. Ю. Александров, В. М. Тюнтюник // *Глобальный научный потенциал*. — 2015. — № 9 (54). — С. 102–106.
8. *Wani S.* Question Answering System for English Translation of Al-qur'an Based on the Logico-linguistic Representational Model: diss. / S. Wani. — Kulliyah of Information and Communication Technology, International Islamic University Malaysia, 2016.

9. Брюханов А. Ю. Логико-лингвистическое моделирование для решения агроэкологических проблем / А. Ю. Брюханов, А. В. Спесивцев, А. В. Трифанов, И. А. Субботин // Сб. докладов XIX Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2016). — Т. 1. — СПб.: Изд-во ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), 2016. — С. 236–239.

10. Брюханов А. Ю. Оценка экологической безопасности на основе логико-лингвистического моделирования процессов утилизации жидкого навоза / А. Ю. Брюханов, А. В. Спесивцев, И. А. Субботин // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. — 2015. — № 86. — С. 129–139.

11. Лукьянова Л. М. Задача автоматизированного анализа и полагания целей рыбохозяйственного комплекса и средства ее решения / Л. М. Лукьянова // Балтийский экономический журнал. — 2015. — № 1 (13). — С. 195–200.

12. Nicholls R. J. Coastline degradation as an indicator of global change / R. J. Nicholls, C. Woodroffe, V. Burkett // *Climate Change (Second Edition)*. — 2016. — Pp. 309–324. DOI: 10.1016/B978-0-444-63524-2.00020-8.

13. Brooks K. Managing the NSW coastal zone: restructuring governance for inclusive development / K. Brooks, S. Fairfull // *Ocean & Coastal Management*. — 2017. — Vol. 150. — Pp. 62–72. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2016.10.009.

REFERENCES

1. Pinder, David. “Seaport decline and cultural heritage sustainability issues in the UK coastal zone.” *Journal of Cultural Heritage* 4.1 (2003): 35–47. DOI: 10.1016/S1296-2074(03)00006-2.

2. Belov, Daniil Mihajlovich, and Nadezhda Ivanovna Doroshenko. “The basic methodology morphodynamical of the coastal zone management.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 99–110. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-99-110.

3. Spesivtsev, A.V. *Upravlenie riskami chrezvychainykh situatsii na osnove formalizatsii ekspertnoi informatsii*. Edited by V.S. Artamonov. SPb: Izd-vo SPbPTekhU, 2004.

4. Spesivtsev, A.V., and A.M. Astankov. “A logical-linguistic evaluation model of the probability of occurrence of emergency situations while operating pump units of RSC filling equipment.” *Fundamental research* 11-4 (2016): 728–732.

5. Sedova, N., and V. Sedov. “The logical - linguistic model for assessing of the emergency level.” *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* 2 (2016): 65–69.

6. Sedova, N.A., and D.Jy. Syasin. “The logical-linguistic model of the ships collision risk rating in a heavy traffic zone.” *The Bulletin of Transport Information (BTI)* 12(234) (2014): 23–26.

7. Aleksandrov, E.Yu., and V.M. Tyutyunnik. “Simulation of Assessing Network Information System Sustainability to Negative External Influences under Incomplete a Priori Information.” *Global Scientific Potential* 9(54) (2015): 102–106.

8. Wani, S. Question Answering System for English Translation of Al-qur'an Based on the Logico-linguistic Representational Model. Diss. Kulliyah of Information and Communication Technology, International Islamic University Malaysia, 2016.

9. Bryukhanov, A.Yu., A.V. Spesivtsev, A.V. Trifanov, and I.A. Subbotin. “Logiko-lingvisticheskoe modelirovanie dlya resheniya agroekologicheskikh problem.” *Sb. dokladov XIX Mezhdunarodnoi konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM-2016)*. Vol. 1. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi elektrotekhnicheskii universitet “LETI” im. V.I. Ul'yanova (Leningrad), 2016. 236–239.

10. Briukhanov, A.Yu., A.V. Spesivtsev, and I.A. Subbotin. “Environmental safety assessment of liquid manure treatment processes by logical-linguistic modeling.” *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhitovnovodstva* 86 (2015): 129–139.

11. Luk'yanova, L.M. “Zadacha avtomatizirovannogo analiza i polaganiya tselei ryboozyaistvennogo kompleksa i sredstva ee resheniya.” *Baltiiskii ekonomicheskii zhurnal* 1(13) (2015): 195–200.

12. Nicholls, Robert J., Colin Woodroffe, and Virginia Burkett. “Coastline degradation as an indicator of global change.” *Climate Change (Second Edition)*. 2016. 309–324. DOI: 10.1016/B978-0-444-63524-2.00020-8.

13. Brooks, Kate, and Sarah Fairfull. “Managing the NSW coastal zone: restructuring governance for inclusive development.” *Ocean & Coastal Management* 150 (2017): 62–72. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2016.10.009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дорошенко Надежда Ивановна — аспирант,
руководитель отдела экологического
сопровождения
Научный руководитель:
Белов Даниил Михайлович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
ООО «Санкт-Петербург Экология»
198152, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Краснопутиловская, 8
e-mail: 132620@mail.ru

Белов Даниил Михайлович —
доктор географических наук, профессор,
заслуженный эколог РФ
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: olt_prts@inbox.ru

Спесивцев Александр Васильевич —
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник
ФГБ ВОУ ВО «Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского»
197198, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, 13
e-mail: sav2050@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Doroshenko, Nadezhda I. — Postgraduate,
Head of Environmental Support
Department
Supervisor:
Belov, Daniil M.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
Ltd “Saint-Petersburg Ecology”
8 Krasnoutilovskaya Str., St. Petersburg, 198152,
Russian Federation
e-mail: 132620@mail.ru

Belov, Daniil M. —
Dr. of Geographical Sciences, professor, honored
ecologist of the Russian Federation
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: olt_prts@inbox.ru

Spesivtsev, Aleksandr V. —
PhD, senior researcher
Military space Academy named
after A.F. Mozhaysky
13 Zhdanovskaya Str., St. Petersburg, 197198,
Russian Federation
e-mail: sav2050@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 16 марта 2018 г.
Received: March 16, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-555-564

METHOD OF DETERMINING THE RISK OF ACCIDENTS IN SHIPPING LOCKS

M.A. Kolosov, A.A. Eirus, D.V. Zhignovskaia

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

The article considers possible technological events that can lead to an accident in navigable locks. Two approaches to risk assessment are considered: the first risk is determined only on the basis of the technical condition of the structure, and the second based on the statistics of actual emergency events. The risks of accidents caused by the bulk of ships at the gate of the lock and accidents within the walls of the lock are considered, the possibility of which is due to the repair of the walls due to a violation of the technology of work, wall overloading or the influence of super-calculated cooling of concrete. Bulk ships on the gate depend on the actions or inactions of the boatmaster, however the intensity of the bulk depends on the intensity of the passage. Based on statistical data on accidents at Russian gateways, it is recommended to use the second approach, which is used in other modes of transport, including maritime practice and is confirmed by international standards. Analysis of numerous cases of bulk showed that basically the bulk is completed from the stage of destruction of the bridge by the stage of the gate leaf collapse from the support pillows, the ball joint and the escape from the holder of the spike of the galsband and the fall of the leaf into the lower approach channel. The characteristics of the risk and the method of its evaluation are given. According to the requirements of the Federal Law No. 255-FZ of July 3, 2016 and the Resolution of the Russian Government No. 986 of 02.09.2013, there are recommendations on the classification of Russia's blocked waterways, taking into account the possible magnitude of the risk (risk-oriented approach). According to these recommendations, the class of facilities is set depending on the probability of events and possible damage, which is calculated according to the approved methodology. The risk of accidents is estimated as the product of probability for possible damage, which is calculated on the basis of material, social and environmental losses.

Keywords: lock, event, risk, ship, lock gate, camera walls.

For citation:

Kolosov, Mikhail A., Aleksandr A. Eirus, and Diana V. Zhignovskaia. "Method of determining the risk of accidents in shipping locks." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 555–564. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-555-564.

УДК 626.44

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РИСКА АВАРИЙ В СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗАХ

М. А. Колосов, А. А. Эйрус, Д. В. Жигновская

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

В статье рассматриваются возможные технологические события, которые могут привести к аварии в судоходных шлюзах. Рассмотрены два подхода к оценке риска: первый риск определяется только на основании технического состояния сооружения, второй — на основании статистики фактических аварийных событий. Рассматриваются риски аварий, обусловленных навалом судов на ворота шлюза, и аварий в стенах шлюза, возможность которых обусловлена в период ремонта стен из-за нарушения технологии работ, перегрузки стен или влияния сверхрасчётного охлаждения бетона. Навал судов на ворота зависит от действий или бездействий судоводителя, однако его интенсивность зависит от интенсивности судопропуска. На основании статистических данных об авариях на шлюзах России рекомендуется использовать второй подход, который применяется на других видах транспорта, в том числе в морской практике, и подтверждён международными нормами. Анализ многочисленных случаев навалов показал, что в основном процесс завершения навала начинается со стадии разрушения переходного мостика и продолжается до стадии схода створки ворот с опорных подушек, шаровой опоры, выхода из обоймы шипа гальсбантов и падения створки в нижний подходной канал. Приводится характеристика риска и метод

его оценки. Согласно требованиям Федерального закона №255-ФЗ от 03.07.2016 г. и Постановления Правительства РФ №986 от 02.09.2013 г. даются рекомендации по классификации шлюзованных водных путей России, учитывающие возможную величину риска (рискоориентированный подход). Согласно данным рекомендациям, класс сооружений устанавливается в зависимости от вероятности событий и возможного ущерба, который рассчитывается согласно утвержденной методике. Риск аварий оценивается как произведение вероятности на возможный ущерб, который рассчитывается исходя из материальных, социальных и экологических потерь.

Ключевые слова: шлюз, событие, риск, судно, ворота шлюза, стены камер.

Для цитирования:

Колосов М. А. Методика определения риска аварий в судоходных шлюзах / М. А. Колосов, А. А. Эйрус, Д. В. Жигновская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 555–564. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-555-564.

Введение (Introduction)

4 июля 2016 г. был опубликован Федеральный закон № 255-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений», где указано, что критерии безопасности должны назначаться в соответствии с допустимым уровнем риска аварии гидротехнического сооружения [1]. Постановлением Правительства РФ № 986 от 2 ноября 2013 г. установлена новая классификация гидротехнического сооружения, назначаемая в зависимости от уровня риска [2]. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору утверждены «Методические указания» (Приказ № 240 от 27.06. 2016 г. [3]), в которых определены принципы перевода эксплуатируемых сооружений в новые классы с учётом величины риска.

Для оценки величины риска и изменения классификации шлюзованных водных путей с учётом рискоориентированного подхода необходим прогноз повышения грузооборота и изменения типа судов.

Допустимый уровень риска для шлюзованных водных путей в нормативных материалах не установлен. Методика оценки риска при декларировании безопасности судоходных шлюзов исходит только из технического состояния [5]. Такой же подход рекомендуется использовать для портовых гидротехнических сооружений [6]. Однако риск в других видах транспорта базируется на изучении наиболее опасных событий, при этом в основе расчёта вероятности используется статистика событий [8], [9].

В настоящей статье для оценки вероятности используется именно статистический анализ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Современную оценку величины риска аварий, согласно [4], рекомендуется определять как произведение вероятности аварийного события и величины ущерба от аварии. Данная формула имеет вид

$$R = BV, \tag{1}$$

где B — вероятность события 1/год; V — ущерб от аварии, руб., долл.

Для оценки риска используются два подхода.

Первый подход заключается в расчёте безопасности с учётом технического состояния сооружения, эксплуатационных характеристик и проектных норм. Для судоходных гидроузлов он утвержден методикой [5], которая включена в ГОСТ Р57109 – 2016 [6]. В методике [5] для оценки безопасности сооружения используются баллы [7]. Баллы начисляются за отдельные характеристики конструкций, которые имеют отношение к напорному сооружению, а также за обучение персонала, наличие технической и нормативной документации. Посредством ранжирования и сложения всех баллов выводится интегральный коэффициент безопасности. По этому коэффициенту по условному графику, вне зависимости от сценариев событий, выводится вероятность условных аварий.

Второй подход оценки риска, который практикуется в железнодорожном, автомобильном транспорте, а также в морской практике [8], и утверждён международными нормами [9], базируется на вероятных событиях. При этом указывается, что риск — это случайное событие, опасное, нежелательное и имеющее последствия в виде ущерба. Событие считается рискованным, если имеющимися техническими средствами нельзя обеспечить необходимую безопасность [8].

Для судоходных шлюзов наиболее рискованными событиями являются навалы судна на ворота шлюза (табл. 1). Такой навал может вызвать повреждение ворот, что требует остановки судоходства в связи с ремонтом, а иногда и полного прекращения судоходства. Так, навал на ворота Пермского шлюза (1994 г.) привёл к разрушению шести ворот многоступенчатого шлюза, что вызвало прекращение судоходства на 20 лет, навал на ворота Константиновского шлюза (2004 г.) приостановил движение по Волго-Донскому водному пути на 18 сут, навал на ворота шлюза Сайменского канала (2012 г.) привел к длительной остановке судоходства и потребовал доставки плавающего крана для установки створки ворот на штатное место.

Установлено, что навал судов на ворота зависит от действий или бездействий судоводителя, а также от соотношения размеров судна и камеры шлюза, от компоновки подходных каналов, а главное, от интенсивности судопропуска. Чем интенсивнее идёт судопропуск в шлюзе, тем выше вероятность навала (рис. 1).

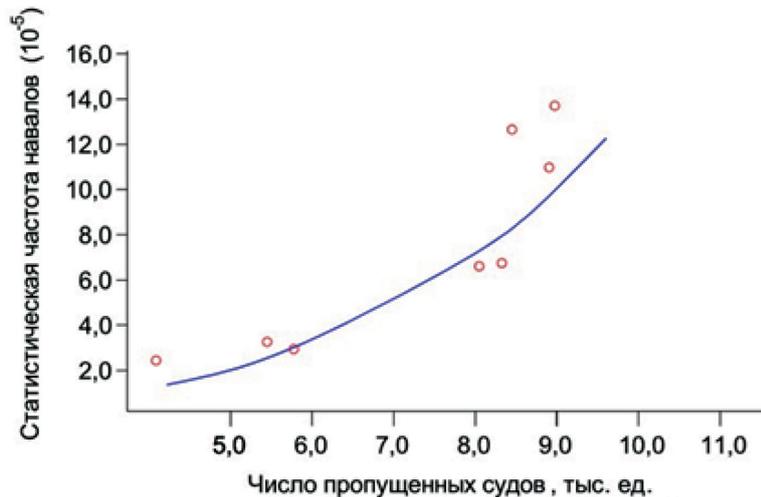


Рис. 1. Зависимость частоты навала судна от интенсивности судопропуска

Расчётными исследованиями установлены зоны разрушения конструкций ворот в зависимости от водоизмещения судна и скорости подхода к воротам, что определяется по формуле

$$E = W \frac{V^2}{2} p, \quad (2)$$

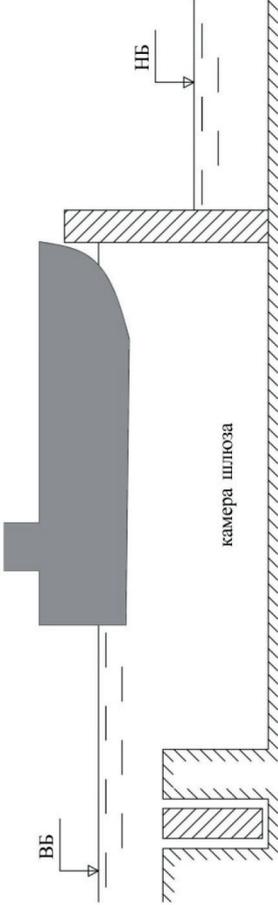
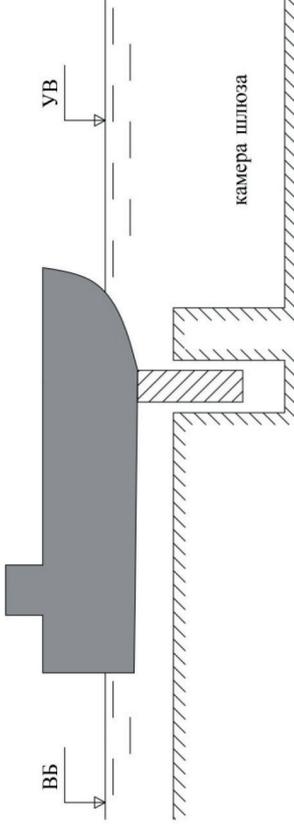
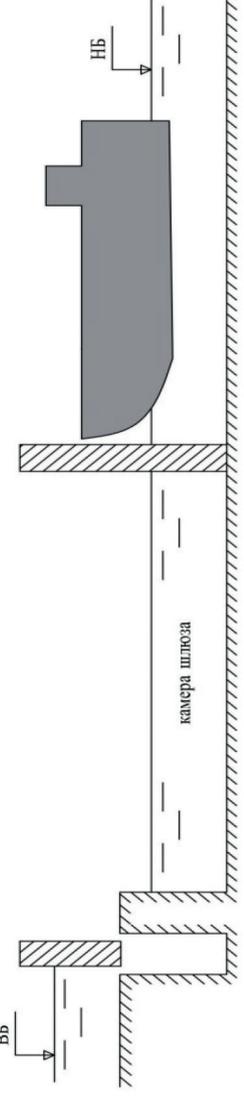
где W — водоизмещение судна, т; V — скорость движения судна, при котором происходит навал, м/с; P — коэффициент присоединённой массы воды для судов, движущихся в камере шлюза, принимается от 1,1 – 1,2 (по данным натурных или лабораторных исследований).

Последствия навала для двухстворчатых ворот представлены на рис. 2 [2]. Степень разрушения ворот можно разделить на следующие стадии:

- первая стадия — разрушение переходного мостика;
- вторая стадия — разрушение верхнего ригеля и звеньев привода открытия – закрытия ворот;
- третья стадия — разрушение балочной решетки, включающей нижележащие ригели, обшивку, стрингеры и диафрагмы.
- четвертая стадия — сход створки ворот с опорных подушек, шаровой опоры, выход из обоймы шипа гальсбантов и падение створки в нижний подходной канал.

Таблица 1

События, вызывающие разрушения ворот шлюзов

Вид события	Схема	Вид разрушения
Навал судна на нижние ворота шлюза при открытых верхних воротах		<ul style="list-style-type: none"> – разрушение мостика и верхнего ригеля; – разрушение привода двухстворчатых ворот; – разрушение балочной решетки и обшивки; – потеря устойчивости ворот с выхода створки из опор и шарового узла; – падение створки в нижний бьеф
Навал судна на верхний ригель погружаемых ворот верхнего бьефа при входе судна в шлюз с верхнего бьефа		<ul style="list-style-type: none"> – повреждение верхнего ригеля ворот; – разрушение привода подъёмно-опускных ворот
Навал судна на ворота нижнего бьефа при движении судна из нижнего подходного канала		<ul style="list-style-type: none"> – потеря устойчивости ворот с выходом из опорных подушек и шаровой опоры; – разрушение привода ворот; – при уровне в камере верхнего бьефа сработка призмы, а при отсутствии аварийных ворот сработка водохранилища.

Анализ многочисленных случаев показал, что в основном навал завершается с первой по четвёртую стадию [10], [11]. В этом случае шлюз останавливается для последующего ремонта ворот, продолжительность которого в зависимости от степени разрушения составляет от нескольких часов до нескольких дней.

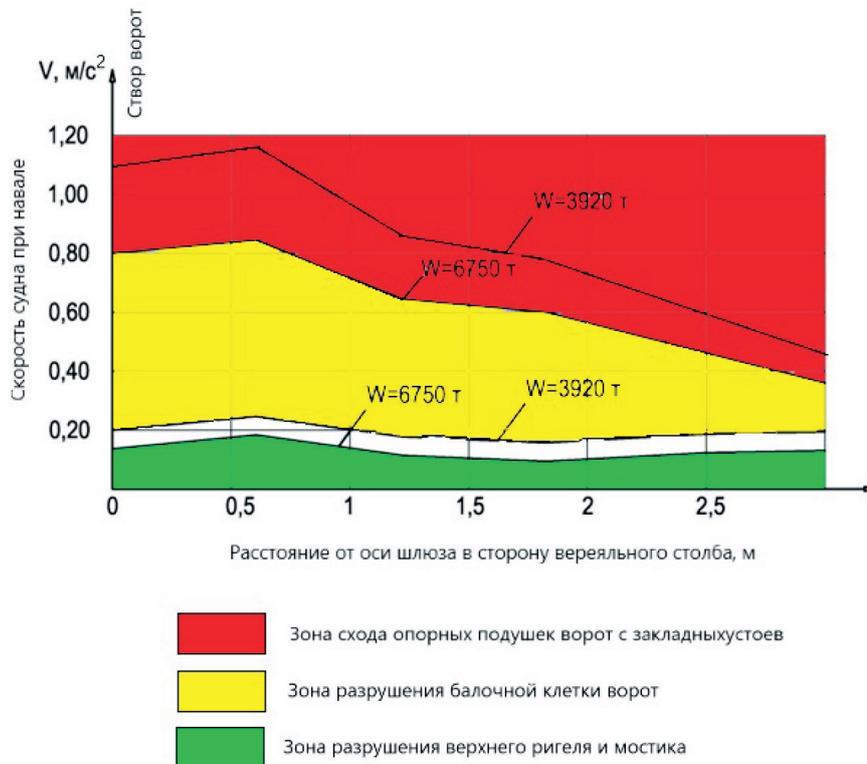


Рис. 2. Область разрушения ворот при навале судна (W — водоизмещение судна)

Согласно закону Хейндриха (США), составленному на основе анализа 9,6 тыс. аварий, установлено следующее соотношение их последствий [4], которое считаем возможным применить к шлюзу:

0,3 % — крупные аварии, связанные с полным разрушением ворот, а также потерей их устойчивости и сходом с опорных подушек;

8,8 % — аварии среднего ущерба (обычно разрушение балочной клетки ворот и механизма привода);

90,9 % — аварии малого ущерба, разрушение переходного мостика и верхнего ригеля.

Сход с опорных подушек и падение створки ворот вызывает сработку призмы шлюза и сброс судна из камеры в нижний бьеф. Такое развитие событий может привести к разрушению судна и в том числе к гибели людей, а при шлюзовании пассажирских судов последствия могут быть особенно тяжёлыми.

Прорыв напорного фронта через нижнюю голову шлюза может привести к сработке верхнего бьефа, так как аварийные заграждения установлены не на всех шлюзах.

Сработка верхнего бьефа приводит к опасным последствиям, а именно [2]:

– в энергетических гидроузлах снижается или прекращается выработка электроэнергии;

– при глубокой сработке обсыхают водозаборы мелиоративных систем, промышленных предприятий, ТЭЦ и жилых посёлков;

– на судоходных каналах, имеющих межшлюзовые бьефы малой емкости (Волго-Дон, Волго-Балт, Беломорско-Балтийский канал), при прорыве напорного фронта верхнего гидроузла, удерживающего большой объём воды водораздельного бьефа, такая авария может затопить всю лестницу нижерасположенных шлюзов.

Для расчёта вероятности повреждений ворот при навале кроме статистических данных о навале судов (см. рис. 1) необходимо знать скорость движения судов при входе их в камеру шлюза, чтобы определить силу навала в камере. Наблюдениями установлено, что скорость движения судов достаточно опасна для ворот шлюза (рис. 3). Если судоводитель не сможет изменить эту скорость, то опасный навал неизбежен. Необходима разработка и оснащение шлюзов системами защиты ворот, а также системами информационного сопровождения судоводителя, включающими передачу данных отклонений от безопасного режима движения.

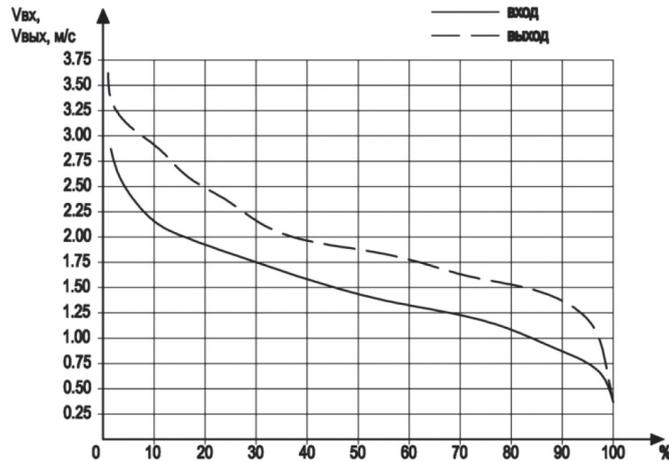


Рис. 3. Обеспеченность скорости входа и выхода в камере шлюза

Результаты (Results)

Установлено, что навал судна на ворота является наиболее опасным событием (рис. 4), а для методики расчёта вероятности и реализации данного события достаточно использовать надёжные статистические данные о навалах [11]. Существующая методика [5] и ГОСТ Р57109-2016 [6] рекомендаций об учёте риска навала судов и последующих разрушений ворот не имеют. Поэтому при составлении декларации безопасности судоходных шлюзов каких-либо рекомендаций по повышению безопасности не даётся, кроме того, оценка технического состояния сооружения в баллах [5] нарушает главный принцип безопасности — *обеспечение несущей способности сооружения* [7].

Основное направление в методике [5] заключается в оценке состояния гидротехнического сооружения. События, которые могут служить причиной аварий [7], [12], здесь не рассматриваются.



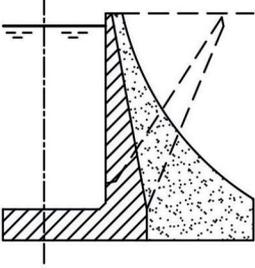
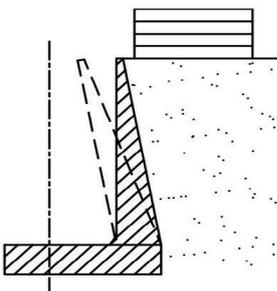
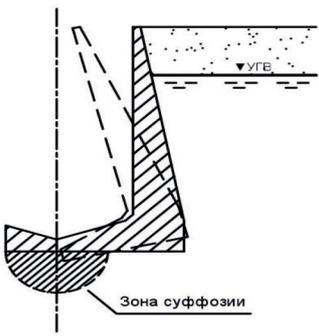
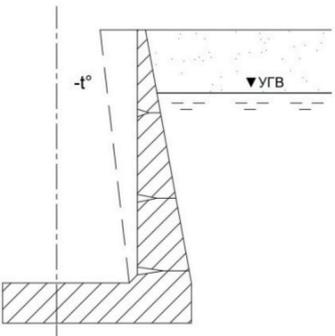
Рис. 4. Последствия аварии на Пермском шлюзе

Обсуждения (Diskussions)

Кроме навала судов на ворота, возможны аварии в бетонной камере шлюза, которые могут привести к разрушению железобетонных стен (характерные случаи приведены в табл. 2). Почти каждое событие связано с человеческой деятельностью. Например, обрушение стен камер Воткинского шлюза (1962 г.), является следствием отчерпывания грунтовой насыпи, подпирающей стену с тыловой стороны, что является следствием бесконтрольной выемки котлована под вторую нитку шлюза. Последствия аварии — гибель 22 человек. Все остальные события возможны при вмешательстве человека (откачка камеры, загрузка стен, охлаждение лицевой грани при ремонте в зимний период). В период эксплуатации шлюза события, связанные с обрушением стен камеры, маловероятны [13].

Таблица 2

События, вызывающие разрушения стен камеры шлюзов

Вид события	Схема	Вид разрушения
Отчерпывание или размыв грунта обратной засыпки		Разрушение лицевой арматуры и падение стены в сторону засыпки от давления воды из камеры
Нагрузка на поверхности засыпки от складированных оборудования и материалов		Разрушение тыловой арматуры и падение стены в сторону камеры при её опорожнении
Фильтрационная суффозия грунта основания в разрезном днище камеры		Поворот и падение стены в сторону камеры
Резкое охлаждение лицевой грани с раскрытием межблочных строительных швов		Разрушение тыловой арматуры вследствие смещения сжатой зоны бетона и падения стены в камеру

Учитывая, что основным событием, которое может вызвать прорыв напорного фронта, является навал судна на ворота, достаточно выполнять расчёт риска с учётом статистики навалов.

Для оценки ущерба при реализации подобного события необходимо учитывать грузооборот водного пути и время простоя шлюза шлюза в ожидании восстановления.

Для оценки класса ответственности, согласно Постановлению Правительства РФ № 986 от 2 ноября 2013 г. и Федеральному закону № 255-ФЗ от 4 июля 2016 г., класс шлюзованных водных путей необходимо назначать с учётом как грузооборота, так и вероятности событий.

По данным показателям можно присвоить следующие классы шлюзованным системам:

I класс — шлюзы Волго-Донского и Волго-Балтийского каналов, Канала имени Москвы. Фактор — интенсивное движение флота, односторонние шлюзы;

II класс — шлюзы Волги и Камы. Фактор — интенсивное движение флота, двухсторонние шлюзы;

III класс — Беломорско-Балтийский канал, Северо-Двинская система, Московско-Окская система. Фактор — малоинтенсивное движение флота.

Класс водных путей может быть изменен в перспективе, когда возрастает грузопоток, что приводит к увеличению риска аварийных событий.

Для оценки риска событий на шлюзованных водных путях России необходима разработка методики, которая должна быть включена в «Свод правил по эксплуатации шлюза».

Выводы (Summary)

1. На основе последствий аварий, которые происходят на судоходных шлюзах, риск следует определять, анализируя возможный случай. Статистика позволит дать оценку их вероятности, выделяя особенно наиболее тяжелые случаи, вызванные навалами судов на ворота и прорывом напорного фронта в нижней голове шлюза.

2. Аварии с разрушением стен камер судоходных шлюзов возможны только в случае их ремонта или реконструкции при нарушении технологии работ. Оценка таких аварий можно определять, исходя из теории возможностей.

3. Для выполнения требований Федерального закона № 255 от 03 июля 2016 г. и Постановления Правительства РФ № 986 от 02 мая 2017 г. необходимо провести расчёты риска для шлюзованных систем и составить новую классификацию водных путей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» № 117-ФЗ от 21 июля 1997 г.
2. Постановление Правительства РФ «О классификации гидротехнических сооружений» № 986 от 2 ноября 2013 г.
3. Методические указания по проверке гидротехнических сооружений на этапе их эксплуатации, утверждён приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 240 от 27.07.2016 г.
4. Кириченко А. В. Организационно-технические основы безопасности судов и портовых средств / А. В. Кириченко, С. В. Латухов, В. А. Никитин [и др.]. — СПб.: ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова», 2014. — 368 с.
5. Методические рекомендации по контролю технического состояния и оценки безопасности судоходных гидротехнических сооружений / Утв. Росморречтранспортом 15 апреля 2011 г. — М., 2011.
6. Мельник Г. В. ГОСТ Р 57109-2016. Внутренний водный транспорт, контроль технического состояния и оценка безопасности гидротехнических сооружений на внутренних водных путях, требования безопасности / Г. В. Мельник // Гидротехника. — 2017. — № 3 (48). — С. 21–24.
7. Колосов М. А. Баллы или несущая способность? (к методике оценки безопасности судоходного шлюза / А. М. Колосов, К. П. Моргунов // Гидротехника. — 2014. — № 2. — С. 82–83.

8. Куклев Е. А. Использование минимаксной концепции риска при оценке безопасности транспортных средств / Е. А. Куклев // Сб. науч.-техн. тр. «Актуальные проблемы транспорта». — СПб.: Российская академия транспорта, 2001. — Т. I. — С. 85–91.

9. British Standard Quality management and quality assurance – Vocabulary. — BS EN ISO-8402, 1992.

10. Богатырев В. Г. Устойчивость двухстворчатых ворот шлюза при навале судов: дис. канд. техн. наук / В. Г. Богатырев. — СПб.: НГАСУ (Сибстрин), 2013. — 17 с.

11. Нычик Т. Ю. Оценка риска аварий и транспортных происшествий в судоходных шлюзах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т. Ю. Нычик. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — 21 с.

12. Моргунов К. П. Предложения по методике декларирования судоходных шлюзов / К. П. Моргунов, А. М. Колосов, С. А. Головков // Гидротехника. XXI век. — 2014. — № 4. — С. 46–51.

13. Колосов М. А. Оценка надёжности безопасности судоходных шлюзов по данным натурных наблюдений / М. А. Колосов, А. А. Смирнова // «Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений водных путей»: сб. материалов юбилейной Междунар. науч.-техн. конф., посвящённой 110-летию создания гидротехнической лаборатории им. проф. В. Е. Тимонова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 59–63.

REFERENCES

1. Russian Federation. Federal Law № 117-FZ from 21 July 1997. O bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii.

2. Russian Federation. Government Resolution № 986 from 2 Nov. 2013. O klassifikatsii gidrotekhnicheskikh sooruzhenii.

3. Metodicheskie ukazaniya po proverke gidrotekhnicheskikh sooruzhenii na etape ikh ekspluatatsii, utverzhden prikazom Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru № 240 ot 27.07.2016 g.

4. Kirichenko, A.V., S.V. Latukhov, V.A. Nikitin, et al. *Organizatsionno-tekhnicheskie osnovy bezopasnosti sudov i portovykh sredstv*. SPb: FGBOU VPO «Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova», 2014.

5. Metodicheskie rekomendatsii po kontrolyu tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenki bezopasnosti sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. Utverzhdeno Rosmorrechtransportom 15 aprelya 2011 g., Moskva, 2011 g.

6. Mel'nik, G.V. “GOST R 57109-2016. Vnutrennii vodnyi transport, kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenka bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii na vnutrennikh vodnykh putyakh, trebovaniya bezopasnosti.” *Gidrotekhnika* 3(48) (2017): 21–24.

7. Kolosov, M.A., and K.P. Morgunov. “Bally ili nesushchaya sposobnost'?” (k metodike otsenki bezopasnosti sudo-khodnogo shlyuza.” *Gidrotekhnika* 2 (2014): 82–83.

8. Kuklev, E.A. “Ispol'zovanie minimaksnoi kontseptsii riska pri otsenke bezopasnosti transportnykh sredstv.” *Sbornik nauchno-tekhnicheskikh trudov «Aktual'nye problemy transporta»*. Vol. 1. SPb.: Rossiiskaya akademiya transporta, 2001. 85–91.

9. British Standard Quality management and quality assurance – Vocabulary. BS EN ISO-8402,1992.

10. Bogatyrev, V.G. Ustoichivost' dvukhstvorchatykh vorot shlyuza pri navale sudov. Abstract of PhD diss. SPb.: Novosibirskii arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2013.

11. Nychik, T.Yu. Otsenka riska avarii i transportnykh proisshествii v sudokhodnykh shlyuzakh. Abstract of PhD diss. SPb.: GUMRF imeni adm. S.O. Makarova, 2014.

12. Morgunov, K.P., A.M. Kolosov, and S.A. Golovkov. “Predlozheniya po metodike deklarirovaniya sudokhodnykh shlyuzov.” *Gidrotekhnika. XXI vek* 4 (2014): 46–51.

13. Kolosov, M.A., and A.A. Smirnova. “Assessing the reliability of navigable lock by data of field observations.” *«Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii vodnykh putei»: sbornik materialov yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 110-letiyu sozdaniya gidrotekhnicheskoi laboratorii imeni professora V.E. Timonova*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017. 59–63.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колосов Михаил Александрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: KolosovMA@mail.ru, kaf_gsk@gumrf.ru

Эйрус Александр Андреевич —
инженер-гидротехник
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет»
199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Университетская наб., д. 7/9

e-mail: arus-s@mail.ru

Жигновская Диана Валерьевна — ассистент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: diana.zhignovskaya@gmail.com,
kaf_gsk@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kolosov, Mikhail A. —
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: KolosovMA@mail.ru, kaf_gsk@gumrf.ru

Eirus, Aleksandr A. —
hydraulic engineer
Saint-Petersburg State University
7/9 University embankment,
St. Petersburg 199034,
Russian Federation

e-mail: arus-s@mail.ru

Zhignovskaia, Diana V. — assistant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation

e-mail: diana.zhignovskaya@gmail.com,
kaf_gsk@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 2 мая 2018 г.

Received: May 2, 2018.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-565-574

EXPERIMENTAL WORKS ON APPLICATION OF THE METHOD OF DIRECT LASER GROWLING AT PRODUCTION OF DETAILS OF SHIP PIPELINE FITTINGS

V. V. Veselkov¹, G. A. Tyumentsev^{1, 2}, V. A. Kozlov^{1, 2}

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

² — Joint Stock Corporation “Shipbuilding & Shiprepair Technology Center”, St. Petersburg, Russian Federation

In article the course and results of experimental works on application of one of a kind of additive technologies, a method of direct laser growling at production of a number of details of ship pipeline fittings are considered. Taking into account that traditional manufacturing techniques of a number of details of ship pipeline fittings are based on machining of cast or stamped preparations that leads to a long cycle and high cost of production of details, especially in case of single requirement as the method of direct laser growling as the way of production which is based on use of three-dimensional model of a product without the need for development of the additional equipment is offered to use an alternative. This method of production of details consists in consecutive layer-by-layer synthesizing of a body of a finished product at the expense of a supply of a stream of the inert transporting gas of metal powder in a zone of influence of a laser beam where under his influence the local area of liquid fusion is created. In article experimental works on assessment of a possibility of application of a method of direct laser growling are described and in particular are reflected: justification of the choice of a method of direct laser growling as preferable technology of additive production of details of ship pipeline fittings, definition of the directions for approbation of application of a method of direct laser growling, the volume and the sequence of work, the technique and results of a research of properties of the metal created by method of direct laser growling Are shown, the comparative analysis of its mechanical properties with mechanical properties of metal rolling is carried out and also work flow on production of prototypes of details and results of their tests is described.

Keywords: additive technologies, ship pipeline fittings, direct laser growling.

For citation:

Veselkov, Vyacheslav V., Grigoriy A. Tyumentsev, and Vitaliy A. Kozlov. “Experimental works on application of the method of direct laser growling at production of details of ship pipeline fittings.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 565–574. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-565-574.

УДК 621.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ СУДОВОЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

В. В. Веселков¹, Г. А. Тюменцев^{1, 2}, В. А. Козлов^{1, 2}

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

² — АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрены ход и результаты экспериментальных работ по применению одной из разновидностей аддитивных технологий — метода прямого лазерного выращивания при изготовлении ряда деталей судовой трубопроводной арматуры. С учетом того, что традиционные технологии изготовления ряда деталей судовой трубопроводной арматуры базируются на механической обработке литых или штампованных заготовок, которая приводит к длительному циклу и высокой себестоимости изго-

товления деталей, особенно в случае единичной потребности, в качестве альтернативы предлагается использовать метод прямого лазерного выращивания как способ изготовления, базирующийся на использовании трехмерной модели изделия, без необходимости разработки дополнительной оснастки. Данный метод изготовления деталей заключается в последовательном послойном синтезировании тела готового изделия за счет подвода струи инертного транспортирующего газа металлического порошка в зону воздействия лазерного луча, где под его воздействием сформирована локальная область жидкого расплава. В статье описаны экспериментальные работы по оценке возможности применения метода прямого лазерного выращивания и в частности отражены следующие вопросы: обоснование выбора метода прямого лазерного выращивания как предпочтительной технологии аддитивного изготовления деталей судовой трубопроводной арматуры; определение направлений для апробации применения метода прямого лазерного выращивания; объем и последовательность проведения работ. Показаны методика и результаты исследования свойств металла, сформированного методом прямого лазерного выращивания, проведен сравнительный анализ его механических свойств с механическими свойствами металлопроката, а также описан ход работ по изготовлению опытных образцов деталей и результаты их испытаний.

Ключевые слова: аддитивные технологии, судовая трубопроводная арматура, прямое лазерное выращивание.

Для цитирования:

Веселков В. В. Экспериментальные работы по применению метода прямого лазерного выращивания при изготовлении деталей судовой трубопроводной арматуры / В. В. Веселков, Г. А. Тюменцев, В. А. Козлов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 565–574. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-565-574.

Введение (Introduction)

Судовая арматура — одна из важнейших составляющих систем судна, напрямую влияющая на их работоспособность. Из-за возросшего объема строительства новых судов и других объектов морской техники, на рынке возникла потребность в значительных объемах судовой трубопроводной арматуры (СТА). В связи с этим четко прослеживается тенденция необходимости освоения новых инновационных технологий и способов производства для повышения конкурентоспособности и эффективности предприятия. Значительная часть номенклатуры деталей СТА изготавливается с использованием традиционных технологий, основанных на механической обработке литых или штампованных заготовок, что приводит к необходимости конструирования и изготовления дорогостоящей оснастки с помощью увеличения себестоимости изделий и сроков их изготовления, особенно в случае изготовления небольшой партии или единичных экземпляров деталей. Таким образом, в современном арматурном производстве существует необходимость внедрения новых способов изготовления деталей, основанных на применении современных ресурсосберегающих технологий с минимальным уровнем последующей механической обработки. Одним из таких направлений являются *аддитивные технологии*. Принципиально их можно разделить на семь видов: струйное нанесение материала (Material Jetting), струйное нанесение связующего вещества (Binder Jetting), листовая ламинация (Sheet Lamination), фотополимеризация в ванне (Vat Photopolymerization), синтез на подложке (Powder Bed Fusion), прямой подвод энергии и материала (Directed Energy Deposition), послойное нанесение расплавленного материала через экструдер (Material Extrusion) [1]. Первые пять технологий ориентированы на изготовление изделий из полимерных материалов, при этом они могут активно использоваться как для изготовления макетов и функциональных прототипов при проектировании изделий [2], [3], так и качестве вспомогательной оснастки, к примеру — в литейном производстве [4], [5]. Для изготовления изделий из металла распространение получили два направления аддитивных технологий: Powder Bed Fusion и Direct Energy Deposition.

Подход к изготовлению детали с помощью технологии Powder Bed Fusion (рис. 1) основан на выборочном спекании или сплавлении части слоя порошка с текущим сечением детали. После формирования слоя, платформа с порошком опускается на величину, равную толщине слоя порошка, специальный механизм засыпает новый слой порошка, после чего процесс выборочного

спекания / сплавления повторяется [6]. Процесс повторяется до момента полного формирования тела детали. По окончании процесса деталь извлекается из камеры, а оставшийся порошок после определенных подготовительных процедур можно использовать повторно.

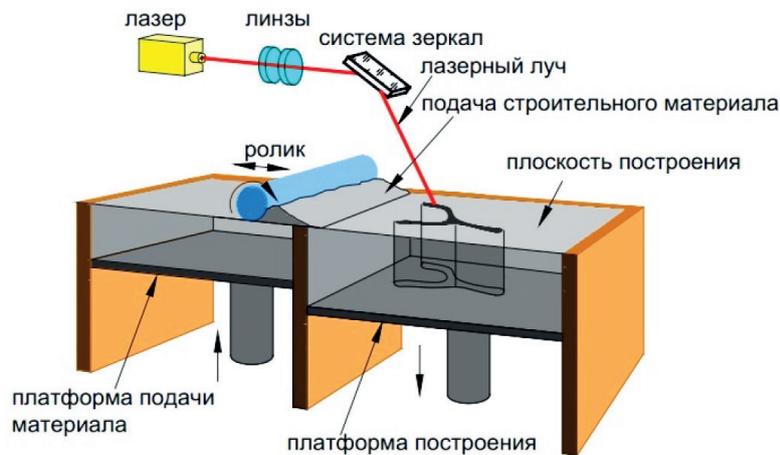


Рис. 1. Схема создания объекта по технологии Powder Bed Fusion

Технология Direct Energy Deposition (рис. 2) заключается в подводе исходного материала (металлического порошка) и энергии (лазерного луча) непосредственно в точку синтезирования тела готового изделия. Механизм формирования следующий: под воздействием лазерного луча происходит оплавление зоны формируемого изделия, в результате чего образуется локальная область жидкого расплава. В зону расплава струей инертного транспортирующего газа вдувается порция металлического порошка. Причем газопорошковая струя может быть как коаксиальной, так и некоаксиальной сфокусированному лазерному лучу, который обеспечивает нагрев, частичное плавление порошка и подогрев подложки [7]. В России за данной технологией закрепилось название «Метод прямого лазерного выращивания» (метод ПЛВ).

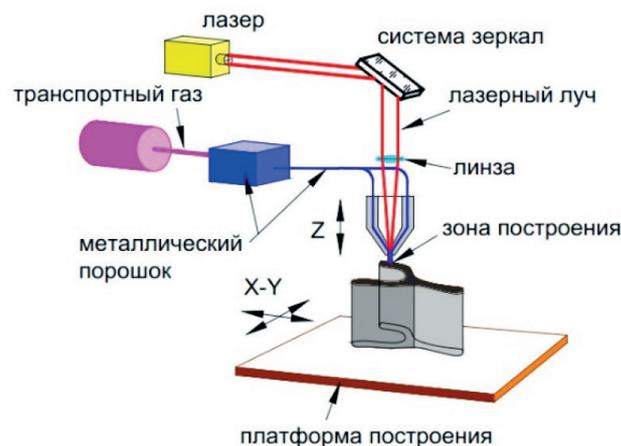


Рис. 2. Схема создания объекта по технологии Direct Energy Deposition

В России в настоящее время активно ведутся работы по исследованию и оптимизации технологий класса Powder Bed Fusion [8] – [10] (селективное лазерное спекание и селективное лазерное сплавление), но для изготовления деталей судовой трубопроводной арматуры предпочтительнее метод ПЛВ ввиду следующих причин:

– он позволяет формировать структуры уже на готовом основании, что дает возможность осуществлять выращивание отдельных конструктивных элементов и выполнение наплавки [11], и, соответственно, существенно расширяет возможности его применения;

– сменой порошка непосредственно в процессе изготовления можно получать отдельные элементы или поверхности детали с механическими и иными свойствами, отличными от свойств основного материала детали;

– для данного метода, в отличие от технологий класса Powder Bed Fusion, требуемая масса расходного материала (порошка) примерно равна массе полученной детали. В селективном методе технология изготовления требует, чтобы при формировании сечения детали было полное заполнение порошком всей рабочей поверхности установки. После окончания процесса изготовления неиспользованный порошок можно применять повторно, но при этом для обеспечения возможности изготовления деталей в наличии должен быть какой-то неснижаемый остаток порошка, служащий для заполнения объёма камеры построения;

– этот метод обладает большей производительностью.

Благодаря этому именно метод ПЛВ (как технология, обладающая большей универсальностью) был выбран для проведения данных исследований.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для апробации возможности применения метода ПЛВ при изготовлении деталей СТА было определено два направления работ:

- 1) изготовление опытных образцов деталей СТА с проведением испытаний согласно предъявляемым конструкторской документацией требованиям;
- 2) изготовление образцов металла и проведение испытаний на определение его механических свойств.

В качестве опытных образцов были выбраны детали клапана запорного, используемого в трубопроводных системах с проводимой средой «пар» давлением 5,4 МПа (54 кг/см²): корпус и тарелка. Изначально корпуса подобного типа изготавливались на основе использования заготовки, полученной штамповкой, на которой выполнялась наплавка уплотнительного поля с последующей окончательной механической обработкой в соответствии с требованиями конструкторской документации. Однако труднодоступность места наплавки уплотнительного поля привела к необходимости изменения технологической схемы изготовления корпусов данного типа. Процесс изготовления состоял из следующих операций: изготовление отдельно нижней части корпуса; выполнение наплавки уплотнительного поля сплавом, твердость которого превышает твердость основного материала детали; последующая приварка цилиндрической заготовки к основанию корпуса с наплавкой; проведение окончательной механической обработки. Наличие дополнительных технологических процессов существенно увеличивало трудоемкость изготовления детали.

В качестве второй детали, совместно с корпусом образующей запорный элемент клапана, была выбрана тарелка. Методом ПЛВ планировалось сформировать уплотнительное поле на заранее изготовленной заготовке. При формировании уплотнительного поля по традиционной технологии наплавки на поверхности заготовки необходимо выполнение дополнительной проточки под первоначальную наплавку валика, при формировании уплотнительного поля с применением метода ПЛВ наплавка формируется на ровной поверхности.

В качестве материала, из которого изготавливались образцы, использовались металлические порошки нержавеющей стали марки 316L (основной материал) и Stellite 6 (наплавка уплотнительного поля) производства *Castolin Eutectic*. Изготовление заготовок опытных образцов деталей методом ПЛВ выполнялось в Институте лазерных и сварочных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета имени Петра Великого. Окончательная механическая обработка и испытания деталей осуществлялись комплексом арматурного производства АО «ЦТСС» КБ «Армас».

В процессе изготовления опытного образца корпуса методом ПЛВ использовалась схема, схожая с предусмотренной конструкторской документацией схемой последовательного изготовления отдельных частей корпуса: формирование нижней части корпуса, формирование уплотни-

тельного поля, формирование цилиндрической части корпуса, окончательная механическая обработка. Заготовка опытного образца корпуса представлена на рис. 3.



Рис. 3. Заготовка корпуса клапана запорного, сформированная методом ПЛВ

На рис. 4 представлена последовательность формирования уплотнительного поля опытного образца тарелки методом ПЛВ на заранее изготовленной заготовке.

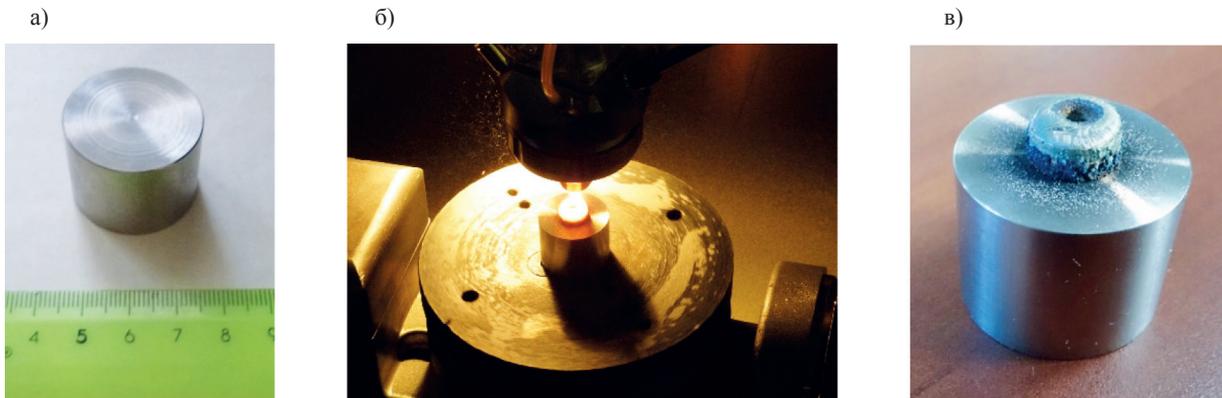


Рис. 4. Последовательность формирования уплотнительного поля тарелки:
 а — исходная заготовка-основание; б — процесс формирования;
 в — заготовка тарелки до проведения окончательной механической обработки

По окончании изготовления заготовок опытных образцов деталей была произведена их окончательная механическая обработка (рис. 5). В процессе изготовления дефектов деталей выявлено не было. По окончании механической обработки корпус и тарелка успешно прошли все необходимые испытания, предусмотренные конструкторской документацией, включая проверку на плотность и прочность корпуса гидравлическим давлением 9,6 МПа (96 кг/см²), а также совместную проверку на герметичность узла затвора давлением 8,0 МПа (80 кг/см²).

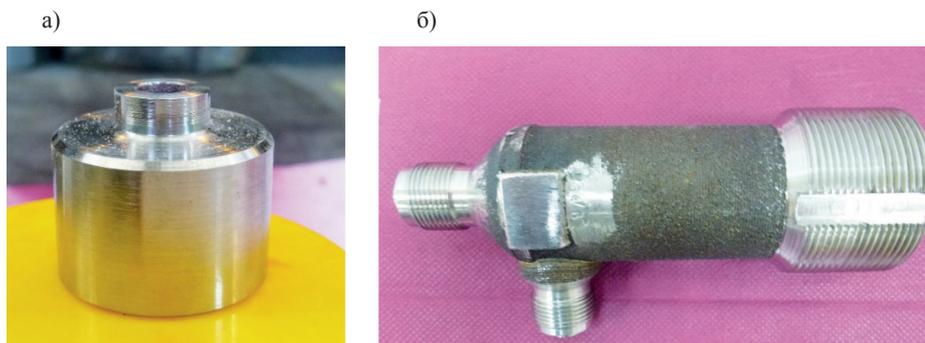


Рис. 5. Опытные образцы деталей клапана запорного после проведения механической обработки:
 а — тарелка клапана запорного; б — корпус клапана запорного

Для определения механических свойств металла и оценки их анизотропии, методом ПЛВ была сформирована цельная плита, из которой путем нарезки на ленточной пиле были выполнены заготовки для следующих образцов (рис. 6):

- шесть образцов для испытаний на разрыв по ГОСТ 1497-84 (3 шт. типа А (маркировка II) и 3 шт. типа Б (маркировка I));
- шесть образцов для испытаний на ударный изгиб ГОСТ 9454-78 (3 шт. типа А (маркировка III) и 3 шт. типа Б (маркировка IV));
- один образец для проведения испытаний на склонность к межкристаллитной коррозии по методу АМУ ГОСТ 6032-84 и РД5.9256-76 с провоцирующим нагревом (диаметр 10 мм и длина 80 мм, маркировка V).

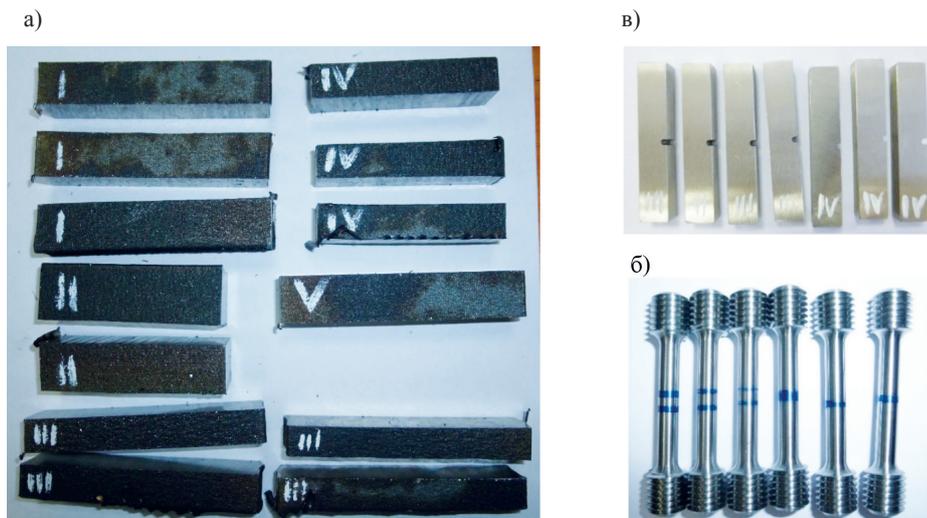


Рис. 6. Образцы для определения механических свойств образцов металла:

- а — образцы, нарезанные ленточной пилой из цельной заготовки;
- б — образцы для испытаний на ударный изгиб; в — образцы для испытаний на разрыв

Образцы типа А (маркировка II и III) изготавливались так, чтобы в процессе испытаний направление воздействующего фактора (разрывного или ударного усилия) было перпендикулярно направлению выращивания. Образцы типа Б (маркировка I и IV) изготавливались так, чтобы в процессе испытаний направление воздействующего фактора было параллельно направлению выращивания. Пространственная ориентация образцов представлена на рис. 7. Режим изготовления (мощность лазерного излучения, диаметр лазерного луча в зоне обработки, скорость перемещения и т. д.) плиты идентичен режиму изготовления опытного образца корпуса.

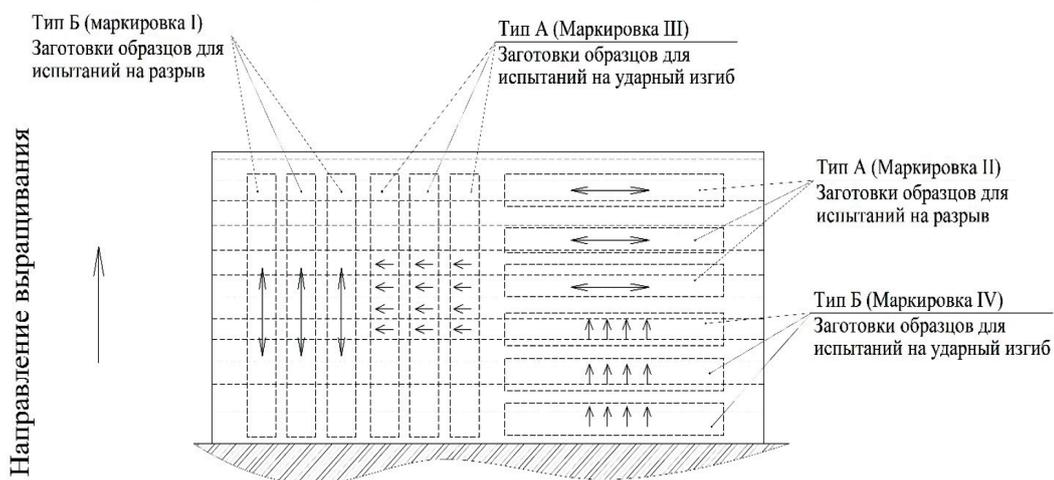


Рис. 7. Расположение образцов для определения механических свойств в заготовке

Результаты (Results)

Образцы для определения механических свойств были подвержены испытаниям на растяжение и удар при температуре окружающей среды +22 °С и относительной влажности 44 % в испытательной лаборатории НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей». На основании протоколов испытаний была составлена сводная таблица механических свойств образцов металла, сформированного методом ПЛВ (табл. 1 и 2).

Дополнительно, исходя из требований конструкторской документации на опытные образцы деталей, были проведены испытания на склонность материала, сформированного методом ПЛВ, к межкристаллитной коррозии по методу АМУ (ГОСТ 6032-84 «Стали и сплавы коррозионно-стойкие»). Методы испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии с провоцирующим нагревом. По итогам испытаний было установлено, что склонности материала к межкристаллитной коррозии не наблюдается, что соответствует предъявляемым требованиям.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов на растяжение по ГОСТ 1497

Номер образца / маркировка	Модуль упругости E, Н/мм ²	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Предел текучести $\sigma_{п0,5}$, Н/мм ²	Относительное		
					удлинение δ_5 , %	равномерное удлинение δ_p , %	сужение, Ψ , %
Среднее значение для (I)	217333	626	419,6	429,6	51,96	33,90	43,10
Среднее значение для (II)	146000	632	434	434,6	49,56	29,56	58,03

Таблица 2

Результаты испытаний образцов на удар по ГОСТ 9454

Маркировка	Работа удара, КУ	Ударная вязкость, КСУ
	Дж	Дж/см ²
Среднее значение для (III)	95,4	162,1
Среднее значение для (IV)	89,26	150,73

Обсуждение (Discussion)

Экспериментальное изготовление и последующие испытания опытных образцов деталей клапана запорного подтверждают возможность применения метода ПЛВ при изготовлении деталей СТА, в том числе состоящих из нескольких материалов. Для оценки свойств металла, полученного методом ПЛВ, необходимо произвести их сравнение со свойствами металла в традиционном состоянии поставки. В табл. 3 приведены механические свойства для металлопроката марки стали аналогичной марки порошка (AISI 316L). Оценка анизотропии свойств металла относительно двух взаимно перпендикулярных направлений представлена в табл. 4.

Таблица 3

Механические свойства стали AISI 316L

Состояние поставки	Предел прочности, МПа (min)	Предел текучести, МПа (min)	Относительное удлинение δ_5 (min)	Относительное сужение, % (min)	Твердость, НВ (max)
316L (hot-finished, condition A)*	485	170	40	50	—
316L (condition A, cold-finished, до 12,7 мм)*	620	310	30	40	—
316L (condition A, cold-finished, более 12,7 мм)*	485	170	30	40	—
316L **	485	170	40	—	217

Примечания: * — в соответствии с ASTM A276 [12], ** — в соответствии с ASTM 240 [13]).

Оценка анизотропии механических свойств

Параметры	Модуль упругости E	Временное сопротивление σ_b	Предел текучести $\sigma_{0,2}$	Предел текучести $\sigma_{п 0,5}$	Удлинение		Сужение Ψ	Работа удара КУ	Ударная вязкость КСУ
					относительное δ_5	равномерное δ_p			
Степень анизотропии, %	67	Менее 1	3,3	1,15	4,61	12,8	25,72	6,43	7

По большинству параметров анизотропия свойств не превышает 15 %, существенная анизотропия свойств присутствует только у параметров модуля упругости и относительного сужения. Причиной анизотропии данных значений может являться однонаправленность всех валиков металла, сформированных в процессе создания единой плиты-заготовки.

Выводы (Summary)

На основе результатов изготовления и испытаний опытных образцов деталей, сравнительного анализа механических свойств образцов металла, сформированного методом ПЛВ, и металла в привычном состоянии поставки, можно сделать следующие выводы.

1. Механические свойства (с учетом анизотропии в различных направлениях) образцов металла, полученного методом ПЛВ, отвечают требованиям, предъявляемым к механическим свойствам материала аналогичной марки в традиционных состояниях поставки. В целом, уровень механических свойств синтезированного металла находится на уровне свойств проката. Для выравнивания свойств металла можно применить подход построения, в котором направление валиков в каждом следующем слое будет отличаться от предыдущего, с повторением через определенное количество слоев.

2. Технология изготовления опытного образца корпуса подтвердила возможность (благодаря смене порошка непосредственно в процессе изготовления) формировать отдельные конструктивные элементы из материалов, отличных от основного материала детали, что делает данную технологию привлекательной для применения в изготовлении деталей СТА.

В заключение следует отметить, что для широкого внедрения данной технологии требуется выполнить комплекс дальнейших исследований как в части оптимизации режимов изготовления для обеспечения требуемых свойств формируемого металла, так и в части отработки технологии изготовления готовых деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 57558-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Ч. 1. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2017. — 12 с.
- Bregman A. Аддитивное производство — прорыв в арматуростроении? / A. Bregman, K. Kunkel // Арматуростроение. — 2015. — № 3 (96). — С. 68–75.
- Саженов А. Н. Экспериментальный стенд для исследования аэродинамических характеристик лопаток газовых турбин / А. Н. Саженов, Н. Ю. Самохвалов, М. Н. Соловьев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. — 2015. — № 2 (41). — С. 41–58. DOI: 10.15593/2224-9982/2015.41.02.
- Балякин А. В. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания / А. В. Балякин, В. Г. Смелов, Л. А. Чемпинский // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2012. — № 3-2 (34). — С. 47–52.
- Лунев А. С. Внедрение аддитивных технологий в литейном производстве авиационной компании «Прогресс» / А. С. Лунев, Д. В. Бушуев, Ю. Ю. Горб, Н. А. Батина // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2016. — № 3 (28). — С. 99–105.

6. Галимова Л. А. Структура и механические свойства образцов из нержавеющей стали, полученных методом селективного спекания / Л. А. Галимова, В. В. Атрощенко, В. В. Смирнов [и др.] // Вестник башкирского университета. — 2016. — Т. 21. — № 2. — С. 258–263.

7. Туричин Г. А. Технологические основы высокоскоростного прямого лазерного выращивания изделий методом гетерофазной порошковой металлургии / Г. Туричин, О. Климова, Е. Земляков [и др.] // Фотоника. — 2015. — № 4 (52). — С. 68–83.

8. Сухов Д. И. Влияние параметров селективного лазерного сплавления на образование пористости в синтезированном материале коррозионностойкой стали / Д. И. Сухов, П. Б. Мазалов, С. В. Неруш, Н. А. Ходырев // Труды ВИАМ. — 2017. — № 8 (56). — С. 4. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-4-4.

9. Рябов Д. К. Изменение структуры сплава АК9Ч, полученного селективным лазерным спеканием, в процессе термической обработки / Д. К. Рябов, Д. В. Зайцев, Н. В. Дынин, А. О. Иванова // Труды ВИАМ. — 2016. — № 9 (45). — С. 3. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-3-3.

10. Сотов А. В. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления деталей ГТД методом селективного лазерного сплавления порошка жаропрочного сплава ВВ751П / А. В. Сотов, Н. Д. Проничев, В. Г. Смелов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. — 2017. — Т. 19. — № 4-1. — С. 96–104.

11. Корсмик Р. С. Лазерная порошковая восстановительная наплавка лопаток газотурбинного двигателя / Р. С. Корсмик, Г. А. Туричин, О. Г. Климова-Корсмик [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2016. — Т. 15. — № 3. — С. 60–69. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-60-69.

12. ASTM A276 / A276M – 17. Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes. — ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. DOI: 10.1520/A0276_A0276M-17.

13. ASTM A240/A240M-2017. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. — ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. DOI: 10.1520/A0240_A0240M-17.

REFERENCES

1. Russian Federation. State Standard GOST 57558-2017 (ISO/ASTM 52900:2015). Additive manufacturing. General principles. Terminology, IDT. M.: Standartinform, 2017.

2. Bregman, A., and K. Kunkel. “Additivnoe proizvodstvo-proryv v armaturostroenii?” *Armaturostroenie* 3(96) (2015): 68–75.

3. Sazhenkov, A.N., N.Yu. Samokhvalov, and M.N. Solovyev. “Test facility for gas turbine airfoils aerodynamic study.” *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin* 2(41) (2015): 41–58. DOI: 10.15593/2224-9982/2015.41.02.

4. Balaykin, Andrey Vladimirovich, Vitaly Gennadievich Smelov, and Leonid Andreevich Chempinskiy. “Additive technology application details of combustion.” *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering* 3-2(34) (2012): 47–52.

5. Lunev, Anatoliy, Dmitriy Bushuev, Yuriy Gorb, and Nadezhda Batina. “The introduction of additive technology for foundry production in the Aviation Company Progress.” *The Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin* 3(28) (2016): 99–105.

6. Galimova, L.A., V.V. Atrochenko, V.V. Smirnov, A.A. Churakova, D.V. Gunderov, and G.I. Zamanova. “Structure and properties of stainless steel specimens received by method of selective sintering.” *Bulletin of Bashkir University* 21.2 (2016): 258–263.

7. Turichin, G., O. Klimova, E. Zemlyakov, K. Babkin, V. Somonov, F. Shamray, A. Travianov, and P. Petrovskiy. “Technological Basis of High-Speed Direct Laser Growth of products by Heterophase Powder Metallurgy Method.” *Photonics* 4(52) (2015): 68–83.

8. Sukhov, D.I., P.B. Mazalov, S.V. Nerush, and N.A. Khodirev. “The influence of SLS parameters on pores formation in stainless steel material.” *Trudy VIAM* 8(56) (2017): 4. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-4-4.

9. Ryabov, D.K., D.V. Zaytsev, N.V. Dinin, and A.O. Ivanova. “Alternation of structure of selective laser melted aluminum alloy АК9ch during heat treatment.” *Trudy VIAM* 9(45) (2016): 3. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-3-3.

10. Sotov, Anton, Nikolai Pronichev, Vitaly Smelov, Valery Bogdanovich, Mihail Giorbelidze, and Anton Agapovichev. “Development algorithm of the technological process of manufacturing gas turbine parts by selective laser melting.” *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 19.4-1 (2017): 96–104.

11. Korsmik, R.S., G.A. Turichin, O.G. Klimova-Korsmik, E.V. Zemlyakov, and K.D. Babkin. "Laser powder weld reconditioning of gas turbine engine blades." *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering* 15.3 (2016): 60–69. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-60-69.

12. ASTM A276 / A276M – 17. Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. DOI: 10.1520/A0276_A0276M-17.

13. ASTM A240/A240M-2017. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. DOI: 10.1520/A0240_A0240M-17.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Веселков Вячеслав Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: VeselkovVV@gumrf.ru

Тюменцев Григорий Александрович —
аспирант, инженер-конструктор I категории
Научный руководитель:

Веселков Вячеслав Васильевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
АО «Центр технологии судостроения
и судоремонта»
198095, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Промышленная, 7
e-mail: 3903@sstc.spb.ru,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru

Козлов Виталий Александрович —
аспирант, инженер-конструктор 3 категории
Научный руководитель:

Веселков Вячеслав Васильевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
АО «Центр технологии судостроения
и судоремонта»
198095, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Промышленная, 7
e-mail: 3903@sstc.spb.ru,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Veselkov, Vyacheslav 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: VeselkovVV@gumrf.ru

Tiumentsev, Grigoriy A. —
Postgraduate, engineer
Supervisor:

Veselkov, Vyacheslav V.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg
198035, Russian Federation
JSC "Shipbuilding & Shiprepair
Technology Center"
7 Promyshlennaya Str., St. Petersburg,
198095, Russian Federation
e-mail: 3903@sstc.spb.ru,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru

Kozlov, Vitaliy A. —
Postgraduate, engineer
Supervisor:

Veselkov, Vyacheslav V.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg
198035, Russian Federation
JSC "Shipbuilding & Shiprepair
Technology Center"
7 Promyshlennaya Str., St. Petersburg,
198095, Russian Federation
e-mail: 3903@sstc.spb.ru,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2018 г.

Received: April 12, 2018.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-575-585

OPTIMUM THREE-PHASE PULSE WIDTH MODULATION ACCORDING TO THE CRITERION OF DISPERSION OF THE CURRENT TO THE LOAD

I. V. Belousov, V. F. Samosejko

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

An analytical approach to optimal pulse-width modulation is considered. In this case, the pulse width modulation means the process of approximation by pulses of the voltage (modulated) of the required smooth (modulating) voltage required to generate the load current, which is a low-frequency filter. Error of the modulation current is the difference between the current generated by a function of the modulated voltage and the current generated is a function of the modulating voltage. The modulation quality index is interpreted as a numerical integral characteristic of the quadratic modulation error on the modulation interval (local dispersion). Under the three-phase modulation refers to the modulation of the three electronic switches. For a three-phase bridge, the expression of the current dispersion in the load is obtained. The formula for three-phase bridge switching functions is synthesized. It is shown that the three-phase pulse-width modulation algorithm has four free variables by which the minimum current dispersion in the load can be searched. Free variables are three parameters of the pulse shift relative to the center of the modulation interval and the zero-potential function, which is a linear combination of switching functions of pairs of electronic switches. An expression of the local dispersion of the load current is found. The formulas for determining the shift parameters and the zero potential function, which minimize the local variance of the current. It is shown that the optimal location of the pulses on the pulse-width modulation period can significantly reduce the current dispersion at a relative modulation frequency of less than 50. As the relative modulation frequency increases, the centrally symmetric modulation of the pulses over the modulation interval becomes optimal. It is shown that the method of vector pulse width modulation (SVPWM) at a relative modulation frequency of more than 50 is close to optimal modulation. At small values of the modulation frequency optimal modulation significantly reduces the local variance of the current. The solution of the optimal pulse-width modulation problem will allow reducing energy losses in propulsion motors and their vibration.

Keywords: pulse-width modulation; three-phase modulation; modulation quality; local current dispersion; optimization.

For citation:

Belousov, Igor V., and Veniamin F. Samosejko. "Optimum three-phase pulse width modulation according to the criterion of dispersion of the current to the load." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 575–585. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-575-585.

УДК 621.341.572

ОПТИМАЛЬНАЯ ТРЕХФАЗНАЯ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ПО КРИТЕРИЮ ДИСПЕРСИИ ТОКА В НАГРУЗКЕ

И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко

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

Рассмотрен аналитический подход к оптимальной широтно-импульсной модуляции. При этом широтно-импульсная модуляция в работе понимается как процесс аппроксимации импульсами напряжения (модулированного) желаемого гладкого (модулирующего) напряжения, необходимого для формирования

тока нагрузки, которая является фильтром низкой частоты. Под ошибкой модуляции по току понимается разность между током, порождаемым модулированной функцией напряжения, и током, порождаемым модулирующей функцией напряжения. Мера качества модуляции трактуется как числовая интегральная характеристика квадратичной ошибки модуляции на интервале модуляции (локальной дисперсии). Под трехфазной модуляцией понимается модуляция тремя полумостами. Для трехфазного моста получено выражение дисперсии тока в нагрузке. Синтезированы формулы для коммутационных функций полумостов. Показано, что алгоритм трехфазной широтно-импульсной модуляции имеет четыре свободных переменных, по которым может производиться поиск минимума дисперсии тока в нагрузке. К свободным переменным относятся три параметра сдвига импульсов, генерируемых полумостами, и нулевая потенциальная функция, являющаяся линейной комбинацией скважностей коммутационных функций полумостов. Найдено выражение локальной дисперсии тока нагрузки. Получены формулы для определения параметров сдвига и нулевой потенциальной функции, которые минимизируют локальную дисперсию тока. Показано, что оптимальное расположение импульсов на периоде широтно-импульсной модуляции позволяет существенно снизить дисперсию тока при относительной частоте модуляции, меньшей 50. При увеличении частоты модуляции оптимальной становится модуляция с центрально-симметричным положением импульсов на интервале модуляции. Показано, что метод векторной широтно-импульсной модуляции при частоте модуляции больше 50 наиболее близок к оптимальной модуляции. При малых значениях частот модуляции оптимальная модуляция дает существенное снижение локальной дисперсии тока. Решение задачи оптимальной трехфазной широтно-импульсной модуляции позволит уменьшить потери энергии в гребных электродвигателях и их вибрацию.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, трехфазная модуляция, качество модуляции, локальная дисперсия тока, оптимизация.

Для цитирования:

Белоусов И. В. Оптимальная трехфазная широтно-импульсная модуляция по критерию дисперсии тока в нагрузке / И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 575–585. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-575-585.

Введение (Introduction)

Управление потоками электрической энергии с развитием силовой электроники посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) нашло широкое применение в различных областях техники и в частности для управления гребными электродвигателями. Качество ШИМ существенно зависит от частоты следования импульсов. Однако увеличение частоты модуляции ведет к возрастанию динамических потерь в электронных ключах. Большие частоты модуляции применяются в электрических преобразователях меньшей мощности. Мощности преобразователей электрической энергии, реализуемых на полностью управляемых электронных ключах, неуклонно растут. Так, мощность единичных трехфазных преобразователей частоты, используемых в системах электродвижения судов, в настоящее время достигает 5 МВт и более. Повышение качества модуляции напряжения на нагрузке ведет к снижению потерь мощности и уменьшению виброшумовых характеристик электроприводов. Поэтому повышение качества модуляции является актуальной задачей.

Проблеме качества ШИМ с момента начала ее использования в силовой преобразовательной технике уделялось огромное внимание. Разработаны различные методы ШИМ. Наиболее известными являются классическая [1], [2], модифицированная классическая [3] – [5], векторная [6], [7] ШИМ. Сравнению методов ШИМ посвящено большое количество работ [8] – [11], которые основаны на компьютерном моделировании. Ввиду импульсного характера функций моделирование требует существенных затрат машинного времени. Данный подход позволяет приблизиться к оптимальной ШИМ, но доказать, что алгоритм ШИМ оптимальный, не может. Найти же оптимальный метод ШИМ при заданном критерии оптимальности возможно лишь аналитическим путем. В данной работе решается задача синтеза алгоритма оптимальной трехфазной ШИМ на основе аналитического подхода.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Под трехфазной модуляцией понимается модуляция тремя полумостами A , B , C (рис. 1), образующими трехфазный электронно-ключевой мост. Полумост состоит из двух последова-

тельно соединенных ключей VH_X и VL_X ($X = A, B, C$). Питание двухфазной электронно-ключевой цепи осуществляется от источника постоянного напряжения U_d . Общий потенциал нижних ключей и источника питания принимается равным нулю. Общий потенциал верхних ключей и источника питания принимается равным напряжению источника питания U_d . Трехфазная нагрузка представляет собой LR — фильтр низкой частоты. Для характеристики фильтрующих свойств далее используется отношение $\varepsilon = T_0/T$, где T_0 — период ШИМ; $T = L/R$ — постоянная времени нагрузки.

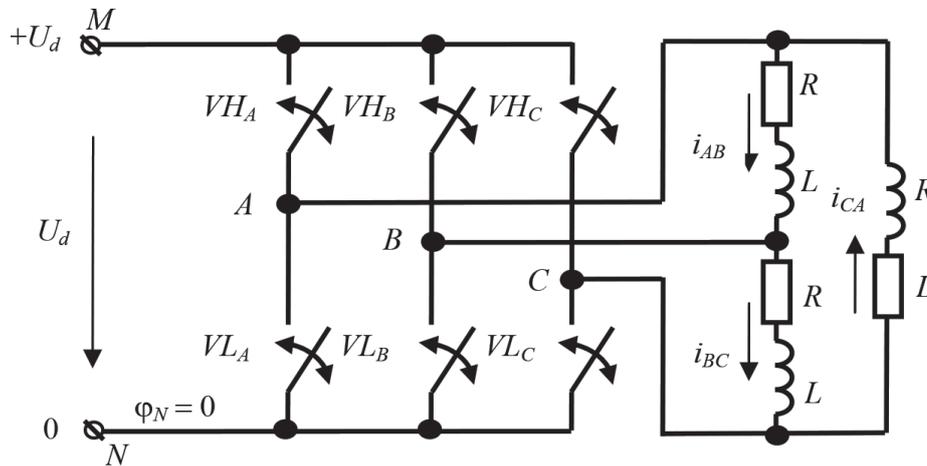


Рис. 1. Мостовая схема трехфазной модуляции

Термины и определения. Под ШИМ в данной работе понимается процесс аппроксимации импульсами напряжения желаемого гладкого напряжения, которое необходимо для формирования тока нагрузки. Импульсная функция — периодическая булева функция, принимающая значения 0 или 1. Сквозность — отношение длительности импульса к периоду модуляции.

Модулированная функция — импульсная функция, которая получается в процессе модуляции. Модулирующая функция — гладкая непрерывная функция, к которой должна быть приближена импульсная функция в процессе модуляции. Ошибка модуляции напряжения — разность между модулированным и модулирующим напряжением. Ошибка модуляции по току — разность между токами, порождаемыми модулированной и модулирующей функциями напряжений. Локальная дисперсия тока — среднее значение квадрата ошибки модуляции по току на периоде импульсной функции. Оптимальная ШИМ — это ШИМ, позволяющая получить минимум локальной дисперсии тока.

Под модулированной функцией напряжения понимается отношение модулированного напряжения к напряжению источника питания U_d . Под модулирующей функцией напряжения понимается отношение модулирующего напряжения к напряжению источника питания U_d . Коммутационная функция — импульсная функция, принимающая значения 0 или 1, 0 которой соответствует выключенному состоянию ключа, 1 — включенному. Под потенциалом полумоста $X = A, B, C$ понимается потенциал его средней точки. Отношение модулированных потенциалов мостов к напряжению источника питания — модулированная функция потенциалов полумостов. Отношение модулирующих потенциалов мостов к напряжению источника питания — модулирующая функция потенциалов полумостов. Базовое значение тока — $I_0 = U_d/R$. Относительный ток — отношение тока к базовому значению. Относительный ток помечается верхним индексом * (звездочка).

Управление полумостами осуществляется так, что включен либо верхний, либо нижний ключ. Для описания управления полумостом $X = A, B, C$ необходимо задать коммутационную функцию χ_X , графическое представление которой приведено на рис. 2.

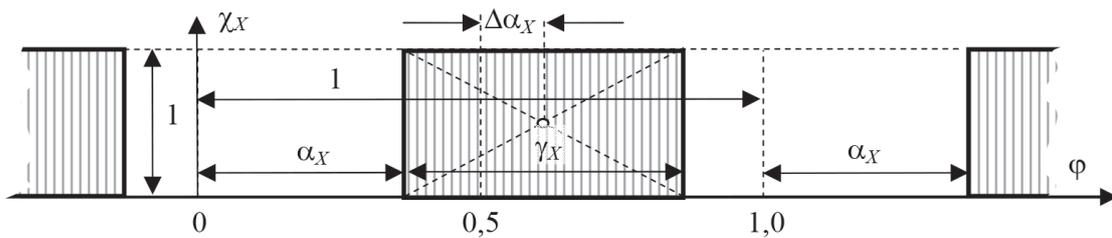


Рис. 2. График периодической импульсной функции со сдвигом импульса относительно начала интервала модуляции вправо

Формальная запись коммутационных функций полумостов $X = A, B, C$:

$$\chi_X = 1 \left(\frac{1 + \gamma_X}{2} + \Delta\alpha_X - \varphi \right) \cdot 1 \left(\varphi - \frac{1 - \gamma_X}{2} - \Delta\alpha_X \right), \quad (1)$$

где $1(x)$ — единичная функция аргумента x ; $\varphi = \tau - \text{floor}(\tau)$ — пилообразная функция относительного времени $\tau = t/T_0$; $\text{floor}(\tau)$ — дробная часть числа τ ; T_0 — период модуляции; α_X — относительное время от начала интервала ШИМ до момента включения верхних ключей полумостов X ; $\Delta\alpha_X$ — коэффициент смещения импульса относительно центра интервала ШИМ; γ_X — скважность импульсов. Значению $\chi_A = 1$ соответствует включенное состояние верхнего ключа полумоста A , а значению $\chi_B = 1$ — включенное состояние верхнего ключа полумоста B . Из рис. 2 следует, что переменные α_X , характеризующие положение импульсов χ_X на интервале модуляции, можно записать в следующем виде:

$$\alpha_X = \frac{1 - \gamma_X}{2} - \Delta\alpha_X. \quad (2)$$

Модулированный потенциал узла X электронно-ключевой цепи, изображенной на рис. 1, обозначим $\varphi_X = \chi_X \cdot U_d$. Тогда модулирующая функция потенциала узла X будет являться коммутационной функцией полумоста (1). Пусть модулирующий (желаемый) потенциал полумоста $G_X(\varphi)$. Тогда модулирующая функция потенциала полумоста

$$g_X(\varphi) = G_X(\varphi) / U_d. \quad (3)$$

Будем полагать, что фазные модулирующие функции фазных напряжений g_A, g_B, g_C являются периодическими симметричными относительно оси абсцисс функциями относительного времени с периодом f^* и удовлетворяют равенству

$$g_A + g_B + g_C = 0. \quad (4)$$

Модулирующие функции линейных межфазных и фазных напряжений связаны соотношениями:

$$g_{AB} = g_A - g_B = \gamma_A - \gamma_B; \quad g_{BC} = g_B - g_C = \gamma_B - \gamma_C; \quad g_{CA} = g_C - g_A = \gamma_C - \gamma_A. \quad (5)$$

Решение уравнений (5) относительно модулирующих функций потенциалов полумостов $X = A, B, C$ можно записать в следующем виде:

$$\gamma_X = g_X + \gamma_0 = \frac{1}{2} + g_X - g_0, \quad (6)$$

где γ_0 — нулевая потенциальная функция, являющаяся свободной переменной; $g_0 = 1/2 - \gamma_0$ — переменная, называемая *функцией предмодуляции*, которая также является свободной переменной.

Положим, что модулирующая функция потенциала полумоста является гладкой функцией времени. Тогда ее можно представить на интервале модуляции двумя первыми слагаемыми ряда Тейлора:

$$g_X(\varphi) \approx g_X(1/2) + \Delta g_X \cdot (\varphi - 1/2), \quad (7)$$

где $g_X(1/2)$ — значение модулирующей функции потенциала полумоста X в середине интервала модуляции при $\varphi = 1/2$; $\Delta g_X = g_X'(1/2)$ — приращение модулирующей функции линейного напряжения на периоде ШИМ; $g_X'(1/2)$ — производная модулирующей функции потенциала полумоста по относительному времени φ в середине интервала при $\varphi = 1/2$.

Принцип управления ШИМ заключается в поддержании равенства

$$\int_0^1 (\chi_X - g_X(\varphi)) \cdot d\varphi = 0. \quad (8)$$

Из данного равенства следует, что $\gamma_X = g_X(\tau)$, где значение τ берется в середине интервала модуляции.

Шесть параметров коммутационных функций $\Delta\alpha_X, \gamma_X$ ($X = A, B, C$), далее рассматриваются как управляющие переменные, позволяющие сформировать потенциалы узлов A, B, C (см. рис. 1). Число полумостов играет важную роль в обеспечении качества модуляции. Каждый полумост имеет две степени свободы в формировании импульсов напряжения $\Delta\alpha_X, \gamma_X$. Три полумоста имеют шесть степеней свободы. Соотношения (4) и (6) обеспечивают две связи. Таким образом, число свободных переменных трехфазного моста, по которым ведется оптимизация ШИМ, равно четырем.

Критерий оптимальности ШИМ — локальная дисперсия межфазного тока. Модулированное напряжение между потенциалами узлов $X, Y = A, B, C$ определяется выражением $U_{XY} = \chi_{XY} \cdot U_d = (\chi_X - \chi_Y) \cdot U_d$. Модулирующее напряжение между потенциалами X, Y определяется выражением $G_{XY} = g_{XY} \cdot U_d = (g_X - g_Y) \cdot U_d$, где $g_{XY} = g_X - g_Y$ — межфазные модулирующие функции; g_X, g_Y — модулирующие функции потенциалов узлов $X, Y = A, B, C$. Локальная дисперсия относительного значения тока в нагрузке

$$D_{XY} = \left(\frac{R}{U_d} \right)^2 \cdot \int_0^1 (i_{XY}(\varphi) - j_{XY}(\varphi))^2 \cdot d\varphi, \quad (9)$$

где $i_{XY}(\varphi)$ — ток, порождаемый модулированным напряжением U_{XY} на интервале ШИМ; $j_{XY}(\varphi)$ — ток, порождаемый модулирующим напряжением G_{XY} на интервале ШИМ; φ — относительное время, отсчитываемое от начала интервала модуляции.

Локальная дисперсия тока в нагрузке D_{XY} является достаточно сложной функцией управляющих переменных $\gamma_X, \Delta\alpha_X$ полумостов Y , модулирующих функций $g_X, \Delta g_X$ и ε — отношения периода ШИМ T_0 к постоянной времени нагрузки $T = L/R$. Заметим, что параметр ε , характеризующий фильтрующие свойства нагрузки, достаточно мал. Поэтому дисперсия тока (9) может быть представлена в следующем виде:

$$D_{XY} = D(g_X, \Delta g_X, \Delta\alpha_X, g_0, \varepsilon) = \varepsilon^2 \cdot \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{D(g_X, \Delta g_X, \Delta\alpha_X, g_0, \varepsilon)}{\varepsilon^2}. \quad (10)$$

Данное представление локальной дисперсии тока соответствует разложению ее в ряд Маклорена с погрешностью до значения $O(\varepsilon^3)$:

$$D_{XY} \approx \varepsilon^2 \cdot \left(\begin{aligned} & \frac{g_{XY}^2}{12} \cdot ((1 - \gamma_X)^2 + \gamma_Y \cdot (\gamma_X + \gamma_Y - 1)) + 2 \cdot \Delta\alpha_X \cdot \Delta\alpha_Y \cdot \gamma_Y + \\ & + \Delta\alpha_X^2 \cdot (\gamma_X \cdot g_{XY} + \gamma_Y) + \Delta\alpha_Y^2 \cdot \gamma_Y \cdot (1 - g_{XY}) + \\ & + \frac{\Delta g_{XY}^2}{120} + \frac{\Delta g_{XY}}{12} \cdot (\Delta\alpha_X \cdot \gamma_X \cdot (\gamma_X - 3) + \Delta\alpha_Y \cdot \gamma_Y \cdot (\gamma_Y - 3)) \end{aligned} \right), \quad (11)$$

где $g_X > g_Y$. Погрешность формулы (11) при $\varepsilon < 1$ не превышает 3%. Реальные значения параметра ε , характеризующего фильтрующие свойства электродвигателей, значительно меньше единицы. Поэтому формула локальной дисперсии (11) достаточно хорошо аппроксимирует исходную формулу (9). Представление локальной дисперсии межфазного тока в виде (11) позволяет упростить связь

фильтрующих свойств нагрузки (параметр ε) и параметров, определяющих управление ШИМ: g_{XY} , Δg_{XY} , $\Delta \alpha_X$, $\Delta \alpha_Y$. Это обстоятельство существенно упрощает синтез оптимального управления.

Локальная дисперсия межфазного тока (11) найдена при условии $g_X > g_Y$. Используя формулу (11), найдем локальную дисперсию тока в трехфазной нагрузке. Для этого упорядочим функции g_A , g_B , g_C в порядке убывания. Возможны шесть таких комбинаций неравенств:

$$g_A > g_B > g_C; \quad g_B > g_A > g_C; \quad g_B > g_C > g_A; \quad g_C > g_B > g_A; \quad g_C > g_A > g_B; \quad g_A > g_C > g_B.$$

Используя свойство симметрии токов нагрузки, полученных в результате модуляции, их дисперсию будем находить для случая, когда выполняются неравенства $g_A > g_B > g_C$. Модулированные функции потенциалов полумостов совпадают с коммутирующими функциями полумостов (1) и порождают токи i_{AB} , i_{BC} , i_{AC} . Модулирующие (желаемые) функции потенциалов полумостов порождают токи j_{AB} , j_{BC} , j_{AC} .

Токам j_{AB} , j_{BC} , j_{AC} и i_{AB} , i_{BC} , i_{AC} соответствуют ошибки модуляции $\Delta i_{AB} = i_{AB} - j_{AB}$; $\Delta i_{BC} = i_{BC} - j_{BC}$; $\Delta i_{AC} = i_{AC} - j_{AC}$. Ошибкам Δi_{AB} , Δi_{BC} , Δi_{AC} можно поставить в соответствие локальные дисперсии межфазных токов:

$$D_{AB} = \left(\frac{R}{U_d}\right)^2 \cdot \int_0^1 \Delta i_{AB}^2 \cdot d\varphi; \quad D_{BC} = \left(\frac{R}{U_d}\right)^2 \cdot \int_0^1 \Delta i_{BC}(\varphi) \cdot d\varphi; \quad D_{AC} = \left(\frac{R}{U_d}\right)^2 \cdot \int_0^1 \Delta i_{AC}^2 \cdot d\varphi.$$

Локальную дисперсию межфазного тока между полумостами можно найти по формуле

$$D_{ABC} = D(g_X, \Delta g_X, \Delta \alpha_X, g_0) = \frac{D_{AB} + D_{BC} + D_{AC}}{3}, \quad (12)$$

где $X = A, B, C$. В данной формуле отмечено, что дисперсия является функцией свободных переменных $\Delta \alpha_X$ и g_0 . Она также является функцией модулирующих переменных g_X , Δg_X , которые должны быть заданы.

Оптимальный алгоритм ШИМ по критерию дисперсии тока должен минимизировать функцию (12) по свободным четырем переменным $\Delta \alpha_X$ и g_0 . Найти экстремум функции (12) по четырем переменным $\Delta \alpha_X(g_X, \Delta g_X)$ и $g_0(g_X, \Delta g_X)$ можно лишь численным методом. Оценки коэффициентов смещения и функции предмодуляции, полученные численным методом, непригодны для практической реализации ШИМ в микропроцессорной технике. Поэтому найдем их приближенные значения.

Результаты (Results)

Оценка оптимальных коэффициентов смещения импульсов. Будем полагать, что оценки оптимальных коэффициентов смещения $\Delta \alpha_X$ зависят от Δg_X и не зависят от g_X . Тогда оценки оптимальных коэффициентов можно искать по дисперсии тока, представленной в виде: $D(0, \Delta g_X, \Delta \alpha_X, 0)$. Полагая, что Δg_X , $\Delta \alpha_X$ достаточно малы, представим локальную дисперсию тока $D(0, \Delta g_X, \Delta \alpha_X, 0)$ первыми слагаемыми ряда Маклорена с точностью до остаточных членов $O(\Delta g_X^3) = 0$, $O(\Delta \alpha_X^3) = 0$. Тогда несложно показать, что значения коэффициентов смещения, которые минимизируют дисперсию тока, представленную полиномом по переменным Δg_X , $\Delta \alpha_X$, определяются выражением

$$\Delta \alpha_X = \frac{11}{96} \cdot \Delta g_X. \quad (13)$$

Оптимальная функция предмодуляции. Если положить, что функции $g_X(\varphi)$ достаточно гладкие, то их приращения на периоде ШИМ $\Delta g_X \approx 0$. Тогда дисперсия токов (12) в нагрузке между полумостами $X = A, B, C$ имеет минимум при

$$g_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{g_A^3 + g_B^3 + g_C^3}{g_A^2 + g_B^2 + g_C^2}. \quad (14)$$

При синусоидальных модулирующих функциях фазных напряжений

$$g_X = \frac{a}{\sqrt{3}} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*} + \rho_X\right) \quad (15)$$

оптимальная функция предмодуляции (14) является гармоникой третьего порядка:

$$g_0 = \frac{a}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*}\right), \quad (16)$$

где $X = A, B, C$; $\rho_A = 0$; $\rho_B = -2\pi/3$; $\rho_C = 2\pi/3$; a — коэффициент амплитуды линейного напряжения; $X = A, B, C$; f^* — относительная частота модуляции; τ — относительное время. При значениях $a > 0,972$ использование функции предмодуляции (14) приводит к перемодуляции. Таким образом, оптимальная функция предмодуляции не позволяет полностью использовать модулируемое напряжение без перемодуляции. Перемодуляция при $a > 0,972$ ведет к некоторому увеличению дисперсии тока нагрузки и появлению в спектре токов низкочастотных гармоник.

Функция предмодуляции, исключающая перемодуляцию и обеспечивающая минимальную дисперсию тока при синусоидальных модулирующих функциях фазных напряжений, может быть записана в следующем виде:

$$g_0^0 = \frac{a}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot \min\left(1, \frac{\sqrt{1-|a|} + 2/3}{1 - \sqrt{1-|a|}}\right) \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*}\right), \quad (17)$$

где $a \in [0, 1]$.

Полученные оценки коэффициентов смещения (13) и функции предмодуляции (17) исчерпывают все возможные переменные, по которым можно производить минимизацию дисперсии токов и определяют оптимальный алгоритм ШИМ трехфазного электронно-ключевого моста.

Обсуждение (Discussion)

Эффективность оптимизации ШИМ. Так как наиболее востребованными являются алгоритмы ШИМ с синусоидальными модулирующими функциями напряжений, далее приводятся аналитические исследования эффективности оптимизации ШИМ по параметрам смещения и виду функции предмодуляции при синусоидальных модулирующих функциях напряжений (15).

Для сравнительной оценки эффективности оптимальной ШИМ найдем интегральную дисперсию тока на периоде модулирующей функции фазных напряжений:

$$ED(a, f^*, \Delta\alpha_X, g_0) = \frac{6}{f^*} \cdot \int_0^{f^*/6} D(g_X, \Delta g_X, \Delta\alpha_X, g_0) \cdot d\tau, \quad (18)$$

где g_X — модулирующие функции напряжения (15); $\Delta g_X = dg_X/d\tau$ — приращения модулирующих функций напряжения на периоде модуляции. Коэффициенты смещения импульсов $\Delta\alpha_X$ ($X = A, B, C$) и функция предмодуляции g_0 определяют метод ШИМ. Эффективность алгоритмов ШИМ будем оценивать отношением дисперсий

$$Z(a, f^*, \Delta\alpha_X, g_0) = \frac{ED(a, f^*, \Delta\alpha_X^0, g_0^0)}{ED(a, f^*, \Delta\alpha_X, g_0)} \leq 1, \quad (19)$$

где $\Delta\alpha_X = \Delta\alpha_X^0$ — коэффициенты смещения, определенные выражением (13); g_0^0 — функция предмодуляции, определенная выражением (17); $\Delta\alpha_X$ и g_0 — произвольные коэффициенты смещения и функция предмодуляции.

Коэффициенту эффективности $Z_{00} = Z(a, f^*, 0, 0)$ соответствует синусоидальная центрально-симметричная ШИМ с нулевой функцией предмодуляции. Коэффициенту эффективности $Z_{10} = Z(a, f^*, \Delta\alpha^0, 0)$ соответствует ШИМ с оптимальным смещением импульсов и нулевой функцией предмодуляции. Коэффициенту эффективности $Z_{01} = Z(a, f^*, 0, g_0^0)$ соответствует центрально-симметричная ШИМ с оптимальной функцией предмодуляции (17). Сравнительное влияние

на качество ШИМ смещения импульсов относительно центра интервала модуляции и функции предмодуляции можно оценить по графикам, приведенным на рис. 3.

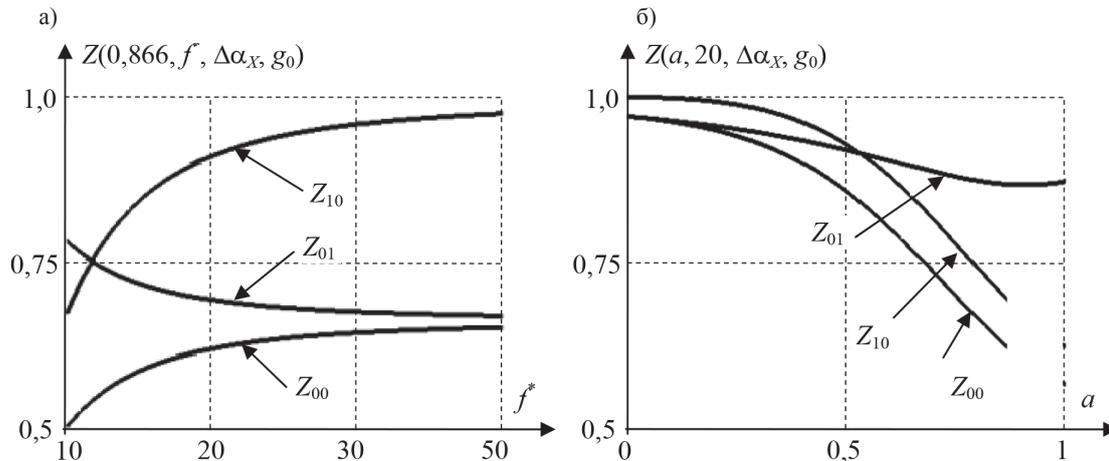


Рис. 3. Графики коэффициентов эффективности ШИМ, позволяющие оценить влияние смещения импульсов относительно центра интервала модуляции и функции предмодуляции на дисперсию тока нагрузки: *а* — от относительной частоты модуляции; *б* — от коэффициента амплитуды

Из приведенных графиков следует, что наиболее эффективна оптимизация ШИМ путем смещения импульсов относительно центра интервала модуляции при относительно небольших частотах модуляции. При относительной частоте модуляции $f^* > 50$ смещение импульсов становится неэффективным. Использование оптимальной функции предмодуляции обеспечивает существенное уменьшение токов в нагрузке независимо от частоты модуляции. Использование оптимальной ШИМ по параметрам смещения и функции предмодуляции позволяет существенно повысить ее качество.

Сравнение различных методов трехфазной ШИМ с оптимальной. Проблеме качества ШИМ с момента начала ее использования в силовой преобразовательной технике уделялось огромное внимание. Наибольшее распространение получили два метода трехфазной ШИМ: классическая и векторная ШИМ. В литературе преобладает мнение, что векторная ШИМ лучше модифицированной классической ШИМ, использующей функцию предмодуляции. Получить окончательный вывод о том, какой метод лучше, путем компьютерного моделирования невозможно. Аналитический метод вычисления локальной дисперсии тока, предложенный в данной работе, позволяет найти оптимальный алгоритм ШИМ и сравнить с ним алгоритмы векторной и классической ШИМ.

Классическая ШИМ основана на сравнении модулирующей функции напряжения с периодической пилообразной функцией [1]. Исследование классической ШИМ показало, что наименьшую дисперсию тока обеспечивает классический алгоритм с центрально-симметричным расположением импульсов на интервале модуляции, использующий пилообразную функцию с симметричным зубцом. Классическая ШИМ без перемодуляции возможна лишь при коэффициентах амплитуды $a \in [0, 0,866]$. Коэффициент эффективности алгоритма классической ШИМ $Z_k = Z(a, f^*, 0, 0) = Z_{00}$. Из графиков, приведенных на рис. 2, следует, что алгоритм классической модуляции имеет достаточно низкий коэффициент эффективности.

Получению алгоритма ШИМ, обеспечивающего отсутствие перемодуляции при коэффициентах амплитуды $a \in [0, 1]$, в литературе уделялось достаточно много внимания. Наиболее известен алгоритм модуляции на базе классической ШИМ с функцией предмодуляции третьей гармоникой [2]:

$$g_0'' = \frac{2}{3} \cdot g_0 = \frac{a}{6 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*}\right), \quad (20)$$

которая исключает возникновение перемодуляции при коэффициентах амплитуды $a \in [0, 1]$. Функция предмодуляции (20) исключает возникновение режима предмодуляции, однако она не является оптимальной ШИМ. Коэффициент эффективности алгоритма модифицированной классической ШИМ $Z_{МК} = Z(a, f^*, 0, g_0'') \approx Z_{01}$. Из графиков, приведенных на рис. 3, следует, что алгоритм модифицированной классической ШИМ имеет коэффициент эффективности $Z_{МК} \approx Z_{01}$, который существенно превосходит коэффициент эффективности алгоритма классической ШИМ: $Z_{к} = Z_{00}$. При коэффициенте амплитуды $a = 0,972$ и $f^* \rightarrow \infty$ коэффициент эффективности алгоритма модифицированной классической ШИМ достаточно высок: $Z_{МК} = 0,931$.

Изучались также другие виды функций предмодуляции [4], [5]. Наибольшее практическое применение получила векторная ШИМ (SVPWM) [6], [7]. Можно показать, что векторной ШИМ соответствует функция предмодуляции [12]:

$$g_0' = \frac{\min\{g_A, g_B, g_C\} + \max\{g_A, g_B, g_C\}}{2}. \quad (21)$$

Функция предмодуляции (21) исключает возникновение режима передмодуляции, однако она не является оптимальной ШИМ. Коэффициент эффективности алгоритма векторной ШИМ $Z_{в} = Z(a, f^*, 0, g_0')$ $\approx Z_{01}$. При коэффициенте амплитуды $a = 0,972$ и $f^* \rightarrow \infty$ коэффициент эффективности алгоритма векторной ШИМ достаточно высок: $Z_{в} = 0,975$. При этом имеет место соотношение $Z_{МК} < Z_{в}$. При значениях коэффициента амплитуды $a > 0,995$ и $f^* \rightarrow \infty$ функция передмодуляции (21) становится оптимальной.

Выводы (Summary)

1. Свободными переменными трехфазного моста, по которым можно вести оптимизацию ШИМ, являются параметры смещения импульсов относительно центра интервала ШИМ и нулевая потенциальная функция, которая является линейной комбинацией скважностей импульсов коммутационных функций электронных ключей. В качестве меры качества ШИМ целесообразно использовать среднеквадратичную ошибку модуляции на интервале модуляции — локальную дисперсию. Минимизация локальной дисперсии эквивалентна минимизации коэффициента искажений тока нагрузки.

2. Смещение импульсов относительно центра и использование функций предмодуляции существенно снижает дисперсию тока в нагрузке при относительной частоте модуляции $f^* \leq 50$. При увеличении числа импульсов на периоде модулирующих функций эффективность применения оптимизационных процедур смещения импульсов снижается. При увеличении частоты ШИМ становится центрально-симметричной. Эффективность оптимизации по величине смещения импульсов повышается при снижении коэффициента амплитуды модулирующего напряжения.

3. Оптимизация вида нулевой потенциальной функции также приводит существенному снижению локальной дисперсии тока независимо от частоты модуляции. Эффективность оптимизации по виду нулевой потенциальной функции снижается при снижении коэффициента амплитуды модулирующего напряжения.

4. При относительной частоте модуляции $f^* > 50$ оптимальная ШИМ незначительно увеличивает качество модуляции по сравнению с классической и векторной ШИМ. Вычислительная сложность алгоритма оптимальной трехфазной ШИМ не превосходит сложность алгоритмов классической и векторной ШИМ, что облегчает его программную реализацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schonung A.* Static frequency changers with subharmonic control in conjunction with reversible variable speed a.c. drives / A. Schonung, H. Stemmler // Brown Boveri Review. — 1964. — Vol. 51. — No 8/9. — Pp. 555–577.
2. *Holmes D. G.* Pulse width modulation for power converters: Principles and Practice / D. G. Holmes, T. A. Lipo. — New-York: Wiley-IEEE Press, 2003. — 734 p.

3. Çetin N. O. Scalar PWM implementation methods for three-phase three-wire inverters / N. O. Çetin, A. M. Hava // *Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on.* — IEEE, 2009. — Pp. I-447-I-451. DOI: 10.1109/ELECO.2009.5355253.
4. Hava A. M. Simple Analytical and Graphical Methods for Carrier-Based PWM-VSI Drives / A. M. Hava, R. J. Kerkman, T. A. Lipo // *IEEE Transactions on Power Electronics.* — 1999. — Vol. 14. — Is. 1. — Pp. 49–61. DOI: 10.1109/63.737592.
5. Hava A. M. High-Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm / A. M. Hava, R. J. Kerkman, T. A. Lipo // *IEEE Transactions on Industry Applications.* — 1998. — Vol. 34. — Is. 5. — Pp. 1059–1071. DOI: 10.1109/28.720446.
6. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. — Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2008. — 298 с.
7. Trzynadlowski A. M. Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate / A. M. Trzynadlowski, R. L. Kirlin, S. F. Legowski // *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* — 1997. — Vol. 44. — Is. 2. — Pp. 173–181. DOI: 10.1109/41.564155.
8. Обухов С. Г. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / С. Г. Обухов, Е. Е. Чаплыгин, Д. Е. Кондратьев // *Электричество.* — 2008. — № 7. — С. 23а–31.
9. Титяев Д. К. Сравнительный анализ векторной и традиционной широтно-импульсной модуляции / Д. К. Титяев, Д. Н. Мирошник // *Автоматизация технологичних об'єктів та процесів. Пошук молодих. Збірник наукових праць IV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 11–14 травня 2004 р.* — Донецьк: ДонНТУ, 2004. — С. 301–306.
10. Чаплыгин Е. Е. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в трехфазных инверторах напряжения / Е. Е. Чаплыгин, С. В. Хухтиков // *Электричество.* — 2011. — № 5. — С. 53–61.
11. Баховцев И. А. Сравнительный анализ способов управления двухуровневым АИН с ШИМ / И. А. Баховцев // *Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2008: матер. IX Междунар. конф.: в 7 т.* — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. — Т. 7. — С. 30–34.
12. Белоусов И. В. Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции / И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко, Л. М. Бровцинова // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429.

REFERENCES

1. Schonung, A., and H. Stemmler. “Static frequency changers with subharmonic control in conjunction with reversible variable speed a.c. drives.” *Brown Boveri Review* 51.8/9 (1964): 555–577.
2. Holmes, D. Grahame, and Thomas A. Lipo. *Pulse width modulation for power converters: principles and practice.* John Wiley & Sons, 2003.
3. Çetin, N. Onur, and Ahmet M. Hava. “Scalar PWM implementation methods for three-phase three-wire inverters.” *Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on.* IEEE, 2009.
4. Hava, Ahmet M., Russel J. Kerkman, and Thomas A. Lipo. “Simple analytical and graphical methods for carrier-based PWM-VSI drives.” *IEEE transactions on power electronics* 14.1 (1999): 49–61. DOI: 10.1109/63.737592.
5. Hava, Ahmet M., Russel J. Kerkman, and Thomas A. Lipo. “A high-performance generalized discontinuous PWM algorithm.” *IEEE Transactions on Industry applications* 34.5 (1998): 1059–1071. DOI: 10.1109/28.720446.
6. Vinogradov, A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka.* Ivanovo: GOUVPO «Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet imeni V.I. Lenina», 2008.
7. Trzynadlowski, Andrzej M., R. Lynn Kirlin, and Stanislaw F. Legowski. “Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate [for VSI].” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 44.2 (1997): 173–181. DOI: 10.1109/41.564155.
8. Obukhov, S.G., E.E. Chaplygin, and D.E. Kondrat'ev. “Shirotno-impul'snaya modulyatsiya v trekhfaznykh invertorakh napryazheniya.” *Elektrichestvo* 7 (2008): 23a–31.
9. Tityaev, D.K., and D.N. Miroshnik. “Sravnitel'nyi analiz vektornoj i traditsionnoj shirotno-impul'snoj modulyatsii.” *Avtomatizatsiya tekhnologichnikh ob'ektiv ta protsesiv. Poshuk molodikh. Zbirnik naukovikh prats' IV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi kon-ferentsii aspirantiv ta studentiv v m. Donets'ku 11–14 travnya 2004 r.* Donets'k: DonNTU, 2004: 301–306.

10. Chaplygin, E.E., and S.V. Khukhtikov. "Shirotno-impul'snaya modulyatsiya s passivnoi fazoi v trekh-faznykh in-vertorakh napryazheniya." *Elektrichestvo* 5 (2011): 53–61.
11. Bakhovtsev, I.A. "Sravnitel'nyi analiz sposobov upravleniya dvukhurovnevym AIN s ShIM." *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya APEP-2008: materialy IX Mezhdunarodnoi konferentsii: v 7 tomakh*. Vol. 7. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2008. 30–34.
12. Belousov, Igor V., Veniamin F. Samosejko, and Ludmila M. Brovtsinova. "Comparative analysis of the pulse width modulation methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.2 (2018): 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Белусов Игорь Владимирович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru, ibel@bk.ru
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: kaf_electroprivod@gumrf.ru,
samoseyko@mail.ru

Belousov, Igor V. —
Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru, ibel@bk.ru
Samosejko, Veniamin F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru,
samoseyko@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 8 мая 2018 г.
Received: May 8, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF ELECTROMOTIVE SYSTEMS

V. V. Romanovsky, B. V. Nikiforov, A. M. Makarov

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

In view of the increased capacity of the SEES, as well as the needs of vessels in high maneuverability, which is caused by the use of energy-consuming power plants, the main propulsion plants driven by permanent magnet motors are considered, as well as the development of valve inductor motors of domestic and foreign manufacturers. The principle of operation of the engines of the Azipod family is almost the same, but the differences are in the applications of this engine and the total output power. Considered and opposed to each other are the main competing manufacturers of propulsion pod, such as: Azipod — which was the main emphasis, as well as the propulsion pod of the Schottel-Werft Josef Becker GmbH & Co. KG, Siemens AG Marine Engineering and Mermaid by Rolls-Royce. Examples of the use of the propulsion pod of the Azipod VI family — the newest paddle module designed for operation in the hard conditions of the northern sea route, on the vessels of the Russian ship company — «Sovkomflot» are shown. The domestic developments of synchronous propulsion motors — switched reluctance drive are considered, their main difference from other types of propulsion engines is shown. At present, switched reluctance drive are produced by domestic enterprises for the coal and drilling industries, but one of these types of engines is installed in the tug, which is the first successful project of this kind. Consequently, for electromotive systems, the trend is to create a propulsion pod on the synchronous motors with permanent magnets, and with sufficient funding from Russian enterprises, there are all prerequisites for the development of domestic as in-ship electromotive complexes and based on switched reluctance drive.

Keywords: azipod, propulsion pod, traction drive motor, propulsion electrical system, switched reluctance drive, permanent magnets.

For citation:

Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. "Prospects for the development of electromotive systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

УДК: 621:313:3

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров

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

Ввиду возросших мощностей судовых электроэнергетических систем, а также потребности судов в высокой маневренности, что обуславливается применением энергоемких гребных энергетических установок, рассматриваются основные движительные установки с приводом от двигателей с постоянными магнитами, а также разработки вентильных индукторных двигателей отечественных и зарубежных производителей. Принцип работы двигателей семейства Azipod практически одинаков, однако отличия заключаются в областях применения данного движителя и суммарной выходной мощностью. Проведено сравнение основных конкурирующих между собой производителей винторулевых колонок, таких как Azipod, на который был сделан основной упор, а также колонки производителей Schottel-Werft Josef Becker GmbH & Co. KG, Siemens AG Marine Engineering и комплекс Mermaid от Rolls-Royce. Показаны примеры применения винторулевых колонок семейства Azipod VI — новейшего гребного модуля, предназначенного для работы в тяжелых условиях Северного морского пути, на судах российской судовой компании «Совкомфлот». Рассмотрены отечественные разработки синхронных гребных электродвигателей — вентильных двигателей, показано основное их отличие от других типов гребных двигателей. В настоящее время вентильные двигатели выпускаются отечественными предприятиями для угольной и буровой промышленности, однако один из таких типов двигателей установлен на буксир, что является первым успешным проектом такого рода. Следовательно, для систем электродвижения прослеживается

ся тенденция создания винторулевых колонок на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами, а при достаточном финансировании российских предприятий есть все предпосылки для разработки отечественных как внутрикорабельных комплексов электродвижения, так и винторулевых колонок на основе вентильно-индукторных двигателей.

Ключевые слова: Azipod, винторулевая колонка, приводной двигатель, гребная электрическая установка, вентильный двигатель, постоянные магниты.

Для цитирования:

Романовский В. В. Перспективы развития систем электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

Введение (Introduction)

Единые высоковольтные судовые электроэнергетические системы [1] – [3] (СЭЭС) с напряжением до 10000 В с системами электродвижения (СЭД) находят все большее применение на морском транспорте. Прежде всего, это обусловлено ростом мощностей СЭЭС, а также потребностью в судах с высокой манёвренностью, достигаемой применением энергоёмких гребных электрических установок (ГЭУ) и электродвигательных подруливающих устройств (ЭПУ). Для судов нового поколения в СЭД в мировой практике широко продвигаются пропульсивные комплексы, представляющие собой погружной агрегат в виде гондолы, вынесенной за корпус судна, и сочетающие в себе функции главного движителя с электрическим приводом и рулевого устройства.

Начало положено в 1987 г., когда фирма *ABB* [4], [5] предложила новую ГЭУ, названную *Azipod* (*Azimuthing Podded Drive* — азимутальный движительный привод гондольного типа). Наибольших успехов в этом направлении на мировом рынке СЭД добились следующие компании: *ABB* длительное время разрабатывает пропульсивные системы *Azipod* с диапазоном мощностей 5 – 30 МВт и системы *Compact* для мощностей 0,4 – 5 МВт; *Rolls-Royce* — аналогичные системы *Mermaid* мощностью 5 – 25 МВт в сотрудничестве [6] с компанией *Converteam*. Также большой опыт разработки пропульсивных систем большой мощности имеют компании *Schottel* — SEP (*Schottel Electric Propulsion*) и SSP (*Siemens Schottel Propulsion*). Силовые движительные электроэнергетические модули (ЭЭМ) комплектуются различными типами приводных двигателей, но в подавляющем количестве — это вентильные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (ВДПМ).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Движительная и рулевая система *Azipod*

Принцип работы систем семейства *Azipod* практически одинаков. Различия выражаются в том, для каких типов судов предназначен данный ЭЭМ, в каких природных условиях он эксплуатируется и какова его выходная мощность. В начале 2000-х гг. на место устаревающих конструкций движителей пришел *Azipod CZ* (рис. 1) для охвата рынка в классе до 5 МВт и стал доступен в двух вариантах: движитель для кораблей и движитель буровых платформ. Упрощенная конструкция *Azipod CZ* с несколькими движущимися частями в сочетании с высокой эффективностью и минимальная потеря тяги обеспечивают *Azipod CZ* большие эксплуатационные и экономические преимущества на протяжении всего жизненного цикла. *Azipod CZ* рекламируется как уникальный подводный монтируемый модуль, отличающийся от других движителей [7] – [10] встроенным высокоэффективным электродвигателем. Пропеллер с фиксированным шагом устанавливается непосредственно на вал электродвигателя, тем самым устраняя ненужную механику, шестерни, валы и подшипники, что значительно повышает надежность.

Подчеркивается, что эффективность повышена благодаря мощным синхронным двигателям с постоянными магнитами и передаче момента на винт без редуктора — напрямую. Конструкция позволяет двигателю охлаждаться непосредственно окружающей морской водой без дополнительных охлаждающих сред. В модуле *Azipod CZ* можно оптимизировать тягу, потому что вся гондола вместе с насадкой и пропеллером может наклоняться до 7 град. к горизонту. Учитывая общую

эффективность и незначительные потери тяги, Azipod CZ требует до 13 % меньше мощности, чем механический двигатель с наклонным соплом. Для буровых платформ это означает экономию на затраты, больше места и меньший вес.

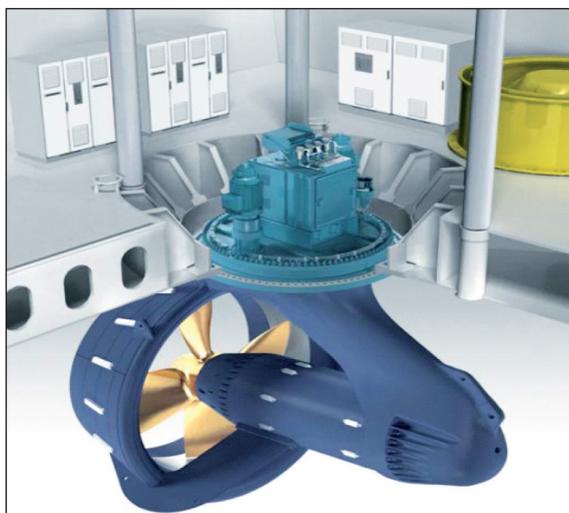


Рис. 1. Движительный модуль Azipod CZ

Для российского рынка актуален Azipod серии VI — модификация классического продукта Azipod для работы во льдах. Наиболее очевидным преимуществом гребной установки на ледокольных судах является крутящий момент электрического двигателя. Электрический двигатель и сопряженный преобразователь частоты могут проектироваться с максимальным крутящим моментом при низких частотах вращения гребного винта и даже при его остановке. Здесь, как и в подавляющем большинстве модулей семейства Azipod, установлен ВДПМ. Мощность ГЭУ для Azipod этой серии варьируется от 6 до 21 МВт. Отсутствие механической связи между силовой [11] – [12] установкой и электрическим двигателем, приводящим в движение гребной винт, дает возможность создания оптимальной движительной установки для ледокола. Гребной электродвигатель (ГЭД), используемый на Azipod серии VI, способен передавать 100 % мощности на винт в условиях испытаний при работе на швартовых. Если требуется для ледовых операций, ГЭД может иметь размеры, подходящие для циклической по моменту работы.

Конструкция Azipod VI предлагает следующие преимущества:

- повышенная маневренность в тяжелых ледовых условиях (возможность поворота на 360°) обеспечивает полный крутящий момент и тягу в любом направлении, а также при обратном ходе;
- надежная механическая конструкция (один короткий вал и отсутствие конических передач) означает, что максимальный крутящий момент электрического двигателя может полностью использоваться без механических ограничений;
- прочность и жесткость (корпус Azipod с рамной конструкцией [13] – [16]) выдерживает высокие ударные нагрузки при работе во льдах. Жесткий валопровод снижает риск резонанса во время дробления льда;
- свобода при разработке проекта судна (Azipod обеспечивает большую гибкость проекта и возможность экономии объемов в корме судна).

Данные комплексы установлены на танкеры-снабженцы «Тимофей Гуженко», «Михаил Ульянов» и «Кирилл Лавров». Мощность их ГЭД в среднем составляет от 2 до 10 МВт.

Фирма *ABB* представила инновационное решение в виде нового поколения Azipod XO. На первый взгляд Azipod XO не сильно отличается от предыдущей модели, но отметим из новшеств замену гидравлического рулевого управления полностью электрической рулевой системой. Каждый из четырех электродвигателей имеет специальный рулевой привод, тем самым перейдя на новый уровень резервирования системы. Azipod XO отличается более легкой уста-

новкой комплекса в целом, улучшенной эффективностью, сокращением технического обслуживания и меньшими шумом и вибрацией. Рулевой модуль спроектирован так, что уплотнение может обслуживаться с корабля на плаву, в зависимости от расположения ватерлинии судна. Движительный модуль включает в себя уже традиционно ВДПМ и винт фиксированного шага непосредственно на валу двигателя. Считается, что улучшения сокращают до 50 % затрат на жизненный цикл.

Следует отметить современную разработку пропульсивной системы (SSP) немецкими фирмами *Schottel-Werft Josef Becker GmbH & Co. KG* и *Siemens AG Marine Engineering*. Она отличается от Azipod использованием двойного винта Schottel, а ГЭД — опять же ВДПМ на гребном валу в обтекаемой гондоле. Гондола — элемент конструкции с двумя стабилизаторами (крылья авиационного профиля), за счет которых рекламируемая эффективность пропульсивной системы SSP на 20 % выше эффективности стандартных винторулевых колонок (ВРК).

В пропульсивных комплексах *Rolls-Royce* типа Mermaid встроенный электродвигатель также находится непосредственно на валу, экономя пространство и устраняя необходимость в редукционной передаче. Отмечается, что высокоэффективно регулируемый электродвигатель позволяет обходиться винтом фиксированного шага — малозумной конструкцией с низкой вибрацией. Он поставляется в виде цельного винта или отдельно лезвиями, которые могут легко заменяться в случае повреждения. Также прослеживается тенденция перехода от асинхронного двигателя к ВДПМ.

Отечественные системы электродвижения с вентильными двигателями

Концепция создания полностью электрических кораблей овладела умами инженеров-проектировщиков подводных и надводных кораблей всего мира и в основном обоснована следующими факторами:

- значительный постоянный рост потребления электроэнергии на корабле;
- внедрение на кораблях современных и перспективных электроэнергоёмких систем;
- экономия топлива;
- снижение водоизмещения;
- сокращение численности экипажа;
- возможность создания систем полного электродвижения на мощных гребных высокоэффективных всережимных ЭД в связи с бурным развитием микропроцессорных систем и мощных электронных ключей (IGBT-транзисторы, IGST-тиристоры и др.).

В части полного электродвижения следует отметить, что оно априори присутствует на дизель-электрических подводных лодках (ДЭПЛ) с основным источником питания — аккумуляторной батареей, и целесообразно к внедрению на надводных кораблях, эксплуатирующихся основное время на средней и полной мощности. Так, например, ледоколы характеризуются длительными и маневренными режимами, при этом длительность работы с переменными нагрузками на винтах (работа во льдах) может достигать 80 % общей продолжительности навигации, а работа в особо тяжелых условиях — до 50 % продолжительности навигации. При этом моменты сопротивления на гребном валу меняются в очень широком диапазоне: от характеристики хода в свободной воде до швартовой и работы на мелководье. Поэтому этот класс судов наиболее тяготеет к полному электродвижению.

Отечественный опыт создания всережимной машины [17] – [18] на базе ВДПМ начался в 1980-х гг. для ДЭПЛ с создания макетного образца 75 кВт и продолжился поставкой завода «Электросила» в кооперации с НИИ ЭФА и «Новой Эрой» (все предприятия находятся в Санкт-Петербурге) на головную лодку 4-го поколения двигателя (рис. 2) мощностью порядка 4 МВт и 200 об/мин. Вскоре сказалась неотработанность конструкции на макетном образце, и ГЭД вместе с кораблем отправился в опытную эксплуатацию. «Электросила» тем временем приступила [19] – [21] к созданию следующей итерации ВДПМ, и работы продолжились с очередными трудностями.



Рис. 2. ВДПМ мощностью 4 МВт со снятой крышкой на стенде «Новой Эры» — видны встроенные в корпус силовые полупроводниковые блоки

Параллельным курсом шли многие морские страны, и теперь широко известны ВДПМ в качестве ГЭД фирмы *Siemens* — Германия (3 МВт, 120 мин⁻¹ для ПЛ типа 212), модификации поставляются в Грецию, Италию, Корею. Серийно поставляются машины Magnet-Motor — Германия (4,3 МВт, 150 мин⁻¹ для опытного военного корабля); ABB Industria (4,3 МВт, 150 мин⁻¹ для итальянских ВМС), Jeumont Electric — Франция (1,8 МВт для ПЛ Scorpene, СЭД 3 и 4,5 МВт при 120 мин⁻¹) и др.

На атомных ледоколах 3-го поколения [22] – [23] «Таймыр» и «Вайгач» установлены ГЭД переменного тока синхронного типа (вентильные двигатели), которые обладают значительными преимуществами перед предшественниками — двигателями постоянного тока. Но у синхронных двигателей демпферная обмотка обеспечивает пуск и демпфирование качаний ротора. Эти функции в частотно регулируемых электроприводах с синхронными двигателями отпадают, и демпферная обмотка наоборот оказывает вредное влияние:

- возрастают пульсации токов якоря и возбуждения;
- увеличивается зона прерывистых токов и ухудшается форма токов якоря;
- снижается надежность двигателя.

На обоих ледоколах еще с периода постройки [24] – [27] отмечены многочисленные случаи повреждения демпферных обмоток: поломка шпилек крепления обмоток, а позже обнаружались обрывы стержней самих демпферных обмоток. Поломки шпилек специалисты отнесли к конструкторским просчетам, их необходимо изготавливать более прочными. Обрывы стержней демпферной обмотки носили системный характер и были связаны с выбором синхронной машины в составе частотно регулируемого электропривода. Применение одноякорной синхронной машины для повышения надежности не подтвердилось опытом эксплуатации. Поэтому в проекте 22220 ледокола «Арктика» в качестве ГЭД установлен двигатель мощностью 2×10 МВт, асинхронный с короткозамкнутым ротором, двухъякорный, с двумя трёхфазными обмотками на каждом статоре, производства «Русэлпром» (г. Санкт-Петербург), и рассчитанный на питание от ПЧ, регулируемым методом широтно-импульсной модуляции. Система повышает, в сравнении с предыдущим вариантом, живучесть ледокола в условиях арктического плавания, несмотря на некоторое усложнение схемы главного тока, системы регулирования и защиты.

Асинхронный двигатель консервативно заложен в техническом проекте фирмой *Converteam* (несмотря на то, что эта фирма активно способствует продвижению, например, индукционных

двигателей мощностью 20 МВт) на авианосец «Queen Elizabeth». Известно о НИР по разработке ВРК мощностью до 7,5 МВт для ледокола-снабженца, выполненной в 2016 г. ПИУЦ «Сапфир» по договору с НК «Роснефть» и «ДЖИИ Энерджи Пауэр Конвершн Текнолоджи Лимитед». В результате рассмотрения [28] и необоснованного сравнения с одним только традиционным синхронным двигателем предпочтение отдано асинхронному двигателю. При этом приводятся весьма спорные преимущества выбранного варианта по сравнению с ВДПМ.

Состояние разработок вентильных индукторных двигателей

В связи с эволюцией в электронике и совершенствованием методик управления новое развитие получили вентильные индукторные двигатели (ВИД), в настоящее [29] время имеющие слабое развитие в судостроении. В настоящее время ВИД (за рубежом SRD) являются одной из главных новейших технологий в области конструирования приводов с регулируемой скоростью. Достоинствами индукторных машин [30] – [32] (ИМ) являются простота конструкции ротора, высокая надежность, хорошее регулирование и работоспособность в сложных окружающих условиях. У них много преимуществ с точки зрения КПД, плотности мощности, плотности момента, веса, объема, прочности конструкции и эксплуатационной гибкости.

Мировым лидером в разработке и внедрении Switched Reluctance Drive (коммутируемый реактивный электропривод) малой и средней мощности является японская компания *Nidec Corporation*, которая в 2010 г. приобрела американскую компанию *Emerson Motor* и предлагает на рынок линейку промышленных SRD малой и средней мощности 14,7 – 308,7 кВт на номинальные частоты вращения 1000, 1800, 3600 и 4500 об/мин с перегрузочной способностью 110 %, 150 % и 250 %.

С 2012 г. фирма «ВИЭМ», г. Новочеркасск, при участии учёных [33] – [35] и специалистов ЮРГПУ (НПИ) ведёт разработку ВИП большой мощности для Сибирской угольной энергетической компании, которой сданы в эксплуатацию групповые регулируемые, суммарной мощностью 15 МВт (12 шт.) с системой автоматизации для замены существующих нерегулируемых асинхронных двигателей с фазным ротором мощностью 1600 кВт на регулируемые индукторные двигатели меньшей мощности 1250 кВт.

Работы по созданию гребного индукторного двигателя начались в ЗАО «ИРИС», г. Новочеркасск, в 2008 г. (если не считать созданного ранее макетного образца 500 кВт (рис. 3), позволившего с уверенностью судить о возможности реализации машины 10-кратной мощности). Одновременно выполнен техпроект на ВИД 4 МВт с ориентацией на замену ВДПМ на ДЭПЛ [36].

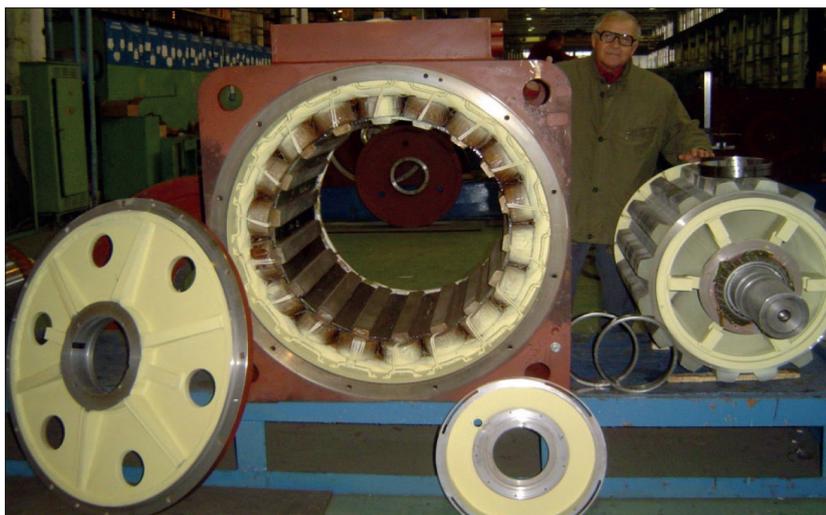


Рис. 3. ВИД 500 кВт в разобранном виде на стенде предприятия «Ирис», г. Новочеркасск

По заданию головного исполнителя по разработке электрооборудования и систем управления для морского буксира проекта 745МБС — ЦНИИ СЭТ (после неоднократных докладов одним

из авторов статьи руководству института о перспективности направления) в «Ирисе» создан судовой агрегат ИД. Испытания двигателя в Новочеркасске весной 2010 г. были проведены при 50 % нагрузке методом [37], [38] самонагружения, который реализован благодаря двухпакетной конструкции шестифазного ИД. За счёт возврата электрической энергии, вырабатываемой генераторной частью, не требуется сеть большой мощности, так как из нее потребляется мощность только для компенсации потерь в преобразователе и машине. Испытания при 50 % нагрузке [39] (ограничение обусловлено мощностью преобразователей) подтвердили достаточность резерва для обеспечения проектной мощности в 2 МВт при частоте вращения 200 мин.

Таким образом, все высокие требования к СЭД реализованы на морском буксире проекта 745МБС «Виктор Конецкий» (рис. 4) путём внедрения ВИП 2 МВт. От экипажа судна поступают только положительные [40] отзывы по результатам эксплуатации. Следует отметить также надежную эксплуатацию ряда вспомогательных ВИП, даже высокоскоростных, различной мощности и назначения на современной ДЭПЛ.

Предварительные оценки подтверждают возможность создания гребных электродвигателей (ГЭД) и ВРК на основе ВИД в габаритах существующих систем на ВДПМ и АД.

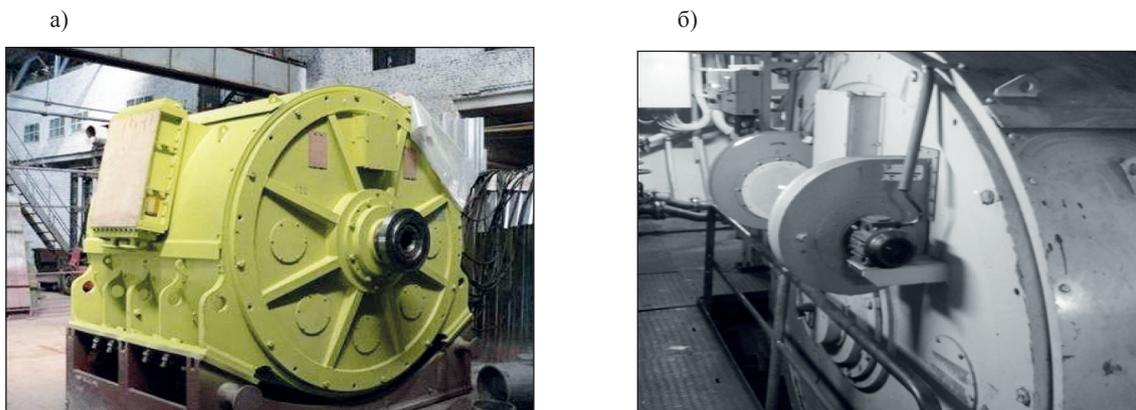


Рис. 4. ВИД 2 МВт на стенде (а) и на корме (б) морского буксира «Виктор Конецкий»

Можно констатировать, что работы по ВИД большой мощности начаты значительно позже старта создания ВДПМ, но имеют более впечатляющие результаты.

Многочисленные экспертные и многокритериальные оценки ВДПМ и ВИД показывают в целом [41] равноценную перспективность этих машин, но нельзя не заметить, что такие параметры ВИД, как простота, низкая стоимость, надежность и ремонтпригодность придают решающий вес склонению ВИД для морского применения по рассматриваемой тематике.

Выводы (Conclusion)

1. Для систем электродвижения малой и средней мощности в мировом судостроении прослеживается тенденция создания ВРК на базе ВДПМ.
2. Для СЭД большой мощности сохраняется разнотипность установки электрических машин.
3. Подтверждена эксплуатацией различных топологий индукторных машин возможность и целесообразность разработки отечественных конкурентоспособных как комплексов электродвижения, расположенных внутри судна, так и ВРК на основе ВИД при правильной организации кооперации предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров Л. Е. Компьютерное моделирование единой высоковольтной судовой электроэнергетической системы с пропульсивными комплексами типа Azipod в нормальных и аварийных режимах работы:

дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Л. Е. Егоров. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2014. — 183 с.

2. АBB [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://new.abb.com/> (дата обращения: 01.04.2018).

3. Кузнецов В. И. Бестрансформаторные единые электроэнергетические системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / В. И. Кузнецов. — СПб.: СПбГМТУ, 2015. — 159 с.

4. Библиотека фирмы АBB [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://library.e.abb.com> (дата обращения: 05.04.2018).

5. Никифоров Б. В. Корабельный электропривод / Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Лик, 2014. — 270 с.

6. Дядик А. Н. Корабельные энергетические системы / А. Н. Дядик, Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Колорит, 2012. — 680 с.

7. Дарьенков А. Б. Гребные электрические установки / А. Б. Дарьенков, Г. М. Мирясов, В. Г. Титов [и др.]. — Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. — 219 с.

8. Высоцкий В. Е. Электромеханические процессы в вентильном двигателе с постоянными магнитами / В. Е. Высоцкий, А. П. Сеницын, С. А. Тарашев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2010. — № 2 (27). — С. 139–144.

9. Птах Г. К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт / Г. К. Птах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2015. — Т. 2. — № 3. — С. 23–33.

10. Лагода Ф. И. Вентильные двигатели / Ф. И. Лагода // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. — С. 76–80.

11. Быков А. С. Гребные электрические установки атомных ледоколов / А. С. Быков, В. А. Малышев, В. В. Романовский. — СПб.: Элмор, 2004. — 320 с.

12. Никифоров Б. В. Перспективы применения вентильных индукторных приводов в составе СЭД ДЭПЛ / Б. В. Никифоров, А. А. Цветков // Интеллектуальные электромеханические системы и комплексы специального назначения. — Новочеркасск: Лик, ЮРГТУ. — С. 11–16.

13. Emadi A. Energy-Efficient Electric Motors / A. Emadi. — New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. — 406 p.

14. Дядик А. Н. Корабельные энергетические системы / А. Н. Дядик, Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Колорит, 2012. — 680 с.

15. Никифоров Б. В. Аккумуляторные батареи подводных аппаратов / Б. В. Никифоров, А. И. Русин. — Новочеркасск: Колорит, 2011. — 162 с.

16. Силовая электроника корабельных электротехнических комплексов: учеб. пособие / под ред. Б. В. Никифорова. — Новочеркасск: Колорит, 2006. — 411 с.

17. Никифоров Б. В. Вентильно-индукторные двигатели для тяговых электроприводов / Б. В. Никифоров, С. А. Пахомин, Г. К. Птах // Электричество. — 2007. — № 2. — С. 34–38.

18. Никифоров Б. В. Исследование вентильного индукторного двигателя в составе насосного агрегата / Б. В. Никифоров, А. А. Цветков // Электротехника. — 2007. — № 6. — С. 24а–33.

19. Никифоров Б. В. Развитие систем электропривода подводных лодок (в порядке обсуждения) / Б. В. Никифоров // Судостроение. — 1999. — № 5. — С. 23–25.

20. Proverbs J. Aspects of electro-magnetic aircraft launch and linear machine development / J. Proverbs, S. Colyer, T. Cox, J. F. Eastham // IEEE transaction on Magnetics. — 2010. — Vol. 46. — Is. 12. — Pp. 57–59.

21. Petersen L. J. Next-Generation Power and Energy: Maybe Not So Next Generation / L. J. Petersen, D. J. Hoffman, J. P. Borraccini, S. B. Swindler // Naval Engineers Journal. — 2010. — Vol. 122. — Is. 4. — Pp. 59–74. DOI: 10.1111/j.1559-3584.2010.00280.x.

22. Ehrhart P. The all-electric ship: ready to take over? / P. Ehrhart // Naval Forces. — 2011. — Vol. XXXII. — Pp. 41–45.

23. Letellier P. H. Power Permanent Magnet Machines for Electric Propulsion Drives / P. H. Letellier // Материалы 3 международного симпозиума: All electric ship civil or military (AES 2000). — Париж, 2000. — С. 26–27.

24. Jamai H. Optimal Switched Reluctance Motor Drive for Hydraulic Pump unit / H. Jamai, M. Kaneda, K. Ohyama, Y. Takeda, N. Matsai. — IEEE INTECH, 2000. — Pp. 98–101.

25. Buckingham J. Submarine Power and Propulsion - Application of Technology to Deliver Customer Benefit / J. Buckingham, C. Hodge, T. Hardy. — Bath, UK: BMT Defence Services Ltd., 2008. — 17 p.

26. *Зайцев А. А.* Транспорт на магнитном подвесе / А. А. Зайцев, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова. — СПб.: Изд-во ПГУПС, 2010. — 60 с.
27. *Никифоров Б. В.* Применение системы электродвижения на ПЛ / Б. В. Никифоров // *Электричество*. — 2001. — № 8. — С. 121–123.
28. *Никифоров Б. В.* Корабельные системы электродвижения: дис. ... д-ра техн. наук / Б. В. Никифоров. — СПб.: ЦКБ Морской техники «РУБИН», 2006. — 311 с.
29. *Григорьев А. В.* Единая электроэнергетическая установка гидрографического судна на базе системы электродвижения переменного тока / А. В. Григорьев, К. С. Ляпидов, Л. С. Макаров // *Судостроение*. — 2006. — № 4. — С. 33–34.
30. Пат. 2324272 Российская Федерация, МПК Н 02 J 9/06. Интеллектуальный преобразователь напряжения постоянного тока для динамически изменяющейся нагрузки / В. Е. Апииков, К. С. Ляпидов, О. Е. Лозицкий, Б. В. Никифоров; заяв. и патентообл. Центральное конструкторское бюро морской техники «РУБИН», ЗАО «ИРИС», ФГУП «Производственно-конструкторское предприятие «ИРИС»». — № 2006120505/09; заявл. 13.06.2006; опубл. 10.05.2008, Бюл. № 13.
31. *Mitcham A. J.* Motors and drives for surface ship propulsion: comparison of technologies / A. J. Mitcham, J. J. A. Cullen // *Proc. 1995 Electric Propulsion Conf.* — 1995. — Vol. 4. — Pp. 88–89.
32. *Letellier P.* Electrical propulsion motors / P. Letellier // *Electric Propulsion. The Effective Solution*. — London: IMarE, 1995. — P. 7.
33. *Никифоров Б. В.* Создание корабельных систем электродвижения с вентильно-индукторным электроприводом / Б. В. Никифоров, А. П. Темирёв, О. Е. Лозицкий // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. — 2007. — № 4. — С. 62–66.
34. *Ericson T.* Power electronics and future ships electrical system / T. Ericson, N. Hingorani, Yu. Khersonsky // *IEEE Transactions of industry applications*. — 2006. — Vol. 42. — Is. 1. — Pp. 76–79.
35. *Ehrhart P.* MM technologies and application at ships generators and motors / P. Ehrhart, L. Sozzi // *Developing Benefits for Maritime Applications*. — 1998. — P. 2.
36. Авт. св. № 332499. Асинхронный генератор в ЭЭС / Б. В. Никифоров, В. Н. Давыдов; опубл. 08.01.91.
37. Пат. 2237338 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/06, Н 02 К 1/06. Индукторный двигатель / Б. В. Никифоров, В. Н. Давыдов, [и др.]; заяв. и патентообл. ДГУП «Конструкторское бюро приборостроения ФГУП» ПКП «ИРИС». — № 2002119797/09; заявл. 22.07.2002; опубл. 27.09.2004, Бюл. № 27.
38. Пат. 2343615 Российская Федерация, МПК Н02J 9/06. Реверсивный преобразователь напряжения для передачи электроэнергии между сетями переменного и постоянного тока / А. В. Архипов, К. С. Ляпидов, Б. В. Никифоров, [и др.]; заяв. и патентообл. закрытое акционерное общество «ИРИС». — № 2007143397/09; заявл. 22.11.2007; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1.
39. *Klockow B.* Electric roads / B. Klockow, H. Biesenack, M. Herzog // *Elektrische Bahnen*. — 2003. — № 3. — Pp. 107–112.
40. *Cooke R.* Integrating external drive actuation systems into the submarine. UDT / R. Cooke. — 2010. — 157 p.
41. *Дядик А. Н.* Использование электрохимических генераторов на кораблях / А. Н. Дядик, Б. В. Никифоров. — СПб.: Изд. СПб ГМТУ, 2011. — 340 с.

REFERENCES

1. Egorov, L.E. Komp'yuternoe modelirovanie edinoi vysokovol'noi sudovoi elektro-energeticheskoi sistemy s propul'sivnymi kompleksami tipa Azipod v normal'nykh i avariinykh rezhimakh raboty. PhD diss. SPb.: FGBOU VO «GUMRF im. admirala S.O. Makarova», 2014.
2. ABB. Web. 1 Apr. 2018 <<http://new.abb.com/>>.
3. Kuznetsov, V.I. Bestransformatornye edinye elektroenergeticheskie sistemy. PhD diss. SPb.: SPBGMTU, 2015.
4. Biblioteka firmy ABB. Web. 5 Apr. 2018. <<https://library.e.abb.com/>>.
5. Nikiforov, B.V. *Korabel'nyi elektroprivod*. Novocherkassk: Lik, 2014.
6. Dyadik, A.N., and B.V. Nikiforov. *Korabel'nye energeticheskie sistemy*. Novocherkassk: Izd. Kolorit, 2012.
7. Dar'enkoy, A.B., G.M. Miryasov, V.G. Titov, M.N. Okhotnikov, and D.V. Umyarov. *Grebnye elektricheskie ustanovki*. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2014.

8. Vysotsky, V.E., A.P. Sinicin, and S.A. Tarashev. "Electromechanical processes in ventil engine with constant magnets." *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* 2(27) (2010): 139–144.
9. Ptakh, G.K. "Switched Reluctance Drive Medium and High Power: Foreign and Domestic Experience." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 2.3 (2015): 23–33.
10. Lagoda, F.I. "Ventil'nye dvigateli." *Aktual'nye voprosy energetiki: Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov*. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 76–80.
11. Bykov, A.C., V.A. Malyshev, and V.V. Romanovskii. *Grebnye elektricheskie ustanovki atomnykh ledokolov*. SPb.: Elmor, 2004.
12. Nikiforov, B.V., and A.A. Tsvetkov. "Perspektivy primeneniya ventil'nykh induktornykh privodov v sostave SED DEPL." *Intellektual'nye elektromekhanicheskie sistemy i komplekсы spetsial'nogo naznacheniya*. Novocheerkassk: Izd. Lik, YuRGU. 11–16.
13. Emadi, A. *Energy-Efficient Electric Motors*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
14. Dyadik, A.N., and B.V. Nikiforov. *Korabel'nye energeticheskie sistemy*. Novocheerkassk: Izd. «Kolorit», 2012.
15. Nikiforov, B.V., and A.I. Rusin. *Akkumulyatornye batarei podvodnykh apparatov*. Novocheerkassk: Izd. «Kolorit», 2011.
16. Nikiforov, B.V., ed. *Silovaya elektronika korabel'nykh elektrotekhnicheskikh kompleksov. Uchebnoe posobie*. Novocheerkassk, 2006.
17. Nikiforov, B.V., S.A. Pakhomin, and G.K. Ptakh. "Switched Reluctance Motors for Traction Electric Drives." *Electrical Technology Russia* 2 (2007): 34–38.
18. Nikiforov, B.V., and A.A. Tsvetkov. "Studies of an AC converter-fed motor incorporated in a pump unit." *Russian Electrical Engineering* 78.6 (2007): 298–305. DOI: 10.3103/S1068371207060065
19. Nikiforov, B.V. "Evolution of electric propulsion systems for submarines." *Sudostroenie* 5 (1999): 23–25.
20. Proverbs, J., S. Colyer, T. Cox, and J. F. Eastham. "Aspects of electro-magnetic aircraft launch and linear machine development." *IEEE transaction on Magnetics* 46.12 (2010): 57–59.
21. Petersen, Lynn J., D. J. Hoffman, J. P. Borraccini, and S. B. Swindler. "Next-Generation Power and Energy: Maybe Not So Next Generation." *Naval Engineers Journal* 122.4 (2010): 59–74. DOI: 10.1111/j.1559-3584.2010.00280.x
22. Ehrhart, P. "The all-electric ship: ready to take over?." *Naval Forces XXXII* (2011): 41–45.
23. Letellier, P.H. "Power Permanent Magnet Machines for Electric Propulsion Drives." *All electric ship civil or military (AES 2000)*. Paris, 2000. 26–27.
24. Jamai, H., M. Kaneda, K. Ohya, Y. Takeda, and N. Matsai. "Optimal Switched Reluctance Motor Drive for Hydraulic Pump unit." *IEEE*, 2000. 98–101.
25. Buckingham, J., C. Hodge, and T. Hardy. *Submarine Power and Propulsion - Application of Technology to Deliver Customer Benefit*. Bath, UK: BMT Defence Services Ltd., 2008.
26. Zaitsev, A.A., G.N. Talashkin, and Ya.V. Sokolova. *Transport na magnitnom podvese*. SPb.: PGUPS, 2010.
27. Nikiforov, B.V. "Primenenie sistemy elektrodvizheniya na PL." *Electrical Technology Russia* 8 (2001): 121–123.
28. Nikiforov, B.V. *Korabel'nye sistemy elektrodvizheniya*. Dr. diss. SPb.: 2006.
29. Grygoriev, A.V., K.S. Lyapidov, and L.S. Makarov. "Unified hydrographic ship's electric power plant based on the alternating current motion system." *Sudostroenie* 4 (2006): 33–34.
30. Apikov, V.E., K.S. Lyapidov, O.E. Lozitskii, and B. V. Nikiforov. RU 2 324 272 C2, IPC H 02 J 9/06. *Intellektual'nyi preobrazovatel' napryazheniya postoyannogo toka dlya dinamicheski izmenyayushchiesya nagruzki*. Russian Federation, assignee. Publ. 10 May 2008.
31. Mitcham, A. J., and J. J. A. Cullen. "Motors and drives for surface ship propulsion: comparison of technologies." *Proc. 1995 Electric Propulsion Conf.* Vol. 4. 1995. 88–89.
32. Letellier, P. "Electrical propulsion motors." *Electric Propulsion. The Effective Solution*. Paper 7. London: IMarE, 1995.
33. Nikiforov, B.V., A.P. Temirev, and O.E. Lozitskii. "Sozdanie korabel'nykh sistem elektrodvizheniya s ventil'no-induktornym elektroprivodom." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* 4 (2007): 62–66.

34. Ericson, T., N. Hingorani, and Yu. Khersonsky. "Power electronics and future ships electrical system." *IEEE Transactions of industry applications* 42.1 (2006): 76–79
35. Ehrhart, P., and L. Sozzi. "MM technologies and application at ships generators and motors." *Developing Benefits for Maritime Applications*. 1998. Paper 2.
36. Nikiforov, B.V., and V.N. Davydov. № 332499. Asinkhronnyi generator v EES. USSR, assignee. Publ. 8 Jan. 1991.
37. Nikiforov, B.V., V.N. Davydov, et al. RU 2 237 338 C2, IPC H 02 K 19/06, H 02 K 1/06. Induktorni dvi-gatel'. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Sept. 2004.
38. Arkhipov, A. V., K. S. Lyapudov, B.V. Nikiforov, et al. RU 2 343 615 C1, IPC H 02 J 9/06. Reversivnyi preobrazovatel' napryazheniya dlya peredachi elektroenergii mezhdru setyami peremennogo i postoyannogo toka. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Jan. 2009.
39. Klockow, Biesenack H., and Herzog M. "Electric roads." *Elektrische Bahnen* 3 (2003): 107–112.
40. Cooke, Richard. *Integrating external drive actuation systems into the submarine*. UDT. 2010.
41. Dyadik, A.N., and B.V. Nikiforov. *Ispol'zovanie elektrokhimicheskikh generatorov na korablyakh*. SPb.: Izd. SPb GMTU, 2011.

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: kaf_edas@gumrf.ru

Никифоров Борис Владимирович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: boris.nic-b@yandex.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Макаров Арсений Михайлович — 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: makar_tnt@mail.ru, kaf_edas@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanovsky, Viktor 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: kaf_edas@gumrf.ru

Nikiforov, Boris 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: boris.nic-b@yandex.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Makarov, Arsenii M. — Postgraduate
Supervisor:
Romanovsky, Viktor V.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: makar_tnt@mail.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2018 г.
Received: April 24, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-597-607

RELIABILITY INDICATORS AT PARAMETRICAL SYNTHESIS OF THE AUTOMATED ELECTRIC DRIVES

A. V. Saushev¹, E. V. Bova¹, G. L. Demidova²

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

² — ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation

The main objectives of parametrical synthesis of the automated electric drives are considered. It is noted that at the choice of indicators of quality it is necessary to consider reliability indicators. For the automated electric drives such indicators are the probability of no-failure operation and a stock of working capacity. The mathematical formulation of these concepts based on information on border of area of working capacity is provided. The mathematical formulation of a standard availability as which understand property of the automated electric drive to keep output parameters in the set limits at the time of an exit them from mass production is provided. It is shown that for the majority of electric drives there is no information on laws of change of their internal parameters. At the same time the only indicator characterizing reliability is the working capacity stock. Different forms of record of this indicator are received. In the presence of aprioristic information on properties of internal parameters of the electric drive the coefficients characterizing the speed of change of these parameters are entered into a formula for calculation of a stock of working capacity. It is proved that in the field of working capacity the probability of providing any tolerance condition is not decreasing monotonous function of a stock of working capacity. It is established that for any dimension of space of internal parameters of the electric drive in a point of an extremum of the minimum stock of working capacity the value of probability of no-failure operation also is in vicinity of an optimum of this probability. On the basis of the received results the conclusion is drawn on need of use of a stock of working capacity at parametrical synthesis of the automated electric drives and also on expediency of its application as criterion function at limited information on laws of change of internal parameters of the automated electric drive or its total absence.

Keywords: the automated electric drive, probability of no-failure operation, a working capacity stock, area of working capacity, parametrical synthesis, internal parameters.

For citation:

Saushev, Alexander V., Elena V. Bova, and Galina L. Demidova. "Reliability indicators at parametrical synthesis of the automated electric drives." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.3 (2018): 597–607. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-597-607.

УДК 658.512

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

А. В. Саушев¹, Е. В. Бова¹, Г. Л. Демидова²

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

² — Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассматриваются основные задачи параметрического синтеза автоматизированных электроприводов. Отмечается, что при выборе показателей качества необходимо учитывать показатели надежности. Для автоматизированных электроприводов такими показателями являются вероятность безотказной работы и запас работоспособности. Приводится математическая формулировка этих понятий, основанная на информации о границе области работоспособности. Приводится математическая формулировка серийнопригодности, под которой понимают свойство автоматизированного электропривода сохранять выходные параметры в установленных пределах на момент выхода его из серийного производства. Показано, что для большинства электроприводов отсутствует информация о законах изменения их внутренних параметров. При этом единственным показателем, характеризующим надежность, является

ся запас работоспособности. Получены разные формы записи этого показателя. При наличии априорной информации о свойствах внутренних параметров электропривода в формулу для вычисления запаса работоспособности вводятся коэффициенты, характеризующие скорость изменения этих параметров. Доказано, что в области работоспособности вероятность обеспечения любого допускового условия является неубывающей монотонной функцией запаса работоспособности. Установлено, что для произвольной размерности пространства внутренних параметров электропривода в точке экстремума минимального запаса работоспособности значение вероятности безотказной работы также находится в δ -окрестности оптимума этой вероятности. На основании полученных результатов сделан вывод о необходимости использования запаса работоспособности при параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов, а также о целесообразности его применения в качестве целевой функции при ограниченной информации о законах изменения внутренних параметров автоматизированного электропривода или ее полном отсутствии.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, вероятность безотказной работы, запас работоспособности, область работоспособности, параметрический синтез, внутренние параметры.

Для цитирования:

Саушев А. В. Показатели надежности при параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов / А. В. Саушев, Е. В. Бова, Г. Л. Демидова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 597–607. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-597-607.

Введение (Introduction)

Проблема параметрического синтеза автоматизированных электроприводов (АЭП) включает решение двух основных задач. В о - п е р в ы х , это выбор номинальных значений внутренних параметров электропривода, во - в т о р ы х , это определение допустимых значений этих параметров, при которых электропривод сохраняет работоспособное состояние. Первая из этих задач обычно сводится к задаче параметрической оптимизации, при которой поиск номинальных значений внутренних параметров производится каким-либо оптимальным образом на основе некоторого критерия оптимальности и выбранной целевой функции.

К внутренним параметрам АЭП, подлежащим оптимизации, относятся параметры комплекующих элементов электротехнических устройств, входящих в состав АЭП, а также функции этих параметров, имеющие определенный физический смысл. Будем обозначать такие параметры буквой X . К ним, например, относятся: сопротивления резисторов емкости конденсаторов, индуктивности катушек, коэффициенты жесткости упругих связей, массы, моменты инерции, коэффициенты усиления, постоянные времени.

При выборе показателей качества на этапе параметрического синтеза АЭП достаточно часто рассматривают лишь показатели назначения, причем, как правило, во внимание принимают лишь динамические показатели: время переходного процесса и максимальное перерегулирование [1]. В работах [2], [3], Ю применительно к электротехническим системам и электроприводу, показано, что решение задачи параметрической оптимизации должно обязательно вестись с учетом показателей надежности. Более того, эти показатели во многих случаях целесообразно использовать в качестве целевой функции.

Целью работы является анализ показателей надежности, которые могут быть использованы для решения задачи параметрического синтеза АЭП в условиях ограниченной статистической информации о законах изменения их внутренних параметров, математической записи и взаимосвязи.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для электроприводов и их элементов важнейшими свойствами, определяющими надежность, являются безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Применительно к задаче параметрического синтеза такими свойствами являются безотказность и долговечность.

Безотказность — это свойство непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения. *Долговечность* — это свойство АЭП, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния. Данные определения соответствуют действующему стандарту [4] и по формулировке несколько отличаются от определений, данных в предыдущих изданиях этого ГОСТа. Приведем определения ключевых понятий, необходимых для понимания рассматриваемого вопроса. При этом под объектом в данных определениях понимается АЭП или его элемент, включая, например, систему управления электропривода, электрический и электромеханический преобразователи.

Наработка — продолжительность или объем работы объекта. *Наработка до отказа* — наработка объекта от начала его эксплуатации или от момента его восстановления до отказа. *Ресурс* — суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния. *Остаточный ресурс* — суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния. *Работоспособное состояние* — состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции. Работоспособное состояние может быть определено, например, как состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям, установленным в документации на этот объект [4].

Ключевыми показателями безотказности и долговечности, которые могут быть использованы при формировании целевой функции, являются вероятность безотказной работы, т. е. вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет, и средний ресурс, т. е. математическое ожидание ресурса. Поскольку в литературе часто используется понятие остаточного ресурса, в качестве возможного показателя можно рассматривать средний *остаточный ресурс*, т. е. математическое ожидание остаточного ресурса.

Как отмечалось ранее, задача параметрической оптимизации заключается в выборе оптимальных значений внутренних параметров объекта. При этом принципиально можно управлять лишь показателями безотказности, которые коррелируют с показателями долговечности. Действительно, выбором значений внутренних параметров АЭП можно лишь добиться максимизации времени нахождения объекта в работоспособном состоянии и невозможно максимизировать суммарную наработку объекта от начала его эксплуатации или от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния. Таким образом, важнейшим показателем, характеризующим надежность АЭП при решении задачи параметрического синтеза, является вероятность безотказной работы.

Этот показатель может быть записан как вероятность удовлетворения условий работоспособности:

$$P_{\Pi}(T) = P_{\Gamma}(\mathbf{X}_{\Pi}, \mathbf{I}) = P\left\{Y_j(\mathbf{X}(t)) \in [Y_{j\min}, Y_{j\max}], j = \overline{1, m}, \forall t \in [0, T]\right\},$$

или как вероятность принадлежности вектора первичных параметров \mathbf{X} АЭП области работоспособности G , под которой понимается множество значений этих параметров, при которых выполняются все требования к АЭП [5]:

$$P_{\Pi}(T) = P_{\Gamma}(\mathbf{X}_{\Pi}, \mathbf{I}) = P\left\{(\mathbf{X}(t)) \in G, \forall t \in [0, T]\right\},$$

где $\mathbf{X}_{\Pi} = [X_{1\Pi}, \dots, X_{i\Pi}, \dots, X_{n\Pi}]^T$, $\mathbf{I} = [I_1, \dots, I_i, \dots, I_n]^T$ — векторы, соответственно, номинальных значений параметров и относительных допусков на них (полей рассеивания), задаваемых классами точности элементов; $\mathbf{X}(t) = [X_1(t), \dots, X_i(t), \dots, X_n(t)]^T$ — векторный случайный процесс изменения параметров элементов в интервале времени $[0, T]$.

Для момента времени $T = 0$ эти выражения преобразуются к виду:

$$P_{\Pi}(0) = P_0(\mathbf{X}_{\Pi}, \mathbf{I}) = P\left\{Y_j(\bar{X}_{\Pi}) \in [Y_{j\min}, Y_{j\max}], j = \overline{1, m}\right\};$$

$$P_{\Pi}(0) = P_0(\mathbf{X}_{\Pi}, \mathbf{I}) = P\{\bar{X} \in G\}.$$

Они служат для оценки серийнопригодности, под которой понимают свойство АЭП сохранять выходные параметры в установленных пределах (допусках) на момент выхода их из серийного производства. В случае, когда область работоспособности является выпуклой или имеет форму гиперпараллелепипеда [5], последнее выражение для фиксированных классов точности элементов можно записать в виде

$$P_T(\mathbf{X}) = P\{X_{in}(t) \geq X_{ипр}, i = \overline{1, n}, \forall t \in [0, T]\}, \quad (1)$$

где $X_{in}(t)$ — случайное номинальное значение i -го внутреннего параметра АЭП в момент времени t ; $X_{ипр}$ — предельное (максимальное X_{imax} или минимальное X_{imin}) допустимое значение i -го внутреннего параметра; T — заданное время работы системы.

Вероятность безотказной работы (1) можно представить как математическое ожидание некоторого функционала Q , определяемого на траекториях $\mathbf{X}(t) = [X_1(t), \dots, X_i(t), \dots, X_n(t)]^T$ номинальных значений внутренних параметров

$$P_T(\mathbf{X}) = M[Q(\mathbf{X}_{\Pi}, \mathbf{X}(t), T)].$$

Этот функционал задается следующим образом:

$$Q(\mathbf{X}_{\Pi}, \mathbf{X}(t), T) = \begin{cases} 0, \text{ если } \exists t \leq T \text{ и } i \in [1, n] \text{ для которых } X_{in}(t) < X_{ипр}; \\ 1 \text{ — в противном случае,} \end{cases}$$

где T — заданный интервал времени функционирования АЭП.

Для каждой реализации $X_{in}(t)$, $i = \overline{1, n}$ обозначим через R_{iX} минимальное значение i -го внутреннего параметра на интервале времени $[0, T]$:

$$R_{iX} = \min_{t \in [0, T]} X_{in}(t), i = \overline{1, n}.$$

Величина R_{iX} является случайной величиной с плотностью распределения $\Phi_i(X)$, которая в общем случае определяется номинальными значениями внутренних параметров \mathbf{X} , законами распределения этих параметров во времени и величиной интервала времени $[0, T]$.

По аналогии введем в рассмотрение функционал Q_R , определяемый на случайных векторах $\mathbf{R}_X = [R_{1X}, \dots, R_{iX}, \dots, R_{nX}]^T$, следующим образом:

$$Q_R(\mathbf{R}_X) = \begin{cases} 0, \text{ если хотя бы один } R_{iX} < X_{ипр}, i = \overline{1, n}; \\ 1 \text{ — в противном случае.} \end{cases}$$

Математическое ожидание $M[Q_R(\mathbf{R}_X)] = P_R(\mathbf{X})$ функционала Q_R равно математическому ожиданию функционала Q , так как для каждой траектории $\mathbf{X}(t)$ значения этих функционалов совпадают, что следует из способа их построения и определения случайных величин R_{iX} , $i = \overline{1, n}$. Таким образом, уравнение (1) можно записать в виде

$$P_T(\mathbf{X}) = M[Q(\mathbf{X}_{\Pi}, \mathbf{X}(t), T)] = M[Q_R(\mathbf{R}_X)] = \int_{X_{ипр}} \dots \int_{X_{ипр}} \Phi_R(\mathbf{X}) dX,$$

где $\Phi_R(\mathbf{X})$ — совместная плотность распределения случайных величин R_{iX} ; $X_{ипр}, \dots, X_{ипр}$ — ограничения на внутренние параметры, определяемые границей области работоспособности.

Вероятность обеспечения i -го допускового условия для параметра X_i по аналогии с изложенным имеет вид

$$P_i(\mathbf{X}) = \int_{X_{ипр}}^{\infty} \Phi_i(X) dX,$$

где $\Phi_i(R)$ — плотность распределения величины R_{iX} .

Для момента времени $T = 0$ получаем оценку серийнопригодности АЭП $P_0(\mathbf{X})$.

Случайные величины $R_{iX}, i = \overline{1, n}$ представляют собой значения внутренних параметров в момент времени $t = 0$, а $\Phi_i(X)$ — совместную плотность их распределения. Введение случайных величин $R_{iX}, i = \overline{1, n}$ позволяет при определении параметрической надежности перейти от рассмотрения случайных функций $X_i(t)$ к рассмотрению случайных величин R_{iX} , что существенно упрощает математическую формализацию этого показателя при решении задачи параметрического синтеза.

Основным недостатком вероятности безотказной работы, как показателя качества при решении задачи параметрического синтеза АЭП, является необходимость иметь статистические данные о законах распределения внутренних параметров. Для большинства АЭП, как показывает анализ, такие данные отсутствуют.

Наряду с вероятностью безотказной работы для характеристики надежности по отношению к постепенным отказам, а также для оценки серийнопригодности широкое применение находит показатель, определяющий запас работоспособности объекта. В большинстве работ [6], [7] запас работоспособности определяют как степень выполнения условий работоспособности и оценивают независимо друг от друга по каждому выходному параметру $Y_j, j = \overline{1, m}$. При этом запас работоспособности $\lambda_j^c(\mathbf{X})$ обычно вычисляют по формуле

$$\lambda_j^c(\mathbf{X}) = (Y_{j\text{пр}} - Y_{jn}(\mathbf{X})) / \delta_j - 1, j = \overline{1, m},$$

где $Y_{j\text{пр}}$ — предельное (максимальное $Y_{j\text{max}}$ или минимальное $Y_{j\text{min}}$) допустимое значение j -го выходного параметра Y_j ; $Y_{jn}(\mathbf{X})$ — номинальное значение параметра Y_j ; $\delta_j = Y_{jn}(\mathbf{X}) - Y_{pj}(\mathbf{X})$ — параметр нормировки, характеризующий рассеяние параметра Y_j через квантиль $Y_{pj}(\mathbf{X})$ его распределения уровня $P \approx 0$.

Приведенное определение запаса работоспособности не отражает сущности этого понятия и не позволяет эффективно его использовать в процессе параметрического управления состоянием АЭП и, в частности, для решения рассматриваемой задачи. Запас работоспособности следует оценивать на материально-структурном уровне, поскольку изменение параметра Y_j является лишь следствием изменения первичных параметров АЭП, а зависимость $Y_j(\mathbf{X})$ является, как правило, нелинейной. При этом незначительное изменение первичных параметров вследствие естественного старения и износа может привести к заметному изменению выходных параметров АЭП, включая потерю его работоспособного состояния.

Под запасом работоспособности будем понимать степень приближения вектора \mathbf{X}_i фактического состояния системы к его предельно допустимому значению $\mathbf{X}_{\text{пр}}$. Множество предельно допустимых значений вектора $\mathbf{X}_{\text{пр}}$ определяется границей области работоспособности АЭП. Степень приближения вектора \mathbf{X}_i задается расстоянием от его конца до ближайшей граничной точки этой области.

Обозначим через $\mathbf{X}_r = [X_{r1}, X_{r2}, \dots, X_{rn}]$ точку на границе области работоспособности. Минимальное расстояние вектора первичных параметров $\mathbf{X}_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}]$ от вектора \mathbf{X}_r по всем значениям граничных точек будет определять запас работоспособности системы ρ ,

$$\rho = \min_{[\mathbf{X}_r]} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{ri})^2}.$$

Если определены номинальные значения внутренних параметров $\mathbf{X}_n = [X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nn}]$, то может быть определен и номинальный запас работоспособности ρ_n , который в этом случае удобно выражать в относительных единицах $\lambda(\mathbf{X})$:

$$\rho_n = \min_{[\mathbf{X}_r]} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{in} - X_{ri})^2}, \lambda(\mathbf{X}) = \rho / \rho_n.$$

Запас работоспособности $\lambda(\mathbf{X})$, в отличие от $\lambda_j^c(\mathbf{X})$, учитывает как внешние, так и внутренние условия работоспособности АЭП [2].

Если определены номинальные значения внутренних параметров $\mathbf{X}_n = [X_{1n}, X_{2n}, \dots, X_{mn}]$, то может быть определен и номинальный запас работоспособности

$$\rho_n = \min_{[\mathbf{X}_i]} \sqrt{(X_{1n} - X_{r1})^2 + \dots + (X_{in} - X_{ri})^2 + \dots + (X_{mn} - X_{rn})^2}.$$

В этом случае величина запаса работоспособности может быть выражена в относительных единицах: $\lambda(\mathbf{X}) = \rho/\rho_n$.

Если область работоспособности является выпуклой [13], а также известны статистические данные, характеризующие технологический разброс параметров комплектующих элементов АЭП при производстве, и данные об изменении этих параметров при их эксплуатации, то запас работоспособности для одного внутреннего параметра X_i может быть рассчитан по формуле

$$\lambda_i(\mathbf{X}) = (X_{in} - X_{inp})/\delta_i(X) - 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где X_{inp} — предельное (максимальное X_{imax} или минимальное X_{imin}) допустимое значение i -го внутреннего параметра; $\delta_i(\mathbf{X})$ — параметр нормировки, характеризующий меру рассеяния параметра X_i .

Параметр нормировки $\delta_i(\mathbf{X})$ можно задать через характеристики рассеяния внутренних параметров, определяющих их возможные уходы:

$$\delta_i(X) = X_{in} - X_{Pi}, \quad \delta_i(X) > 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где X_{Pi} — квантиль уровня $P \approx 0$ распределения i -го внутреннего параметра, т. е.

$$P = P\{X_i(t) \leq X_{Pi}\} = \int_{-\infty}^{X_{Pi}} \Phi_i(X) dX; \quad \text{а } \Phi_i(X) \text{ — плотность распределения этого параметра.}$$

Анализ литературных источников показывает, что для большинства АЭП на первое место выдвигается требование высокой надежности. Таким образом, при решении задач параметрической оптимизации в качестве целевой функции целесообразно выбирать вероятность безотказной работы, или запас работоспособности системы. Непосредственное использование важнейшего показателя параметрической надежности вероятности безотказной работы в качестве целевой функции при оптимизации внутренних параметров АЭП не всегда эффективно вследствие его малой чувствительности вдали от границ области работоспособности и большой трудоемкости вычислений. Кроме того, при отсутствии статистических данных о распределении параметров элементов АЭП вероятность безотказной работы принципиально не может быть использована в качестве целевой функции. Этим недостатком лишен запас работоспособности $\lambda(\mathbf{X})$, а также минимальный запас работоспособности $\lambda_i(\mathbf{X})$, т. е. $\min \lambda_i(\mathbf{X})$. Кроме того, эти критерии позволяют получать, в отличие от других критериев, любое Парето-оптимальное решение [2].

По аналогии с работой [8] докажем, что в области работоспособности вероятность $P_i(\mathbf{X})$ обеспечения i -го допускового условия является неубывающей монотонной функцией запаса работоспособности $\lambda_i(\mathbf{X})$ и $\max_{X \in G} P_i(\mathbf{X}) = P_i(\lambda_i(X_0))$, где $\lambda_i(\mathbf{X}) = \max_{X \in G} \lambda_i(\mathbf{X})$.

Доказательство

Из формул (2) и (3) следует, что предельное значение i -го первичного параметра X_{inp} можно представить в следующем виде:

$$X_{inp} = X_{Pi} - \lambda_i(\mathbf{X}) \delta_i(\mathbf{X}).$$

Подставив значение X_{inp} в формулу вероятности, получим

$$P_i(\mathbf{X}) = \int_{X_{Pi}}^{\infty} \Phi_i(X) dX + \int_{X_{Pi} - \lambda_i(\mathbf{X}) \delta_i(\mathbf{X})}^{X_{Pi}} \Phi_i(X) dX = P_T + \int_{X_{Pi} - \lambda_i(\mathbf{X}) \delta_i(\mathbf{X})}^{X_{Pi}} \Phi_i(X) dX.$$

Из последнего выражения следует, что вероятность обеспечения i -го допускового условия для параметра X_i следующим образом зависит от значения запаса работоспособности $\lambda_i(\mathbf{X})$: $P_i(\mathbf{X}) < P_T(\mathbf{X})$, если $\lambda_i(\mathbf{X}) < 0$; $P_i(\mathbf{X}) = P_T(\mathbf{X})$, если $\lambda_i(\mathbf{X}) = 0$; $P_i(\mathbf{X}) > P_T(\mathbf{X})$, если $\lambda_i(\mathbf{X}) > 0$, т. е.

в окрестности нуля функции $\lambda_i(\mathbf{X})$ значение вероятности $P_i(\mathbf{X})$ с ростом $\lambda_i(\mathbf{X})$ возрастает, причем $P_i(\mathbf{X}) \rightarrow 1$ при $\lambda_i(\mathbf{X}) \rightarrow \infty$, и $P_i(\mathbf{X}) \rightarrow 0$ при $\lambda_i(\mathbf{X}) \rightarrow -\infty$.

Предположим, что $P_i(\mathbf{X}) \rightarrow 1$ при возрастании $\lambda_i(\mathbf{X})$ в области работоспособности G не строго монотонно, т. е. существует точка $\mathbf{X}^0 \in G$, в которой значение $P_i(\lambda_i(\mathbf{X}^0))$ достигает своего локального максимума $P_i(\lambda_i(\mathbf{X}^0)) = P^0 < 1$, а также существует точка $\mathbf{X}^* \in G$, в которой $\lambda_i(\mathbf{X}^*) > \lambda_i(\mathbf{X}^0)$ и вероятность $P_i(\lambda_i(\mathbf{X}^*))$ принимает значение $P_i(\lambda_i(\mathbf{X}^*)) \leq P_i(\lambda_i(\mathbf{X}^0))$. Определим в точке \mathbf{X}^0 квантиль X_{P_0} распределения $\Phi_i(X)$ уровня $P_0 = 1 - P^0$ и вычислим на основании формул (2) и (3) запас работоспособности $\lambda_i^0(\mathbf{X})$, взяв в качестве уровня вероятности P значение P_0 . При этом получим

$$P_i(\mathbf{X}) = P^0 + \int_{X_{P_0} - \lambda_i^0(\mathbf{X}) \delta_i^0(\mathbf{X})}^{X_{P_0}} \Phi_i(X) dX, \quad (4)$$

где $\lambda_i^0(\mathbf{X}) = (X_{in} - X_{inr}) / \delta_i^0(\mathbf{X}) - 1$; $\delta_i^0(\mathbf{X}) = X_{in} - X_{P_0}$.

По условию сделанного предположения, в точке \mathbf{X}^0 $P_i(\mathbf{X}^0) = P^0$. Следовательно, $\lambda_i^0(\mathbf{X}^0) = 0$, $\mathbf{X}_{P_0}(\mathbf{X}^0) = X_{inr}$. При возрастании в окрестности нуля значения функции $\lambda_i^0(\mathbf{X})$ вероятность $P_i(\mathbf{X})$ также возрастает, поскольку для $P^0 < 1$ величина $X_{P_0}(\mathbf{X}^0)$ еще не достигает границы усечения плотности вероятностей $\Phi_i(X)$. Поэтому значение интеграла в формуле (4) для $\lambda_i^0(\mathbf{X}) > 0$ также больше нуля. Поскольку переменные $\lambda_i(\mathbf{X})$, $\lambda_i^0(\mathbf{X})$, $\delta_i(\mathbf{X})$, $\delta_i^0(\mathbf{X})$, X_{P_i} описывают одно и то же распределение $\Phi_i(X)$ величин R_{iX} в номинальной точке $\mathbf{X} = \mathbf{X}_n$, то из формул (2) и (4) следует, что

$$X_{in} - X_{inr} = (\lambda_i(\mathbf{X}) + 1) \delta_i(\mathbf{X}) = (\lambda_i^0(\mathbf{X}) + 1) \delta_i^0(\mathbf{X}),$$

откуда

$$\lambda_i^0(\mathbf{X}) = (\lambda_i(\mathbf{X}) + 1) \delta_i(\mathbf{X}) / \delta_i^0(\mathbf{X}) - 1. \quad (5)$$

Получим зависимость параметра рассеяния $\delta_i(\mathbf{X})$ от уровня вероятности P задания квантиля X_{P_i} в формуле (3).

Выразив X_{P_i} из формулы (3) и подставив в формулу вероятности обеспечения i -го допускового условия для параметра X_i , получим

$$P = \int_{-\infty}^{X_{P_i}} \Phi_i(X) dX = \int_{-\infty}^{X_{in} - \delta_i(\mathbf{X})} \Phi_i\left(\frac{X - X_{in}}{\sigma_i(\mathbf{X})}\right) dX.$$

После замены переменных:

$$v = (X - X_{in}) / \sigma_i(\mathbf{X}); X = v\sigma_i(\mathbf{X}) + X_{in}; dX = \sigma_i(\mathbf{X}) dv,$$

окончательно получим

$$P = \int_{-\infty}^{-\delta_i(\mathbf{X})/\sigma_i(\mathbf{X})} \sigma_i(\mathbf{X}) \Phi_i(v) dv = F_i(-\delta_i(\mathbf{X}) / \sigma_i(\mathbf{X})), F_i(t) = \int_{-\infty}^{X_{P_i}} \sigma_i(\mathbf{X}) \Phi_i(v) dv.$$

Здесь $\sigma_i(\mathbf{X}) \Phi_i(v)$ — нормированная плотность распределения случайной величины R_{iX} ; $\sigma_i(\mathbf{X})$ — среднеквадратичное отклонение R_{iX} . На основании выполненных преобразований можно записать

$$\delta_i(\mathbf{X}) = -\sigma_i(\mathbf{X}) F_j^{-1}(P),$$

где $F_j^{-1}(P)$ — квантиль уровня P нормированного распределения $F_i(t)$.

После подстановки $\delta_i(\mathbf{X})$ в формулу (5) получим

$$\lambda_i^0(\mathbf{X}) = (\lambda_i(\mathbf{X}) + 1) F_j^{-1}(P) / F_j^{-1}(P_0) - 1.$$

Производная $\lambda_i^0(\mathbf{X})$ по направлению ϑ возрастания функции $\lambda_i^0(\mathbf{X})$ с учетом последнего выражения определяется формулой $d\lambda_j^0 / d\vartheta = (F_j^{-1}(P) / F_j^{-1}(P_0)) d\lambda_j / d\vartheta$ и в области работоспособ-

ности G всегда положительна. Поэтому при увеличении запаса работоспособности $\lambda_i(\mathbf{X})$ значение функции $\lambda_i^0(\mathbf{X})$ также возрастает, в том числе и в точке \mathbf{X}^0 , что доказывает утверждение о монотонном стремлении к единице вероятности $P\{X_i(t) \leq X_{pi}\}$ при увеличении $\lambda_i(\mathbf{X})$. Противоречивость условий $\lambda_i(\mathbf{X}^*) > \lambda_i(\mathbf{X}^0)$ и $P_i(\lambda_i(\mathbf{X}^*)) \leq P_i(\lambda_i(\mathbf{X}^0))$ также доказывает справедливость исходных утверждений.

Обобщим полученные результаты для m выходных и n первичных параметров и докажем, что в точке экстремума минимального запаса работоспособности значение вероятности безотказной работы:

$$P_0 = P_T(\mathbf{X}_0) = \prod_{i=1}^n P_i(\mathbf{X}_0), \quad (6)$$

находится в δ -окрестности оптимума этой вероятности, определяемой соотношением

$$\delta = \hat{P} - P_0 \leq 1 - P_{j0}^m,$$

$$\text{где } \hat{P} = \max_{\mathbf{X} \in G} P_T(\mathbf{X}) = \max_{\mathbf{X} \in G} \prod_{i=1}^n P_i(\mathbf{X}); \quad P_{j0} = \min_{j \in [1, m]} P_j(\lambda_j(\mathbf{X})).$$

Доказательство

Известно, что вероятность безотказной работы любой электротехнической системы, в том числе АЭП, можно записать в следующем виде [2]:

$$P_T(\mathbf{X}) = P_1(Y_1(\mathbf{X}))P_2(Y_2(\mathbf{X})|Y_1(\mathbf{X})) \dots P_m(Y_m(\mathbf{X})|Y_1(\mathbf{X}), \dots, Y_{m-1}(\mathbf{X})),$$

где $P_j(Y_j(\mathbf{X}))$ — безусловная вероятность выполнения j -го условия работоспособности; $P_k(Y_k(\mathbf{X})|Y_1(\mathbf{X}), \dots, Y_{k-1}(\mathbf{X}))$, $k \in [2, m]$ — условная вероятность выполнения k -го условия работоспособности.

В пространстве R^n внутренних параметров \mathbf{X} вероятность $P_T(\mathbf{X})$ можно записать следующим образом:

$$P_T(\mathbf{X}) = P_1(X_1)P_2(X_2|X_1) \dots P_n(X_n|X_1, \dots, X_{n-1}), \quad (7)$$

где $P_i(X_i)$ — безусловная вероятность выполнения i -го допускового условия; $P_k(X_k|X_1, \dots, X_{k-1})$ — условная вероятность выполнения k -го допускового условия.

Поскольку внутренние параметры, а также значения R_{iX} , $i = \overline{1, n}$ независимы, вероятность (7) можно записать в виде

$$P_T(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n P_i(\mathbf{X}), \quad (8)$$

где $P_i(\mathbf{X})$ — вероятность выполнения k -го допускового условия.

Результаты (Results)

Из выражений (6) – (8) для вероятностей P_0 , $P_T(\mathbf{X})$ и доказанного условия монотонности зависимости $P_i(\lambda_i(\mathbf{X}))$ следует, что наименьшее (наихудшее) из возможных значение вероятности P^0 имеет место в случае, когда в оптимальной точке \mathbf{X}_0 все $\lambda_k(\mathbf{X}_0)$ и $P_k(\mathbf{X}_0)$, $\forall k \in [1, m]$ равны наименьшим значениям. Следовательно, $P_0 \geq P_{j0}^m$. Вместе с тем, по определению, $\hat{P} \leq 1$.

Из последних двух неравенств получаем соотношение, которое и требовалось доказать.

Таким образом, для разных законов распределения выходных параметров максимизация минимального запаса работоспособности:

$$\lambda(\mathbf{X}_0) = \max_{\mathbf{X} \in G} \lambda(\mathbf{X}) = \max_{\mathbf{X} \in G} \min_{j \in [1, m]} \lambda_j(\mathbf{X}), \quad (9)$$

дает близкую к максимальному значению вероятность безотказной работы АЭП.

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при ограниченной информации о свойствах внутренних параметров АЭП или при полном отсутствии такой информации запас работоспособности в полной мере характеризует вероятность безотказной работы электропривода или его элемента. Таким образом, при решении задач параметрического синтеза АЭП в качестве показателя надежности предлагается использовать запас работоспособности.

В известных работах [9], [10], [14], [15] при решении задач параметрического синтеза показатели надежности либо вообще не рассматриваются, что приводит к преждевременной потере работоспособности со всеми вытекающими отсюда последствиями, либо учитываются косвенно путем оценки робастности электропривода [11] – [13]. Однако такой подход является недостаточным, так как он не позволяет оценить вероятность безотказной работы и не может идти ни в какое сравнение с предлагаемым показателем — запасом работоспособности.

Исследования авторов [2], [3], показывают, что запас работоспособности в большинстве случаев следует рассматривать в качестве целевой функции при параметрическом синтезе АЭП. Если имеющаяся априорная информация о свойствах внутренних параметров АЭП позволяет судить о скоростях изменения этих параметров, то в формуле вычисления запаса работоспособности эту информацию можно учесть путем введения соответствующих весовых коэффициентов $k_1, \dots, k_i, \dots, k_n$, характеризующих эти скорости по каждому внутреннему параметру. В относительных единицах, считая коэффициент k_1 наибольшим, получим $1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n$, где $\alpha_i = k_i/k_1, i = 1, n$. При этом выражение для вычисления номинального запаса работоспособности АЭП будет иметь вид

$$\rho_n = \min_{[X_r]} \sqrt{(X_{1n} - X_{r1})^2 + \dots + (X_{in} - \alpha_i X_{ri})^2 + \dots + (X_{nn} - \alpha_n X_{rn})^2}.$$

Следует иметь в виду, что параметрический синтез АЭП по критерию максимизации минимального запаса работоспособности позволяет получить и положительный социальный аспект, который выражается в снижении стрессовых ситуаций для персонала, связанных с отказами элементов АЭП и необходимостью принятия мер по их ликвидации.

Выводы (Summary)

1. Необходимым условием при решении задач параметрического синтеза АЭП различного назначения и мощности является обязательный учет показателей надежности, среди которых следует выделить запас работоспособности.

2. Решение, получаемое по целевой функции (9), является единственным и в максимальной степени обеспечивает выполнение всех условий работоспособности. При этом автоматически учитываются показатели назначения АЭП, стоимость ее изготовления и, кроме того, чувствительность и возможные уходы выходных параметров, связанные с вариациями параметров комплектующих элементов в процессе изготовления, хранения и эксплуатации электропривода.

3. Информация о запасе работоспособности в процессе эксплуатации АЭП позволяет успешно и с высокой достоверностью решать задачи их технической диагностики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилова С. В. Математическое моделирование двухдвигательного электропривода согласованного вращения / С. В. Гаврилова, В. И. Доманов // Вестник Технологического университета. — 2016. — Т. 19. — № 23. — С. 88–91.
2. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем: монография / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.
3. Саушев А. В. К проблеме оптимального параметрического синтеза автоматизированных электроприводов и оценки их технического состояния / А. В. Саушев, Е. В. Бова // Труды IX Междунар. (XX Все-

российской) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. — Пермь: Изд-во Пермского национ. исслед. политехнич. ун-та, 2016. — С. 92–95.

4. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2018. — 28 с.

5. Саушев А. В. Области работоспособности электротехнических систем: монография / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.

6. Абрамов О. В. Оптимальный параметрический синтез по критерию запаса работоспособности / О. В. Абрамов, Я. В. Катыева, Д. А. Назаров // Проблемы управления. — 2007. — № 6. — С. 64–69.

7. Леонов Д. В. Способ экспериментальной оценки запаса работоспособности радиоэлектронных устройств / Д. В. Леонов, В. А. Фин // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. — 2013. — Т. 13. — № 4. — С. 71–73.

8. Антушев Г. С. Методы параметрического синтеза сложных технических систем / Г. С. Антушев. — М.: Наука, 1989. — 88 с.

9. Грязев М. В. Многокритериальная оптимизация управления двухмассовой электромеханической системы / М. В. Грязев, О. А. Кузнецова, В. А. Сушкин // Электротехнические системы и комплексы. — 2013. — № 21. — С. 60–70.

10. Селиванов В. А. Критерии оптимизации и необходимость построения параметрических систем электропривода / В. А. Селиванов // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2011. — № 1. — С. 120–124.

11. Анисимов А. А. Формирования критерия оптимальности в задачах синтеза регуляторов состояния электромеханических систем / А. А. Анисимов, С. В. Тарарькин // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2009. — № 10. — С. 36–41.

12. Анисимов А. А. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния / А. А. Анисимов, С. В. Тарарькин, В. В. Аполлонский // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — № 2. — С. 21–26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.2.021-026.

13. Galrinho M. A weighted least-squares method for parameter estimation in structured models / M. Galrinho, C. Rojas, H. Hjalmarsson // Decision and Control (CDC), 2014 IEEE 53rd Annual Conference on. — IEEE, 2014. — Pp. 3322–3327. DOI: 10.1109/CDC.2014.7039903.

14. Tofghi E. M. Online estimation of induction motor parameters using a modified particle swarm optimization technique / E. M. Tofghi, A. Mahdizadeh, M. R. Feyzi // Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE. — IEEE, 2013. — Pp. 3645–3650. DOI: 10.1109/IECON.2013.6699715.

15. Fang M. Recursive identification based on weighted null-space fitting / M. Fang, M. Galrinho, H. Hjalmarsson // Decision and Control (CDC), 2017 IEEE 56th Annual Conference on. — IEEE, 2017. — Pp. 4644–4649. DOI: 10.1109/CDC.2017.8264345.

REFERENCES

1. Gavrilova, S.V., and V.I. Domanov. “Matematicheskoe modelirovanie dvukhdvigatel'nogo elektroprivoda soglasovannogo vrashcheniya.” *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* 19.23 (2016): 88–91.

2. Saushev, A.V. *Parametricheskii sintez elektrotekhnicheskikh ustroystv i sistem: monografiya*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.

3. Saushev, A.V., and E.V. Bova. “To a problem of optimal parametric synthesis of automatic electric drives and an assessment of their technical state.” *Trudy IX Mezhdunarodnoi (XX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP–2016*. Perm': izd-vo Permskogo natsion. issled. politekhnich. U-ta, 2016. 92–95.

4. Russian Federation. State Standard GOST 27.002–2015. Dependability in technics. Terms and definitions. M. Standartinform, 2018.

5. Saushev, A.V. *Oblasti rabotosposobnosti elektrotekhnicheskikh sistem: monografiya*. SPb.: Politekhnik, 2013.

6. Abramov, O.V., Ya.V. Katuyeva, and D.A. Nazarov. “Optimal parametric synthesis with respect to working capacity criterion.” *Problemy Upravleniya* 6 (2007): 64–69.

7. Leonov, D.V., and V.A. Fin. “Sposob eksperimental'noi otsenki zapasa rabotosposobnosti radioelektronnykh ustroystv.” *Fundamental'nye problemy radioelektronnoy priborostroeniya* 13.4 (2013): 71–73.

8. Antushev, G.S. *Metody parametricheskogo sinteza slozhnykh tekhnicheskikh sistem*. M.: Nauka, 1989.

9. Gryazev, M.V., O.A. Kuznetsova, and V.A. Sushkin. "Multicriterion optimization management of electro-mechanic system with two masses." *Electrotechnical Systems and Complexes* 21 (2013): 60–70.
10. Selivanov, V.A. "The criteria for the optimization and the necessity for the construction of electric drive parametric systems." *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta* 1 (2011): 120–124.
11. Anissimov, A.A., and S.V. Tararykin. "The Forming of Optimization Criterion in the Problems of Parametric Synthesis of the State Regulators in Electromechanical Systems." *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* 10 (2009): 36–41.
12. Anisimov, A.A., S.V. Tararykin, and V.V. Apolonsky. "Parametrical optimization of regulators and state observers in electromechanical systems." *Vestnik IGEU* 2 (2016): 21–26.
13. Galrinho, Miguel, Cristian Rojas, and Håkan Hjalmarsson. "A weighted least-squares method for parameter estimation in structured models." *Decision and Control (CDC), 2014 IEEE 53rd Annual Conference on*. IEEE, 2014. 3322–3327. DOI: 10.1109/CDC.2014.7039903.
14. Tofighi, Elham Mohammadalipour, Amin Mahdizadeh, and Mohammad Reza Feyzi. "Online estimation of induction motor parameters using a modified particle swarm optimization technique." *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2013. 3645–3650. DOI: 10.1109/IECON.2013.6699715.
15. Fang, Mengyuan, Miguel Galrinho, and Hakan Hjalmarsson. "Recursive identification based on weighted null-space fitting." *Decision and Control (CDC), 2017 IEEE 56th Annual Conference on*. IEEE, 2017. 4644–4649. DOI: 10.1109/CDC.2017.8264345.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саушев Александр Васильевич —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru
Бова Елена Владимировна —
 доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: ep-gumrf@bk.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Демидова Галина Львовна —
 кандидат технических наук, доцент
 Университет ИТМО
 197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 Кронверкский пр., д. 49
 e-mail: demidova@ets.ifmo.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saushev, Alexander V. —
 Doctor of Technical Sciences, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru
Bova, Elena V. —
 Associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: ep-gumrf@bk.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Demidova, Galina L. —
 PhD, associate professor
 ITMO University
 49 Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101,
 Russian Federation
 e-mail: demidova@ets.ifmo.ru

Статья поступила в редакцию 4 мая 2018 г.
 Received: May 4, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618

PROCEDURE OF COMPLEX PROCESSING RADAR DATA IN STROBE AND SELECTION OF RADAR MARK

B.V. Afanasjev, V.V. Afanasjev

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

The reliability and accuracy information about approaching ships generated by Automatic Radar Plotting Aids (ARPA) determine equipment performance. Selecting target plot in the strobe is basic problem in generating target's data. The procedure is multistage whereas every step requires different methods. The article considers different approaches to forming a strobe and tracking the target while using pulse radar. The following key stages have been distinguished: evaluation of noise level in the strobe, selection of marks for target tracking, tracking of the acquired target and tracking reset. Each stage has been structurally evaluated for the functionality purposes. The most problematic issues related to the limited sampling, sampling frequency and noise level of the radar signals have been singled out. There is the possibility the noise reduction through digital processing and signal analysis for AND condition, i.e. to confirm the signal delivery at previous antenna scanning. Direct increase of skips in passes can reduce noise effectively, however it may result in the loss of a fast-moving small size target which is especially dangerous on small-scale range, when in between the reviews an object can pass a sector equal to the width of the antenna pattern. The authors provide recommendations as per formalizing the procedure of target selection in the strobe. The efficiency of K-band radar at capturing and tracking of the targets is has been estimated. The paper highlights the specificity of the problem solution for coastal and shipborne navigational radars. The approach which consists in separating computing resources between hardware (radar processor, graphics card) and digital indicator has been highlighted. An important aspect in solving the problem is fusing the data from different sources, including automatic identification systems and prospects of artificial intelligence application. The general algorithm for solving the problem has been provided.

Keywords: Radar, strobe, target detection, target tracking, collision avoidance, radar plotting aids.

For citation:

Afanasev, Boris V., and Victor V. Afanasev. "Procedure of complex processing radar data in strobe and selection of radar mark." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 608–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618.

УДК 656.61.052

ПРОЦЕДУРА КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ В СТРОБЕ И ВЫБОРА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ МЕТКИ

Б. В. Афанасьев, В. В. Афанасьев

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

В статье выполнено исследование качества работы средств автоматической радиолокационной прокладки, определяемого достоверностью и точностью вырабатываемой информации о встречных судах для обеспечения безопасного плавания. Задача выбора отметки в стробе является краеугольной в обеспечении выработки данных о цели, является многоэтапной, где каждый этап требует привлечения определённых методов. Рассматриваются подходы к формированию строба и сопровождения целей при использовании импульсной радиолокационной станции. Выделены основные этапы решения задачи: оценка уровня помех в стробе, выделение отметок, селективное определение отметки для сопровождения, непосредственное сопровождение цели и сброс сопровождения. Выполнена структурная оценка необходимого функционального содержания каждого из этапов. Обозначены наиболее проблематичные моменты, обусловленные огра-

ниченностью выборки, частотой дискретизации, зашумленностью радиолокационного сигнала. Отмечается особенность использования шумоподавления за счет цифровой обработки и анализа сигнала на соблюдение условия «AND», т. е. подтверждение наличия сигнала на предыдущих обзорах антенны. Прямое увеличение пропусков позволяет эффективно бороться с помехами, но может привести к потере быстро идущей малоразмерной цели. Особенно это опасно на малых шкалах дальности, когда объект может пройти между обзором сектор, равный ширине диаграммы направленности. Даны рекомендации по формализации процедуры выбора отметки в строге. Отмечены особенности подхода для решения этой же задачи в береговых системах. Дана ориентировочная оценка эффективности использования радиолокационных станций миллиметрового диапазона при захвате и сопровождении целей. Показана специфика решения задачи для береговых и судовых навигационных радиолокационных станций. Отмечена особенность подхода с разделением вычислительных ресурсов между аппаратными средствами (радарным процессором, видеокартой) и цифровым индикатором. Важным аспектом при решении задачи является комплексирование информации от разнородных источников, в том числе автоматических идентификационных систем, а также перспективное использование математического аппарата искусственного интеллекта. Приведен общий алгоритм решения задачи.

Ключевые слова: радар, строб, обнаружение цели, сопровождение целей, избежание столкновений, средства радиолокационной прокладки.

Для цитирования:

Афанасьев Б. В. Процедура комплексной обработки радиолокационных данных в строге и выбора радиолокационной метки / Б. В. Афанасьев, В. В. Афанасьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 608–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618.

Введение (Introduction)

Радиолокационная станция является одним из основных источников информации в сопровождении. Совершенствуются станции сантиметрового диапазона, в течение 20 лет используются станции миллиметрового диапазона, появились и эксплуатируются когерентные радиолокационные станции (РЛС). Появление технологий цифрового представления информации открыло новые возможности в разработке методов решения навигационных задач. Стробирование береговых объектов и их сопровождение позволяет решать задачу непрерывного вычисления координат. Взятие на сопровождение встречных судов позволяет в автоматическом режиме вычислять параметры их движения и решать задачу расхождения.

Несмотря на достигнутые определенные успехи в разработке средств и методов решения задач, связанных с разливом нефтепродуктов [1], [2] и использованием новых подходов к построению моделей движения судов [3], спецификой обработки сигналов в условиях помех [4] – [6] по-прежнему остаются нерешёнными в области требуемых результатов такие задачи, как устойчивое сопровождение в условиях разнородных помех, сопровождение скоростных быстроманеврирующих целей, сопровождение малых целей, переброс траекторий (swapping), потеря траекторий, не всегда удовлетворительная точность получаемых решений.

Очевидная сложность решения задачи выбора радиолокационной отметки в строге требует комплексного подхода при существующих ограничениях технического характера (разрешающая способность существующих навигационных РЛС). Рассматривается последовательность этапов решения задачи обработки радиолокационного строга и сложностей, которые возникают на каждом из них, а именно:

- выделение отметок целей на фоне помех;
- формирование модели отметок;
- надёжный выбор отметки в строге, принадлежащей сопровождаемой цели;
- расчёт координат и вектора скорости цели.

Опыт эксплуатации показывает, что во многом решение всех указанных ранее задач определяется устойчивостью удержания отметки в строге в широком диапазоне условий наблюдения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При сопровождении целей с использованием данных РЛС результатом решения является выработка данных по координатам и параметрам движения целей [7]. Последние используются для оценки степени опасности ситуации, а также для прогноза её развития. При оценке качества решаемой задачи можно определить несколько основных критериев:

- устойчивость сопровождения цели при различных условиях наблюдения;
- точностные характеристики вырабатываемых параметров движения цели;
- характеристики сопровождаемой цели;
- число одновременно сопровождаемых целей.

Некоторые из этих критериев регламентированы соответствующими требованиями Международной электротехнической комиссии (МЭК) [8] в части, касающейся тестирования средств автоматической радиолокационной прокладки и [9], где определяются требования непосредственно к РЛС. Некоторые формируются при составлении технического задания на разработку устройства. В любом случае достижение хороших показателей по указанным критериям обуславливает необходимость разработки соответствующих методов решения с привлечением надлежащих технических средств [10], [11], [20].

Процедура сопровождения целей включает следующие этапы:

- 1-й этап — выбор отметки на сопровождение;
- 2-й этап — взятие отметки на сопровождение (захват цели);
- 3-й этап — сопровождение цели;
- 4-й этап — сброс сопровождения.

На каждом из этих этапов ставятся определённые цели и определяется процедура, приводящая к их достижению, оценивается результат и принимается решение по переходу к следующему этапу.

Выбор отметки на сопровождение определяется из решения задачи контроля за движением судов в определённом районе. Необходимость контроля обстановки с использованием РЛС требует соответствующей настройки режимов работы РЛС с целью получения более информативной картинки. Для этого необходимо выполнение следующих действий:

- 1) выбор соответствующего масштаба отображения;
- 2) регулирование усиления;
- 3) применение методов подавления разнородных помех.

Предполагается, что после настройки интересные радиолокационные объекты будут лучше узнаваемы. Для выделения на общем фоне движущихся объектов (судов) часто используется *режим послесвечения*. Важность обнаружения движущихся объектов объясняется тем, что именно эти объекты оказывают влияние на динамичное изменение ситуации. При цифровом представлении радиолокационного сигнала след отметки может быть сформирован на заданное число оборотов антенны. Практически след на пять – семь обзоров позволяет заметить начало маневрирования судна. Небольшой объект, имеющий движение в условиях волнения и появляющийся на экране с большим числом пропусков, может быть обнаружен, если след формируется в течение последних 10 – 15 мин. Использование когерентных РЛС позволяют одновременно с расстоянием определять скорость цели. Кроме визуального обнаружения, возможна установка соответствующей зоны контроля, когда при появлении в ней объекта будет выработано соответствующее сообщение. Для уменьшения вероятности ложных тревог необходимо использовать модели отметок. Используя параметры отметки, можно судить о принадлежности к тому или иному объекту.

После того как выбран объект для наблюдения, осуществляется *процедура стробирования*, или *взятия объекта на сопровождение*. Этот этап включает последовательное решение ряда следующих задач:

- 1) формирование размеров строба;
- 2) оценка уровня помех в стробе;
- 3) выделение отметок в стробе;
- 4) выбор отметки в стробе для сопровождения.

Формирование размеров строба. В современных РЛС радиолокационная картинка представляет собой массив данных в виде набора строк, каждая из которых содержит информацию по одному лучу развёртки в цифровом виде (растровые индикаторы). Преобразование видеосигнала в цифровую форму осуществляется в соответствующем устройстве (радар-процессор), одним из элементов которого является аналого-цифровой преобразователь, тактовая частота и разрядность которого определяет степень приближения цифрового сигнала к аналоговому. В основном частота дискретизации лежит в пределах (10 – 100) МГц. Число уровней представления определяется разрядностью АЦП и условиями решения задачи. Так, при частоте дискретизации 60 МГц один дискрет будет соответствовать 2,5 м дальности. Если длину строки определить в 4096 дискрет, то будет отображаться дистанция в 5,5 мили. Уменьшив частоту дискретизации в шесть раз (10 МГц), получим дискрет дальности в 15 м, и отображаемая дистанция увеличится до 33 миль.

При определении размера строба учитываются следующие факторы:

- относительная скорость сближения собственного судна и цели (до 140 уз [12]);
- погрешности попадания курсора в отметку при ручном стробировании;
- период вращения антенны;
- появление отметки цели не на каждый оборот антенны;
- статистика по отметке в стробе (формирование модели отметки по двум-трем обзорам);
- возможность встречного судна менять курс и скорость;
- увеличение вычислительных затрат при больших размерах строба.

Следует иметь в виду, что размеры строба могут изменяться на различных этапах, а именно: начального стробирования (захвата), сопровождения при стандартных условиях, сопровождения при частичном пропуске отметок на части обзоров (погодные условия), сопровождения в зонах интенсивного движения [13].

Оценка уровня помех в стробе. При обработке строба выделение отметок происходит относительно некоторого уровня. При благоприятных условиях наблюдения и хорошей фильтрации уровень, от которого ведётся обработка, является нулевым, однако это не всегда выполняется. Более того, возможны временные изменения уровня, которые имеют место при настройке отображения. В этом случае при нулевом начальном уровне произойдёт сбой в выделении отметок, и сопровождение целей будет сорвано. Для обеспечения устойчивости процедуры выделения отметок в стробе необходимо на первом этапе оценить уровень сигнала, а на втором — выделить отметки относительно уровня, определённого на первом этапе.

Выделение отметок в стробе. Основой решения данной задачи является процедура окантовки и внутреннего заполнения отметок [14]. Следует иметь в виду, что под *отметкой* следует понимать область строба, которая соответствует следующим условиям:

- по уровню имеет превышение над пороговым уровнем;
- непрерывна по заполнению.

Процедура вычислений должна предусматривать последовательный просмотр всех дискретов от центра строба, а также возможность расширения границ строба, по которым не закрыты отметки (не определены границы отметок). Отметки для РЛС миллиметрового диапазона сложнее по своей форме, чем отметки для РЛС сантиметрового диапазона. Следует иметь в виду, что внутреннее содержание отметки отличается от того, которое наблюдается на индикаторе, ввиду того, что процедура формирования облика вносит соответствующие искажения. Примеры отметок для РЛС сантиметрового и миллиметрового диапазонов приведены на рис. 1.

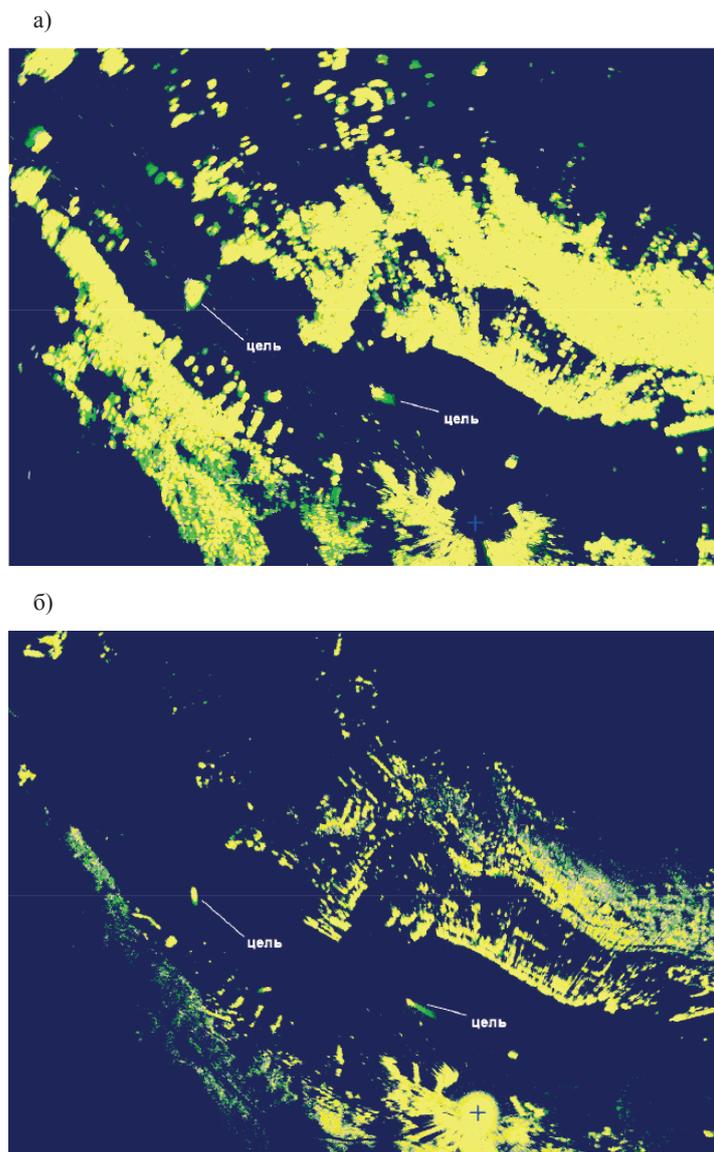


Рис. 1. Радиолокационное отображение в сантиметровом (а) и миллиметровом (б) диапазоне

Выбор отметки в строке для сопровождения. При ручном стробировании в качестве отметки для сопровождения принимается ближайшая к центру строга отметка. При сопровождении для выбора отметки используется *модель отметки* [15] (параметры модели, посредством которых эта модель представляется) и расстояние от центра строга до центра отметки, что является одним из элементов, участвующих в процедуре выбора.

Для хранения данных по сопровождаемым целям в начале работы формируется массив данных. Каждая строка в качестве одного из элементов содержит *признак активности*. Если условно признак активности равен единице, то данная цель сопровождается, если он равен нулю, — нет. Если в результате обработки строга обнаружена отметка, то из массива данных под цель выбирается первая свободная строка (признак активности «0»), и в соответствующие элементы строки записываются полученные в результате обработки данные. Записываются пеленг и дистанция до центра отметки, а также параметры модели отметки. Общее число строк массива для хранения данных будет определять максимально возможное число сопровождаемых целей. Для судовых радиолокационных систем такой массив может содержать 70 – 100 строк. Для береговых радиолокационных систем, входящих в системы управления движением судов (СУДС), такая таблица может

содержать 500 – 800 строк, так как дополнительно предусматриваются возможности контроля положения судов на якорных стоянках, а также плавучих СНО. В общем, при определении размеров таблицы руководствуются требованиями резолюций МЭК, предъявляемых к САРП, техническими условиями задания на разработку соответствующего оборудования, а также вычислительными ресурсами, отводимыми для решения данной задачи.

При использовании варианта автозахвата цели в установленной зоне просмотра зоны и вычисление параметров отметок осуществляется на каждом обзоре. Затем каждая из обнаруженных целей на основе рассчитанных данных сравнивается со всеми активными целями таблицы. Если не обнаружено подобия отметки (по применяемым критериям) с отметками сопровождаемых целей (определёнными допусками по критериям), то открывается первая свободная строка массива данных, куда записывается информация по отметке и ставится признак сопровождаемой цели («1»). Если в массиве данных найдена строка с подобными данными, то считается, что отметка принадлежит сопровождаемой цели, и данные этой строки обновляются по полученным значениям.

Значения критериев, по которым отметка может быть отнесена к отметкам уже сопровождаемых целей, не являются универсальными для всех условий плавания, поэтому могут возникать ошибки в решении. Так, для береговых радиолокационных систем одним из критериев принадлежности отметки к сопровождаемой цели является расстояние между центром сопровождаемой цели (центр строки сопровождаемой цели) и центром отметки на данном обзоре. Если расстояние между центрами на данном обзоре меньше определённой заданной величины, то считается, что отметка принадлежит сопровождаемой цели. В этом случае обновляются данные соответствующей строки таблицы целей. Если расстояние больше заданной величины, то считается, что отметка принадлежит новой цели и формируется новая строка. Если иметь в виду, что расстояние между сопровождаемыми целями принципиально может быть небольшим, то и значение критерия принимается также небольшим. Такое решение приводит к тому, что при нарушении критерия (превышение установленных значений) данная отметка будет рассматриваться как отметка от новой цели и активизируется новая строка в таблице целей. Таким образом, два формуляра будут принадлежать одной и той же цели. Улучшение ситуации здесь возможно по двум направлениям:

1. Увеличение числового значения критерия принадлежности (в этом случае будет блокироваться процедура стробирования целей, находящаяся близко друг к другу).
2. Использование параметров модели отметки в дополнение к ранее описанному, однако здесь следует иметь в виду, что при малой статистике (начало обработки) в расчётах принимаются крайне приближённые оценки, что тоже может привести к повторному стробированию одной и той же цели.

Сопровождение цели. Результатами решения задачи являются следующие:

- 1) расчёт координат цели;
- 2) расчёт курса и скорости цели;
- 3) оценка ситуации маневрирования сопровождаемой цели;
- 4) оценка параметров отметки;
- 5) оценка времени и дистанции кратчайшего сближения с другим сопровождаемым или другими сопровождаемыми объектами (в этом случае принимается гипотеза равномерного прямолинейного движения целей).

Изменения пеленгов и расстояний на сопровождаемые цели являются нестационарными случайными функциями, поэтому основными методами решения служит динамический метод наименьших квадратов, метод фильтрации Калмана [16], [17], а также иные методы [18]. Результатом решения являются: расчёт координат в локальной прямоугольной системе *центр – собственное судно*, составляющие вектора скорости в этой же системе координат, а также траектория движения [19]. С учетом того, что при четырёх искомым величинах необходимо иметь как минимум столько же измеренных параметров, можно сделать вывод о том, что процедура расчёта начинается со второго обзора или более (в случае пропуска). Учитывая, что время оборота антенны,

а следовательно, период обновления информации составляют порядка трех секунд, каждая строка цифровых данных на выходе радар-процессора или, по крайней мере, сразу при передаче данных в оперативную память должна иметь метку времени. Это имеет значение в следующих случаях:

- при пропуске отметок на каком-либо обзоре;
- при сопровождении цели на малых дистанциях, когда пеленг на цель быстро меняется;
- в случае возможных ошибок синхронизации процессов.

Использование вышеуказанных методов оценки искомых величин предусматривает одновременную оценку погрешностей. Эти же методы могут использоваться при оценке параметров отметки. Следует иметь в виду, что при стабильной радиолокационной отметке цели погрешности оцениваемых параметров радиолокационных отметок стремятся к нулю, что нарушает условия применения методов нестационарной фильтрации и требует модификации в применении.

Данные по сопровождаемым целям могут ретранслироваться на другие устройства с использованием протокола NMEA-0183.

Сброс сопровождения. Укажем основные причины сброса сопровождения.

1. *Преднамеренный сброс, когда информация о сопровождаемом объекте не представляет интереса для оценки ситуации* (суда уже разошлись). Процедура существуют несколько вариантов ручного сброса сопровождения, но все они фактически сводятся к выбору соответствующей строки в таблице целей и установки признака «0», после чего строка не будет обрабатываться, и данные не будут отображаться в формуляре.

2. *Большое число пропусков в представлении отметки от цели при сопровождении.* Это может иметь место при слабом сигнале, отражённом от цели при больших расстояниях до наблюдаемого объекта, а также при значительной качке. При нерегулярном поступлении информации вычисляемые данные по цели будут иметь большие погрешности, что может привести к ошибочному прогнозу развития ситуации. Обычно автоматический сброс осуществляется при наличии 50 % пропусков в представлении отметки от цели или при шести последовательных пропусках. Все этапы описанной процедуры сопровождения цели представлены на рис. 2.



Рис. 2. Последовательность решаемых задач при сопровождении целей

Результаты (Results)

Задача выбора отметки в стробе решается на каждом из этапов работы средств автоматической радиолокационной прокладки: формировании размеров строба, выделении отметок на фоне помех, взятии цели на сопровождение, сопровождение, сбросе сопровождения. При решении необходимо учитывать следующие особенности:

1. Широкий диапазон условий наблюдения.

2. Особенности радиолокационной аппаратуры и, как следствие, разнотипная радиолокационная картинка.

3. Динамические характеристики встречных судов, изменяющиеся в широком диапазоне.

Алгоритм решения является адаптивным, когда по условиям наблюдения осуществляется подстройка коэффициентов или подключение соответствующих методов.

При формировании размеров строба учитываются:

- установленный масштаб отображения;
- скорость собственного судна;
- ожидаемая скорость встречного судна;
- ошибки ручного наведения маркера на отметку цели;
- задержки времени в цифровой обработке радиолокационной информации;
- задержки времени в отображении радиолокационной информации;
- возможные пропуски в представлении радиолокационной картинки (по условиям наблюдения);
- время формирования короткой выборки (три – пять обзоров) для устойчивого обнаружения отметки в стробе;

– динамические характеристики собственного судна;

– динамические характеристики встречных судов (приближённо);

– возможные навигационные ограничения.

Математическая модель отметки имеет несколько параметров, которые характеризуют отметку и используются в процедуре выбора:

- длина отметки (полярная координата по направлению);
- ширина отметки (полярная координата по дистанции);
- суммарный уровень сигнала заполнения отметки;
- второй центральный момент инерции отметки по одной полярной координате;
- второй центральный момент инерции отметки по второй полярной координате;
- линейное отстояние центра отметки от центра строба.

Центральные моменты инерции дают хороший результат в выявлении ситуации слияния отметок. Это имеет место при сопровождении целей в узкостях, когда суда расходятся на малых расстояниях ввиду имеющихся навигационных ограничений. Выявление такой ситуации позволяет перейти на другую ветвь решения. Последний из приведённых параметров имеет большое значение в процедуре выбора при приемлемых условиях наблюдения и отсутствии сильных маневров судов (собственное и сопровождаемое). «Вес» этого критерия должен быть значительно уменьшен, вплоть до полного исключения из процедуры, когда одно из судов или оба совершают интенсивный маневр. Принимая во внимание, что процессы измерения параметров отметки являются случайными и нестационарными, для вычисления использовался одномерный фильтр Калмана, на выходе которого получали оценку соответствующего параметра и его погрешность. Эти данные использовались в ходе процедуры выработки обобщённого критерия принадлежности отметки сопровождаемой цели. При формировании критерия использовался аппарат нечёткой логики. Встречались ситуации, когда при хороших условиях наблюдения погрешности параметров отметки становились малыми (очень малыми), что приводило к чрезмерному увеличению «веса» параметра и нарушению процедуры фильтрации. Для исключения такой ситуации использовалась регуляризация путём искусственного введения дополнительных случайных ошибок наблюдения.

Формирование критерия решения каждой из подзадач приводит к поиску лучшего единственного решения. Реализация каждого из этапов (см. рис. 2) требует определённых вычислительных ресурсов и реализуется на плате радар-процессора, основном процессоре (процессорах) компьютера и графической плате компьютера. Некоторые вырабатываемые данные являются внутренними и используются исключительно в рамках решаемых задач. Некоторые данные передаются другим устройствам. При этом используется протокол NMEA 2000 для передачи по последовательным каналам связи (например, курса, скорости цели), а также используется свободный формат для передачи цифрового радиолокационного облика.

Выводы (Summary)

1. В статье на основе комплексного подхода структурирована задача выбора отметки цели в стробе.

2. Описаны проблемы, возникающие при решении каждого из этапов и показана их взаимосвязь. Решение задачи расхождения судов обусловлено качественным решением каждого из этапов на основе формализованных критериев качества.

3. Устойчивый выбор отметки в стробе при сопровождении в условиях помех позволяет формировать значительные по длине выборки измеренных значений пеленгов и расстояний по сопровождаемой цели, а следовательно, получить более точные значения координат цели и вектора скорости.

4. Корректный выбор отметки позволяет уменьшить число случаев переброса отметок (swapping), а эффективное решение задачи стробирования и сопровождения цели является основой комплексного подхода с использованием разнородной информации и различных методов её обработки, в том числе распознавания сцен, искусственного интеллекта и нейронных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков И. Е. Варианты расширения функциональных возможностей навигационных радиолокационных станций / И. Е. Ушаков // Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее: сб. ст. Международной науч.-практ. конф.: в 5 ч. — Уфа: ООО «Аэтерна», 2016. — С. 89–91.
2. Ничипоренко Н. Т. Обнаружение разливов нефтепродуктов с использованием навигационной РЛС / Н. Т. Ничипоренко, И. Е. Маренич, А. В. Петров [и др.] // Судостроение. — 2010. — № 2. — С. 39–41.
3. Васильев К. К. Связанные стохастические модели движения радиолокационных целей / К. К. Васильев, А. В. Маттис // Автоматизация процессов управления. — 2017. — № 4 (50). — С. 14–18.
4. Berry P. Adaptive detection of low-observable targets in correlated sea clutter using Bayesian track-before-detect / P. Berry, K. Venkataraman, L. Rosenberg // Radar Conference (RadarConf), 2017 IEEE. — IEEE, 2017. — Pp. 0398–0403. DOI: 10.1109/RADAR.2017.7944235.
5. Greco M. S. Introduction to the Issue on Advanced Signal Processing Techniques for Radar Applications / M. S. Greco, Yu. Abramovich, J.-F. Ovarlez, H. Li, X. Yang // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. — 2015. — Vol. 9. — Is. 8. — Pp. 1363–1365. DOI: 10.1109/JSTSP.2015.2497458.
6. Duk V. Target Detection in Sea-Clutter Using Stationary Wavelet Transforms / V. Duk, L. Rosenberg, B. W. H. Ng // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2017. — Vol. 53. — Is. 3. — Pp. 1136–1146. DOI: 10.1109/TAES.2017.2667558.
7. Жерлаков А. В. Радиолокационные системы предупреждения столкновений судов / А. В. Жерлаков, Н. С. Зимин, О. В. Кононов. — Л.: Судостроение, 1984. — 200 с.
8. Резолюция МЭК 60872. — 1999.
9. Резолюция МЭК 60936-1. — 2002.
10. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. — Изд-во КВИЦ, 2000. — 428 с.
11. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / А. Фарина, Ф. Студер. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
12. Резолюция IMO NAV 49/9. — 2003.

13. Вагущенко Л. Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2010. — 229 с.
14. Kouemou G. Radar Technology / G. Kouemou. — Croatia: INTECH, 2009.
15. Tong L. Radar target detection based on methods of image pattern matching / L. Tong, F. Heymann, T. Noack // *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie*. — 2013. — № 36 (108). — Z. 1. — Pp. 162–167.
16. Хомяков А. В. Алгоритмы совместной траекторной обработки в многопозиционном радиолокационном комплексе / А. В. Хомяков, В. И. Филипченко, Ю. И. Мамон // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. — 2016. — № 2. — С. 305–314.
17. Бутырский Е. Ю. Математические модели движения целей в виде уравнений состояния / Е. Ю. Бутырский // *Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире*. — 2017. — № 17-1. — С. 61–73.
18. Барабанов А. Е. Нелинейная фильтрация методом подбора сценариев для радарного слежения и динамического позиционирования судов / А. Е. Барабанов, Д. В. Ромаев, А. Н. Мирошников // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. — М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. — С. 3624–3633.
19. Vovk V. Sequential target tracking based on local trajectory parameters estimation in Rayleigh clutter / V. Vovk, I. Prokopenko, K. Prokopenko // *Radar Symposium (IRS), 2014 15th International*. — IEEE, 2014. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/IRS.2014.6869249.
20. Афанасьев В. В. Судовые радиолокационные системы / В. В. Афанасьев, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов. — СПб.: Велиниара, 2009. — 365 с.

REFERENCES

1. Ushakov, I.E. “Varianty rasshireniya funktsional’nykh vozmozhnostei navigatsionnykh ra-diolo-katsionnykh stantsii.” *Innovatsionnaya nauka: proshloe, nastoyashchee, budushchee: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 5 chastyakh*. Ufa: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost’yu “Aeterna”, 2016. 89–91.
2. Nichiporenko, N.T., I.E. Marenich, A.V. Petrov, I. Misyuchenko, B.S. Trofimov, and I.E. Ushakov. “Oil spill detection using navigational radar station.” *Sudostroenie* 2 (2010): 39–41.
3. Vasil’ev, K.K., and A.V. Mattis. “Svyazannye stokhasticheskie modeli dvizheniya radiolokatsionnykh tselei.” *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* 4(50) (2017): 14–18.
4. Berry, Paul, Krishna Venkataraman, and Luke Rosenberg. “Adaptive detection of low-observable targets in correlated sea clutter using Bayesian track-before-detect.” *Radar Conference (RadarConf), 2017 IEEE*. IEEE, 2017. 0398–0403. DOI: 10.1109/RADAR.2017.7944235.
5. Greco, Maria S., Yuri Abramovich, Jean-Filippe Ovarlez, Hongbin Li, and Xiaopeng Yang. “Introduction to the issue on advanced signal processing techniques for radar applications.” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing* 9.8 (2015): 1363–1365. DOI: 10.1109/JSTSP.2015.2497458.
6. Duk, Vichet, Luke Rosenberg, and Brian Wai-Him Ng. “Target Detection in Sea-Clutter Using Stationary Wavelet Transforms.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 53.3 (2017): 1136–1146. DOI: 10.1109/TAES.2017.2667558.
7. Zherlakov, A.V., N.S. Zimin, and O.V. Kononov. *Radiolokatsionnye sistemy preduprezhdeniya stolknovenii sudov*. L.: «Sudostroenie», 1984.
8. Rezolyutsiya MEK 60872. 1999.
9. Rezolyutsiya MEK 60936-1. 2002.
10. Kuz’min, S.Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu*. Izdatel’stvo KVIITs, 2000.
11. Farina, A., and F. Studer. *Tsifrovaya obrabotka radiolokatsionnoi informatsii. Sorovozhdenie tselei*. M.: Radio i svyaz’, 1993.
12. Rezolyutsiya IMO NAV 49/9. 2003.
13. Vagushchenko, L.L., and A.L. Vagushchenko. *Podderzhka reshenii po raskhozhdeniyu s sudami*. Odessa: Feniks, 2010.
14. Kouemou, G. *Radar Technology*. Croatia: INTECH, 2009.
15. Tong, Ling, Frank Heymann, and Thoralf Noack. “Radar target detection based on methods of image pattern matching.” *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie* 36(108).1 (2013): 162–167.

16. Khomyakov, Alexandr Viktorovich, Viktor Ivanovich Filipchenkov, and Uriy Ivanovich Mamon. "Algorithms joint trajectory processing in multiposition radar complex." *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* 2 (2016): 305–314.

17. Butyrskiy, E.Yu. "Mathematical model of motion of targets in the form of equation of state." *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v sovremennoy mire* 17-1 (2017): 61–73.

18. Barabanov, A.E., D.V. Romaev, and A.N. Miroshnikov. "Nelineinaya fil'tratsiya metodom podbora stsenariyev dlya radarnogo slezheniya i dinamicheskogo pozitsionirovaniya sudov." *XII vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014*. M.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2014. 3624–3633.

19. Vovk, Vitalii, Igor Prokopenko, and Kostiantyn Prokopenko. "Sequential target tracking based on local trajectory parameters estimation in Rayleigh clutter." *Radar Symposium (IRS), 2014 15th International*. IEEE, 2014. 1–5. DOI: 10.1109/IRS.2014.6869249.

20. Afanas'ev, V.V., A.N. Marinich, A.V. Pripotnyuk, and Yu.M. Ustinov. *Sudovye radilokatsionnye sistemy*. SPb.: Veliniara, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Афанасьев Борис 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: Boris.Afanasiev@rambler.ru,
kaf_nav@gumrf.ru

Афанасьев Виктор 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: afaviktor@yandex.ru, kaf_nav@gumrf.ru

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

Afanasev, 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: afaviktor@yandex.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2018 г.
Received: April 26, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-619-628

THE RESULTS OF STUDIES OF THE MODES OF OPERATION ASYNCHRONOUS MOTORS AT LOWER VOLTAGES TO DETERMINE OPPORTUNITIES TO INCREASE THEIR ENERGY INDICATORS

A. F. Burkov¹, V. N. Yurin², V. R. Avetisyan³

¹ — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² — Maritime state University named after adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

³ — Pacific higher naval school named after S.O. Makarov, Vladivostok, Russian Federation

Energy performance asynchronous motors (AD), power factor and efficiency, significantly depend on the parameters of the supply voltage (magnitude, frequency) and mode of operation (load factor). To improve the efficiency of operation, various methods of reducing reactive power are used. It is possible to distinguish artificial methods based on the use of additional devices, and the possibility of reducing reactive power in a natural way. The research is aimed at identifying the dependence of the energy parameters of the AD in the function of the stator voltage. A characteristic operational feature of three-phase AD is relatively large values of idling currents I_0 (up to 40% of I_n), which are more reactive and largely determine the power coefficients. Thus, reactive power consumed from the network is less dependent on loads. When the phase voltage changes, the reactive power changes in the quadratic dependence. In addition, the change in voltage leads to a change in the inductive resistance, depending on the saturation of the magnetic system of AD. In determining the feasibility of changing (reducing) the phase voltage to the AD, investigated the dependence of the additional reactive power dQ , which is the greater, the less loaded AD, and the loss of active power in the AD, determining their heating, in the function U_r .

The performed studies reveal the possibility of natural increase of the co-efficiency of AD power when working with the load factor $K_z < 1$. In the case of the implementation of these opportunities, the weighted average power factor of the $\cos \varphi_p$ of production enterprises as a whole may not be less than 0.9. The results of the research allow us to conclude about the feasibility of using low voltage U_s for three-phase motors operating in areas of low loads.

Keywords: power factor, efficiency, reactive power, electric energy, electric motor, electric drive, energy performance.

For citation:

Burkov, Aleksey F., Valeriy N. Yurin, and Vagarshak R. Avetisyan. "The results of studies of the modes of operation asynchronous motors at lower voltages to determine opportunities to increase their energy indicators." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 619–628. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-619-6.

УДК 621.313.33

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

А. Ф. Бурков¹, В. Н. Юрин², В. Р. Аветисян³

¹ — Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Российская Федерация

² — Морской государственный университет имени адм. Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

³ — Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С. О. Макарова, Владивосток, Российская Федерация

Энергетические показатели асинхронных двигателей (АД), коэффициент мощности и коэффициент полезного действия, существенно зависят от параметров питающего напряжения (величина, частота)

и режима работы (коэффициент загрузки). Для повышения эффективности эксплуатации применяются различные способы снижения реактивной мощности. Можно выделить искусственные способы, основанные на применении дополнительных устройств, и возможность уменьшения реактивной мощности естественным путем. Выполненные исследования направлены на выявление зависимостей энергетических показателей АД в функции напряжения статора. Характерной эксплуатационной особенностью трехфазных АД являются относительно большие значения токов холостого хода I_0 (до 40 % от I_n), которые в большей степени являются реактивными и в значительной степени определяют коэффициенты мощности. Таким образом, реактивная мощность, потребляемая из сети, в меньшей степени зависит от нагрузки. При изменении фазного напряжения реактивная мощность изменяется в квадратичной зависимости. Кроме того, изменение напряжения приводит к изменению индуктивного сопротивления, зависящего от насыщения магнитной системы АД. При определении целесообразности изменения (снижения) фазного напряжения, подводимого к АД, исследованы зависимости изменения дополнительной реактивной мощности ΔQ , которая тем значительнее, чем меньше нагружен АД, и потерь активной мощности в АД, определяющих их нагрев, в функции U_{ϕ} .

Выполненные исследования раскрывают возможности естественного повышения коэффициента мощности АД при их работе с коэффициентом загрузки $k_z < 1$. В случае реализации этих возможностей средневзвешенный коэффициент мощности $\cos \varphi_{cp}$ производственных предприятий в целом может иметь значения не ниже 0,9. Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о целесообразности использования пониженного напряжения U_s для трехфазных двигателей, работающих в областях малых нагрузок.

Ключевые слова: коэффициент мощности, коэффициент полезного действия, реактивная мощность, электрическая энергия, электродвигатель, электропривод, энергетические показатели.

Для цитирования:

Бурков А. Ф. Исследование асинхронных двигателей с целью определения возможностей повышения их энергетических показателей / А. Ф. Бурков, В. Н. Юрин, В. Р. Аветисян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 619–628. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-619-6.

Введение (Introduction)

Использование электромеханических преобразователей, в частности электродвигательных устройств, в настоящее время трудно переоценить. Электродвигатели (ЭД) являются основными составными частями электроприводов (ЭП) [1], [2] различных механизмов и потребляют значительную часть вырабатываемой электрической энергии (ЭЭ) [3]. Отмечается расширение областей использования ЭД в различных отраслях жизнедеятельности человека [4]. К основным типам широко используемых ЭД относятся асинхронные двигатели (АД) [5]. По данным, приведенным в [6], АД потребляют более 50 % всей производимой в мире ЭЭ. В отдельных отраслях промышленности потребление ЭЭ асинхронными ЭД составляет более 80 %. В частности, на флоте ЭД судовых ЭП потребляют ориентировочно до 90 % ЭЭ, вырабатываемой преимущественно судовыми источниками — генераторами [7].

Основные затраты, обусловленные преобразованием ЭЭ в механическую энергию, оцениваются посредством энергетических показателей. Для АД к ним относятся коэффициент полезного действия (η) и коэффициент мощности ($\cos \varphi$). Известно, что энергетические показатели АД в процессе эксплуатации зависят от величины и качества напряжения питающей сети (статора) U_s , частоты сети f_c и коэффициента загрузки k_z , определяемого моментом сопротивления на валу ЭД M_c [8] – [10]. Изменение напряжения и частоты питающей сети используется, в первую очередь, для получения необходимых искусственных характеристик ЭД. Момент сопротивления на валу ЭД в составе ЭП определяется механической характеристикой производственного механизма [11].

Рост потребления энергоресурсов и увеличение стоимости энергии на современном этапе ставят задачу повышения энергосбережения. Эффективное использование энергетических ресурсов, включая электрическую энергию, относится к приоритетным аспектам развития современной мировой и отечественной экономики. Научно-технические вопросы компенсации реактивной мощности активно рассматриваются с 70-х гг. XX в. и широко представлены в литературе [12],

[13] и др. Внедрение источников (компенсаторов) реактивной мощности для снижения потоков реактивной мощности получило распространение преимущественно в береговых энергоустановках. Компенсации реактивной мощности в автономных электроэнергетических системах, к которым относятся и судовые системы, посвящены работы [14], [15] и др. Искусственная компенсация требует значительных затрат, связанных с приобретением, монтажом и эксплуатацией дополнительного оборудования. Наряду с искусственными, отдельный интерес представляют мероприятия, направленные на снижение реактивной мощности естественным путем [16].

Основной задачей выполненных исследований является определение целесообразности использования напряжений, отличных от номинальных, с целью естественного повышения энергетических показателей АД.

Методика и материалы (Methods and Materials)

Выполненные исследования направлены на выявление зависимостей энергетических показателей АД в функции напряжения статора. В качестве объекта исследований принят имеющийся в наличии трехфазный АД типа АО2-41-4 с паспортными данными: номинальное напряжение $U_n = 380/220$ В; номинальная мощность на валу $P_{2н} = 4,0$ кВт; номинальный ток $I_n = 8,3/14,4$ А; номинальная частота вращения вала $n_n = 1410$ об/мин; номинальный коэффициент полезного действия (КПД) $\eta_n = 0,86$; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,85$ (φ_n — номинальный угол сдвига между активной и полной мощностью). Характерной эксплуатационной особенностью трехфазных АД являются относительно большие значения токов холостого хода I_0 (до 40 % от I_n), обусловленные наличием воздушных зазоров между статорами и вращающимися роторами. Токи холостого хода АД в большей степени являются реактивными и в значительной степени определяют коэффициенты мощности $\cos \varphi$ АД. Таким образом, реактивная мощность, потребляемая АД из сети, в меньшей степени зависит от нагрузок на их валах. У многих АД реактивная мощность, потребляемая ими на холостом ходу, составляет (60 ... 80) % от реактивной мощности, потребляемой ЭД при номинальной нагрузке.

Зависимость реактивной мощности Q АД от нагрузки (момента сопротивления) на валу может быть выражена уравнением [17]:

$$Q = \frac{P_{2н}}{\eta_n} \left(\frac{I_0}{I_n \cos \varphi_n} + k_3 \left(\operatorname{tg} \varphi_n - \frac{I_0}{I_n \cos \varphi_n} \right) \right) \quad (1)$$

или по формуле [18]:

$$Q = Q_0 + k_3^2 (Q_n - Q_0), \quad (2)$$

где Q_0 — реактивная мощность на холостом ходу; Q_n — номинальная реактивная мощность.

Коэффициент загрузки k_3 ЭД в (1) и (2), определяется известным соотношением

$$k_3 = \frac{P_2}{P_{2н}} Q. \quad (3)$$

С учетом выражений (1), (3) выполнены расчеты зависимости $Q = f(k_3)$ для исследуемого двигателя серии АО. Наиболее существенное уменьшение реактивной мощности Q у АД наблюдается при снижении нагрузки от номинальной ($P_2 = P_{2н}; k_3 = 1,0$) до 40 % ($P_2 = 0,4P_{2н}; k_3 = 0,4$) и составляет около 26 %. Дальнейший анализ зависимости $Q = f(k_3)$ показывает, что при снижении нагрузки от 40 % ($P_2 = 0,4P_{2н}; k_3 = 0,4$) до 0 ($P_2 = 0; k_3 = 0$) реактивная мощность АД Q снижается примерно на 7 %.

Реактивная мощность Q АД связана с напряжением сети (питания) зависимостью

$$Q = 3 \left(\frac{U_{\phi}^2}{X_{\mu}} + \left(I_s^2 X_s + (I_r')^2 X_r' \right) \right), \quad (4)$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение ЭД; X_{μ} — индуктивное сопротивление контура намагничивания АД; X_s, X_r' — индуктивные сопротивления фазы обмотки статора и фазы обмотки ротора, приведен-

ные к статорной цепи, соответственно; I_s, I'_r — ток статора и ток ротора, приведенный к статорной цепи ЭД.

Составляющая $3U_\phi^2/X_\mu$ в (4) представляет собой реактивную мощность АД на холостом ходу Q_0 , а $3(I_s^2 X_s + (I'_r)^2 X'_r)$ — изменение реактивной мощности при изменении нагрузки (момента M_c) на валу ЭД.

Таким образом, согласно зависимости (4), при изменении фазного напряжения АД его реактивная мощность изменяется в квадратичной зависимости. Кроме того, изменение напряжения приводит к изменению индуктивного сопротивления, зависящего от насыщения магнитной системы ЭД.

В общем случае, изменение реактивной мощности Q АД от изменения напряжения U_ϕ может быть представлено приращением $|dQ|$ к номинальной реактивной мощности Q_n , соответствующей номинальному напряжению ЭД $U_{\phi,n}$:

$$Q = Q_n \pm |dQ|. \quad (5)$$

На рис. 1 приведены зависимости $dQ = f(U_\phi)$ при $M_c = \text{const}$ ($k_{31} = 0,5$ и $k_{32} = 1,0$) для ЭД номинальной мощностью $P_{2н} = 7,0$ кВт ($I_n = 14,6$ А; $I_0 = 5,0$ А; $\cos\varphi_n = 0,85$). Представленные на рис. 1 зависимости $dQ = f(U_\phi)$ наглядно характеризуют влияние изменения напряжения на величину дополнительной реактивной мощности, которое тем значительнее, чем меньше нагружен АД. Например, для приведенного ЭД номинальной мощностью 7,0 кВт при $U_\phi = U_{\phi,n}$ его реактивная мощность $Q_n = 5,0$ кВАр для $k_{32} = 1,0$ и $Q_n = 3,3$ кВАр для $k_{31} = 0,5$. При уменьшении напряжения U_ϕ на 10 % относительно номинального $U_{\phi,n}$ реактивная мощность Q АД уменьшается на 14,0 % (0,7 кВАр) при $k_{32} = 1,0$, и на 59,0 % (примерно 2,0 кВАр) при $k_{31} = 0,5$.

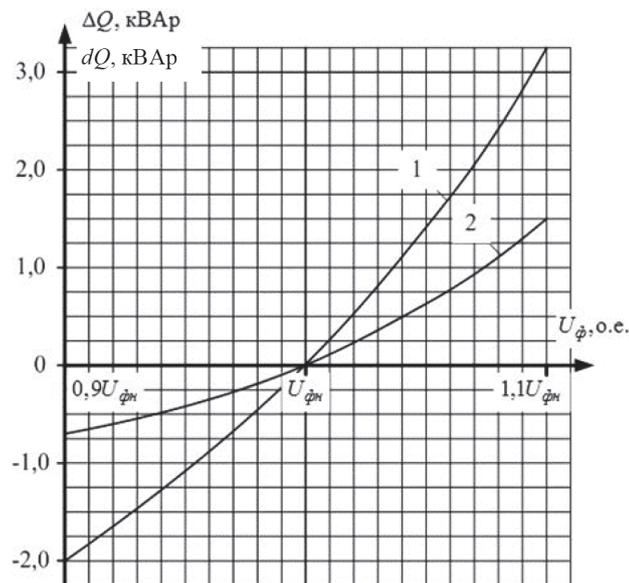


Рис. 1. Зависимости $dQ = f(U_\phi)$ АД при $M_c = \text{const}$ (1 — $k_{31} = 0,5$; 2 — $k_{32} = 1,0$)

При определении целесообразности изменения (снижения) фазного напряжения, подводимого к АД, необходимо исследование зависимостей изменения потерь активной мощности в АД, определяющих их нагрев, в функции фазного напряжения. На рис. 2 приведены ориентировочные зависимости средних значений потерь от фазного напряжения для коэффициентов загрузки 0,5 и 1.

Зависимости, представленные на рис. 2, справедливы для АД диапазона мощностей (1 ... 100) кВт. Их анализ показывает, что при коэффициентах загрузки менее 0,5 понижение фазного напряжения приводит к уменьшению среднего значения потерь.

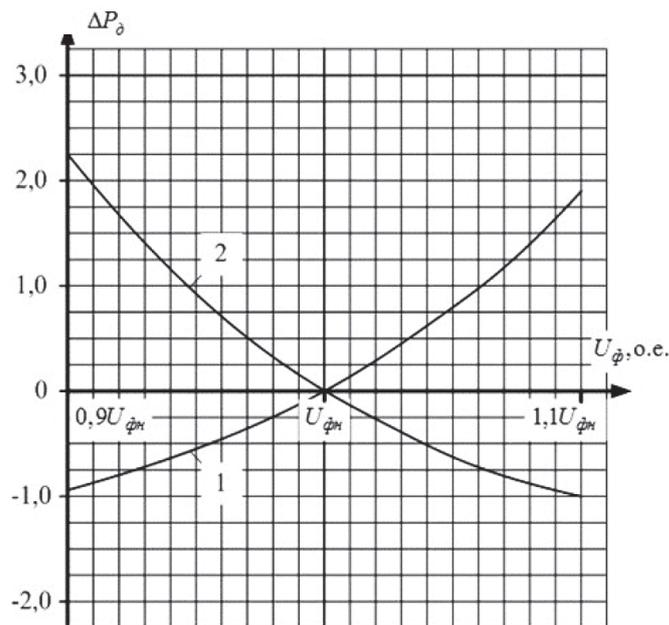


Рис. 2. Зависимость $dP_d = f(U_\phi)$ АД при $M_c = \text{const}$ (1 — $k_{31} = 0,5$; 2 — $k_{32} = 1,0$)

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Исходя из постановки задачи, выполнены исследования, направленные на определение возможностей повышения энергетических показателей АД при изменении питающего напряжения. С целью определения наилучших значений энергетических показателей исследуемого ЭД при изменении нагрузки на его валу определены зависимости:

$$U_s = f(P_2); \cos \varphi = f(P_2); \eta = f(P_2), \quad (6)$$

представленные на рис. 3.

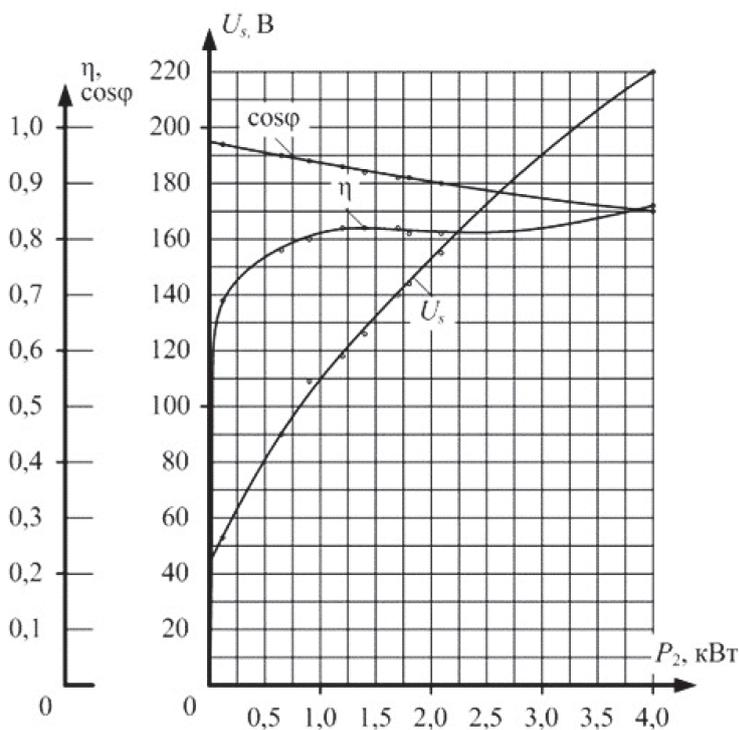


Рис. 3. Графики зависимостей $U_s = f(P_2)$, $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$

Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о том, что при регулировании питающего напряжения АД в зависимости от нагрузки наименьшее значение коэффициента мощности соответствует его номинальному значению при номинальной мощности ЭД при $U_s = U_n = 220$ В ($\cos \varphi_{\min} = \cos \varphi_n = 0,85$; $P_2 = P_{2н} = 4,0$ кВт). Наибольшее фиксированное значение коэффициента мощности отмечено при мощности P_2 , равной 0,12 кВт, и $U_s = 53$ В ($\cos \varphi_{\max} = 0,97$).

Выполненные исследования раскрывают возможности естественного повышения коэффициента мощности АД при их работе с коэффициентом загрузки менее 1. В случае реализации этих возможностей средневзвешенный коэффициент мощности производственных предприятий в целом может иметь значения не ниже 0,9. При изменении питающего напряжения для $M_c = \text{var}$ с целью выполнения условия $\cos \varphi = \max$ другой энергетический показатель АД — коэффициент полезного действия — изменяется по зависимости, представленной на рис. 3. В частности, при увеличении нагрузки до значений P_2 , близких к 1,2 кВт (около $0,3P_{2н}$), отмечена тенденция возрастания КПД до 0,82. При дальнейшем увеличении нагрузки значения КПД ЭД остаются практически неизменными с последующим возрастанием (при $P_2 = P_{2н} = 4,0$ кВт $\eta = \eta_n = 0,86$) — см. рис. 3.

В общем случае техническая реализация изменения напряжения, подводимого к обмоткам статоров АД, в функции изменения нагрузки представляет определенные затруднения, и очевидно, предпочтительна для ЭП, включающих АД относительно большой мощности. Многие ЭП, работающие в широких диапазонах изменения нагрузок (станки, подъемники и т. д.), включают ЭД сравнительно небольших мощностей. Для этих случаев целесообразно исследование изменений напряжения АД при переключении обмоток статора АД с «треугольника» на «звезду».

На основании проведенного анализа приняты следующие напряжения U_s для исследуемого АД: при соединении обмоток статора в «треугольник» — 150 В, 135 В, 127 В и 100 В; для схемы соединения обмоток в «звезду» — 220 В, 210 В, 200 В и 190 В.

По результатам выполненных исследований на рис. 4 и 5 представлены графики зависимостей $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$ ЭД типа АО2-41-4, построенные для различных значений напряжения при схеме соединения обмоток статора АД в «треугольник».

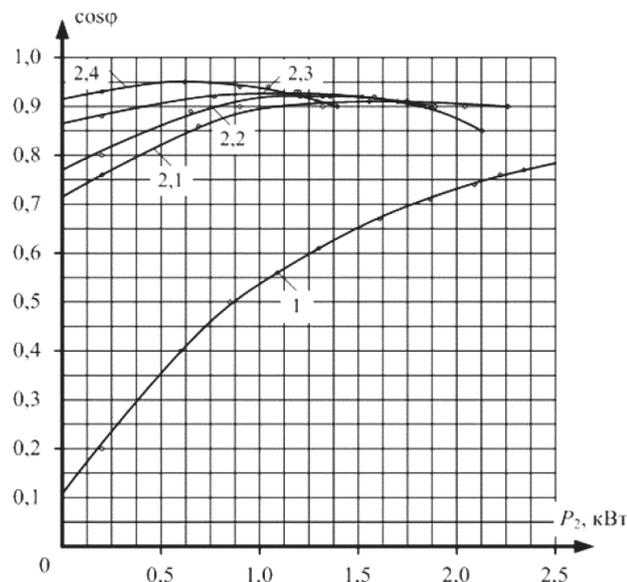


Рис. 4. Графики $\cos \varphi = f(P_2)$ для различных значений U_s и схемы обмоток статора АД «треугольник»

Зависимости I на рис. 4 и 5 соответствуют номинальному значению напряжения статора АД ($U_s = U_n = 220$ В), зависимости 2,1 — напряжению $U_s = 150$ В; 2,2 — 135 В; 2,3 — 127 В и 2,4 — 100 В.

На рис. 6 и 7 приведены зависимости $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$ АД, построенные для различных значений напряжения по схеме «звезда».

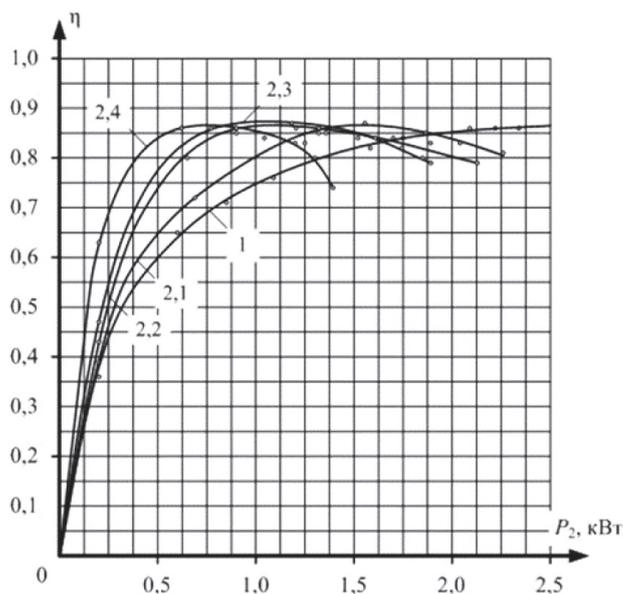


Рис. 5. Графики $\eta = f(P_2)$, для различных значений U_s и схемы обмоток статора АД «треугольник»

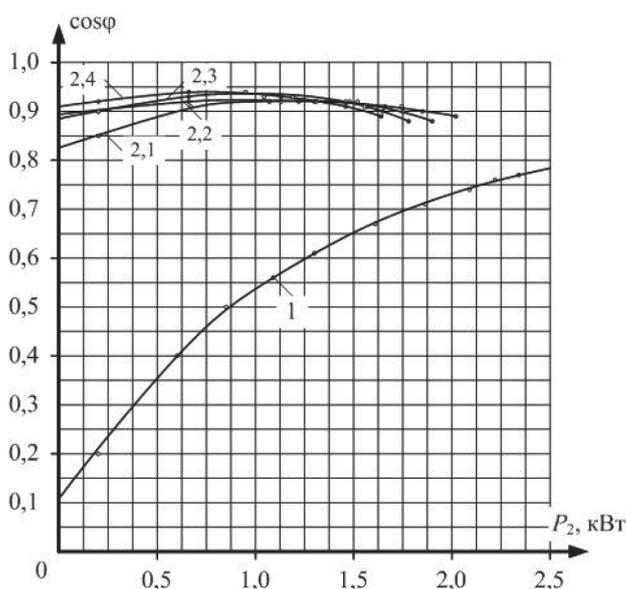


Рис. 6. Графики $\cos \varphi = f(P_2)$ для различных значений U_s и схемы обмоток статора АД «звезда»

Зависимости I на рис. 6 и 7 соответствуют номинальному напряжению ($U_s = 380$ В). Пониженные значения принимались исходя из условия

$$U_{сф} = \frac{U_{сл}}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

справедливого при соединении обмоток статора, исследуемого АД по схеме «звезда», где $U_{сф}$, $U_{сл}$ — фазные и линейные напряжения обмоток статора АД соответственно.

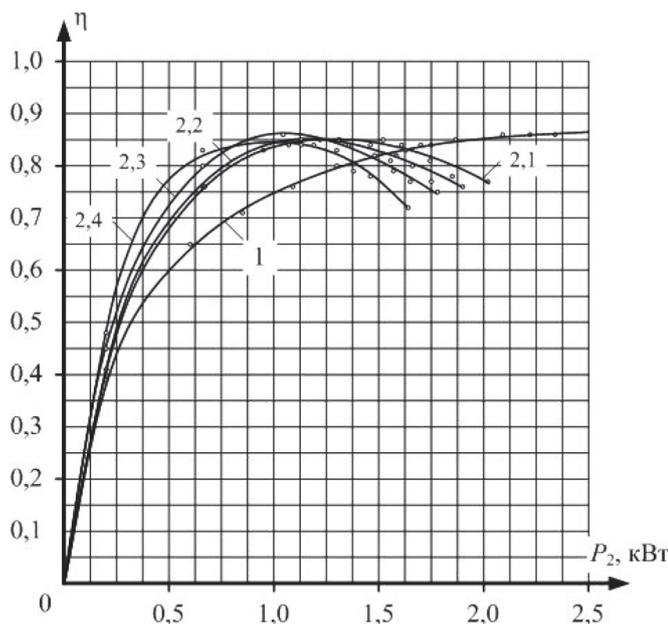


Рис. 7. Графики $\eta = f(P_2)$, для различных значений U_s и схемы обмоток статора АД «звезда»

Заключение (Conclusion)

К общим тенденциям изменений энергетических показателей при изменении (снижении) напряжений U_s , подводимых к статору трехфазного АД, относится смещение максимальных значений (экстремумов) функций $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$ в области меньших нагрузок. Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о целесообразности использования пониженного напряжения для трехфазных АД, работающих в области малых нагрузок (моментов сопротивлений на валу). В общих исследованных случаях при уменьшении напряжений и нагрузок отмечается возрастание коэффициентов мощности ($\cos \varphi$) относительно номинальных значений. Максимальные значения коэффициента полезного действия практически остаются неизменными. Необходимо отметить, что при снижении напряжения U_s происходит незначительное изменение частоты вращения ротора (вала) АД.

При обобщении результатов выполненных исследований для определения целесообразности использования пониженных напряжений для АД с другими параметрами необходим комплексный подход, включающий на основе анализа назначения ЭП, требований и рекомендаций, предъявляемых к ним, режимов работ и мощностей, определение групп или индивидуальных ЭП, для которых принципиально возможным является использование пониженных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 50369-1992. Электроприводы. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 14 с.
2. *Burkov A. F.* Main Types Electric Drives Marine Vessels of Russia / A. F. Burkov // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. — 2016. — Vol. 12. — No. 1. — Pp. 533–543.
3. *Сердешнов А. П.* Ремонт электрооборудования: в 2 ч. / А. П. Сердешнов. — 2-е изд. — Минск: ИВЦ Минфина, 2008. — Ч. 1. Ремонт электрических машин. — 293 с.
4. *Бурков А. Ф.* Теория, методы и средства улучшения качественных характеристик изоляций электрических машин / А. Ф. Бурков, Д. С. Николаев, В. Н. Юрин; под ред. А. Ф. Буркова. — Владивосток: Изд-во МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2016. — 131 с.
5. *Burkov A. F.* Reliability Study of Shipboard Electrical Equipment / A. F. Burkov // Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2016. — Vol. 11. — Is. 14. — Pp. 3024–3027.

6. Черный А. П. Применение показателей качества преобразования энергии для оценки состояния и надежности электромеханических систем / А. П. Черный, А. П. Калинов, Д. Г. Мамчур // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: матер. IV междунар. науч.-техн. конф. — Днепродзержинск, 2006. — С. 245.
7. Бурков А. Ф. Надежность судовых электроприводов / А. Ф. Бурков. — Владивосток: Изд-во ДФУ, 2014. — 204 с.
8. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 20 с.
9. Тарабин И. В. Компенсация реактивной мощности как метод повышения качества электрической энергии и сокращения потерь на примере данных «МРСК Сибири» / И. В. Тарабин, Р. Б. Скоков, И. А. Терехин, С. А. Горбачев // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 2–22. — С. 4876–4879.
10. Цицикян Г. Н. Качество электроэнергии в автономных системах / Г. Н. Цицикян. — СПб.: Изд-во Крыловского гос. науч. центра, 2014. — 102 с.
11. Бурков А. Ф. Основы теории и эксплуатации судовых электроприводов / А. Ф. Бурков. — СПб.: Лань, 2017. — 340 с.
12. Сысун В. И. Электромеханический компенсатор реактивной мощности / В. И. Сысун, А. А. Тихомиров // Международный научно-исследовательский журнал. — 2013. — № 8–1 (15). — С. 55–56.
13. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 224 с.
14. Радченко П. М. Цели, задачи и направления исследований в области компенсации реактивной мощности в СЭС / П. М. Радченко // Сб. науч. тр. НТО им. акад. А. Н. Крылова. — 1986. — № 436. — С. 6–12.
15. Арпишкин П. Н. Компенсация реактивной мощности электростанций консервного завода / П. Н. Арпишкин, В. Д. Гаврилов, П. М. Радченко // Рыбное хозяйство. — 1989. — № 6. — С. 43–46.
16. Семёнов А. С. Анализ показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от трехфазного источника питания / А. С. Семёнов, Г. А. Матул, Р. Р. Хазиев [и др.] // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 9–6. — С. 1210–1215.
17. Исследование и разработка способов естественного повышения коэффициента мощности судоремонтных заводов // Отчет о НИР ХДТ-6/81; рук. Б. В. Осокин. — Владивосток: Изд-во Дальневост. высш. инж. мор. училища, 1982. — 75 с.
18. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2 т. / под ред. А. А. Федорова. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — Т. 1. — 568 с.

REFERENCES

1. Russian Federation. State Standard GOST R 50369-1992. Electric drives. Terms and definitions. M.: Izd-vo standartov, 1993.
2. Burkov, Aleksei Fyodorovich. “Main Types Electric Drives Marine Vessels of Russia.” *Global Journal of Pure and Applied Mathematics* 12.1 (2016): 533–543.
3. Serdeshnov, A.P. *Remont elektrooborudovaniya: v 2 ch. Part 1. Remont elektricheskikh mashin*. 2nd ed. Minsk: IVTs Minfina, 2008.
4. Burkov, A.F., D.S. Nikolaev, and V.N. Yurin. *Teoriya, metody i sredstva uluchsheniya kachestvennykh kharakteristik izolyatsii elektricheskikh mashin*. Edited by A.F. Burkov. Vladivostok: Morsk. gos. un-t im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2016.
5. Burkov, Aleksei Fedorovich. “Reliability Study of Shipboard Electrical Equipment.” *Journal of Engineering and Applied Sciences* 11.14 (2016): 3024–3027.
6. Chernyi, A.P., A.P. Kalinov, and D.G. Mamchur. “Primenenie pokazatelei kachestva preobrazovaniya energii dlya otsenki sostoya-niya i nadezhnosti elektromekhanicheskikh system.” *Problemy avtomatizirovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika: mat. IV mezhdunarod. nauch.-tekhn. konf.* Dneprodzerzhinsk, 2006. 245.
7. Burkov, A.F. *Nadezhnost' sudovykh elektroprivodov*. Vladivostok: Dal'nevost. federal. un-t, 2014.
8. Russian Federation. State Standard GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. M.: Standartinform, 2014.

9. Tarabin, I.V., R.B. Skokov, I.A. Terekhin, and S.A. Gorbachev. "Compensation of jet power as method of improvement of quality of electric energy and reduction of losses on the example of data of "IDGC of Siberia"." *Fundamental research* 2-22 (2015): 4876–4879.
10. Tsitsikyan, G. N. *Kachestvo elektroenergii v avtonomnykh sistemakh*. SPb.: Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2014.
11. Burkov, A. F. *Osnovy teorii i ekspluatatsii sudovykh elektroprivodov*. SPb.: Lan', 2017.
12. Sysun, V.I., and A.A. Tikhomirov. "Electromechanical compensator of reactive power." *International Research Journal* 8-1(15) (2013): 55–56.
13. Zhelezko, Yu.S. *Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti i povyshenie kachestva elektroenergii*. M.: Energoatomizdat, 1985.
14. Radchenko, P.M. "Tseli, zadachi i napravleniya issledovaniy v oblasti kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v SEES." *Sb. nauch. tr. NTO im. akad. A. N. Krylova* 436 (1986): 6–12.
15. Arpishkin, P.N., V.D. Gavrilov, and P.M. Radchenko. "Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti elektrostantsii konservnogo zavoda." *Rybnoe khozyaistvo* 6 (1989): 43–46.
16. Semenov, A.S., G.A. Matul, R.R. Khaziev, V.A. Shevchuk, and N.S. Cherenkov. "Analysis quality of electrical energy in the work asynchronous machine from three-phase power supply." *Fundamental research* 9-6 (2014): 1210–1215.
17. *Issledovanie i razrabotka sposobov estestvennogo povysheniya koeffitsienta moshchnosti sudoremontnykh zavodov. NIR Report*. Vladivostok: Dal'ne-vost. vyssh. inzh. mor. uch-shche, 1982.
18. Fedorov, A. A. *Spravochnik po elektroснабзheniyu i elektrooborudovaniyu: v 2 t. Vol. 1*. M.: Energoatomizdat, 1986.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурков Алексей Федорович —
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный
университет»
690091, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Суханова, 8
e-mail: burkov.22@mail.ru

Юрин Валерий Николаевич —
доцент
ФГБОУ ВО «Морской государственный
университет имени адмирала Г. И. Невельского»
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: yurinvn@yandex.ru

Аветисян Вагаршак Радиевич —
адъюнкт
ФГКВБОУ ВО «Тихоокеанское высшее военно-
морское училище имени С. О. Макарова»
690062, Российская Федерация, г. Владивосток,
Камский переулок, 6
e-mail: merin1309@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burkov, Aleksey F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str.,
Vladivostok, 690091,
Russian Federation
e-mail: burkov.22@mail.ru

Yurin, Valeriy N. —
associate professor
Maritime state University named
after adm. G.I. Nevelskoy
50A Verkhneportovaya Str., Vladivostok,
690059, Russian Federation
e-mail: yurinvn@yandex.ru

Avetisyan, Vagarshak R. —
adjunct
Pacific higher naval school named
after S.O. Makarov
6 Kamskiy Lane, Vladivostok, 690062,
Russian Federation
e-mail: merin1309@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 мая 2018 г.
Received: May 2, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-629-638

PARTIAL DISCHARGE MODELLING: THE CASE OF HIGH VOLTAGE INSULATION ONBOARD SHIP

S. Ye. Kuznetsov, D. M. Makarov

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

The article deals with partial discharge modeling based on gas inclusion (defect) in high-voltage electrical insulation on board ship. For modeling a sample of insulating material used in ship high-voltage equipment, has been taken. A sample of the insulating material is described by means of three capacitors. Based on the calculated capacitance values, a replacement circuit was constructed, and then a scheme for modeling partial discharges in Matlab / Simulink program was designed. While simulating the most common voltage values applied in ship high-voltage systems have been used. The gas inclusion (defect) of a cylindrical shape, located in the middle of the insulating material, has been taken as reference. Simulation of partial discharges is performed for three gas inclusion versions differing in size. The graphs show partial discharges for which the voltage across the capacitances and the apparent charges for each defect and voltage are calculated using a formula. Dependences of the apparent charge on the area of the defect in the insulation and on the amplitude of the partial discharges are presented for different voltages. Based on these graphs, conclusions are drawn regarding the dependence of partial discharges on the supply voltage and the size of the defect within the insulating material. Spectral analysis of the simulated signals corresponding to the defects considered by the fast Fourier transform method is made and the frequency distribution of the signal depending on its amplitude is presented diagrammatically. Found values of the apparent charge allow to calculate the average value of the current, which makes it possible to estimate the intensity of partial discharges and technical condition of electrical insulation. Another problem with constant monitoring of partial discharges in high-voltage power equipment is, separating useful signal (partial discharges) from the noise component. This issue needs further detailed study.

Keywords: partial discharge, high-voltage ship electrical equipment, impulse, insulation, capacity, defect, gas inclusion.

For citation:

Kuznetsov, Sergey Ye., and Daniil M. Makarov. "Partial discharge modelling: the case of high voltage insulation onboard ship." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 629–638. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-629-638.

УДК 621.3.048.004.58

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НА ПРИМЕРЕ СУДОВОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

С. Е. Кузнецов, Д. М. Макаров

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

В статье рассмотрено моделирование частичных разрядов на примере газового включения (дефекта) в судовой высоковольтной электрической изоляции. Для моделирования взят образец одного из видов изоляционного материала, применяющийся в судовом высоковольтном оборудовании. Образец изоляционного материала описывается с помощью трех ёмкостей. По рассчитанным значениям ёмкостей построена схема замещения, а далее — схема моделирования частичных разрядов в среде Matlab/Simulink. При моделировании используются наиболее распространённые значения напряжений, которые нашли применение в судовых высоковольтных электроэнергетических системах. За основу принято газовое включение (дефект) цилиндрической формы, находящийся внутри изоляционного материала. Моделирование частичных разрядов производится для трех вариантов газового включения, различающихся в размерах. На графиках представлены частичные разряды, по формулам рассчитаны напряжения на ёмкостях и значения кажущихся зарядов для каждого дефекта и напряжения отдельно. Представлены зависимости кажущегося

заряда от площади дефекта в изоляции и амплитуды частичных разрядов при разных значениях напряжений. По этим графикам сделаны выводы о зависимости частичных разрядов от питающего напряжения и размеров дефекта внутри изоляционного материала. Произведен спектральный анализ смоделированных сигналов, соответствующих рассматриваемым дефектам методом быстрого преобразования Фурье и графически показано частотное распределение сигнала в зависимости от его амплитуды. По найденным значениям кажущегося заряда можно рассчитать среднее значение тока, что позволяет оценить интенсивность частичных разрядов и техническое состояние изоляции. Однако существует еще одна проблема при постоянном контроле частичных разрядов в силовом высоковольтном оборудовании, а именно отделение полезного сигнала (частичные разряды) от шумовых составляющих. Данный вопрос нуждается в дальнейшем детальном изучении и моделировании в среде Matlab/Simulink.

Ключевые слова: частичный разряд, высоковольтное судовое электрооборудование, электрическая изоляция, емкость, дефект, газовое включение.

Для цитирования:

Кузнецов С. Е. Моделирование частичных разрядов на примере судовой высоковольтной изоляции / С. Е. Кузнецов, Д. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 629–638. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-629-638.

Введение (Introduction)

Частичные разряды (ЧР) — электрические разряды, которые происходят в изоляции электрооборудования, обычно возникают в электрических системах, работающих при напряжении от 3000 В и выше [1]. С течением времени повторяющиеся частичные разряды разрушают изоляцию, что в конечном итоге ведет к пробое изоляции и переходу оборудования в неработоспособное состояние. В связи с этим своевременная диагностика технического состояния изоляции особенно актуальна [2].

Традиционный подход к измерению частичных разрядов описывается в ГОСТ 20074-83 «Электрооборудование и электроустановки» [3]. Однако существует несколько основных проблем при измерении активности частичных разрядов, а именно: отделение частичного разряда от шумовой составляющей, интерпретация полученных характеристик частичных разрядов с точки зрения состояния изоляции системы и прогнозирование её остаточного ресурса. Так, в работе В. П. Вдовенко [4] приводится алгоритм анализа диагностических параметров и формирования заключения о возможностях и сроках дальнейшей эксплуатации объекта измерения, в основе которого лежит сравнение кажущегося заряда с его предельным значением, однако алгоритм более применим к диагностированию высоковольтных трансформ, в отличие от высоковольтного электрооборудования в целом. В работе Ф. Р. Исмагилова и Д. В. Максудова [5] приведена математическая модель протекания частичного разряда, в которой представлена зависимость мощности частичных разрядов от размера газового включения (дефекта), а также показано графически и доказано экспериментально, что перед полным пробоем изоляции происходит снижение активности частичных разрядов [6].

Для того чтобы решать указанные проблемы нужно, прежде всего, определить характеристики частичных разрядов путем моделирования частичных разрядов в газовых включениях в судовой высоковольтной изоляции. В данной работе моделирование проводится применительно к сшитому полиэтилену как одному из видов изоляционного материала, который нашел применение в высоковольтном судовом электрооборудовании. Для сшитого полиэтилена в среде Matlab/Simulink на основании рассчитанных емкостей построена схема замещения, с помощью которой моделируются частичные разряды. Моделирование проводится при разных значениях напряжений и разных размерах газовых включений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Частичный разряд. Частичные разряды по их расположению можно разделить на два типа: внутренний, происходящий внутри обмоток силового электрооборудования, и внешний, происходящий снаружи (в линиях передач между электрооборудованием). По типу происхождения ча-

стичный разряд можно классифицировать следующим образом (рис. 1): коронный разряд, поверхностный разряд, внутренний разряд и древовидный разряд [7].

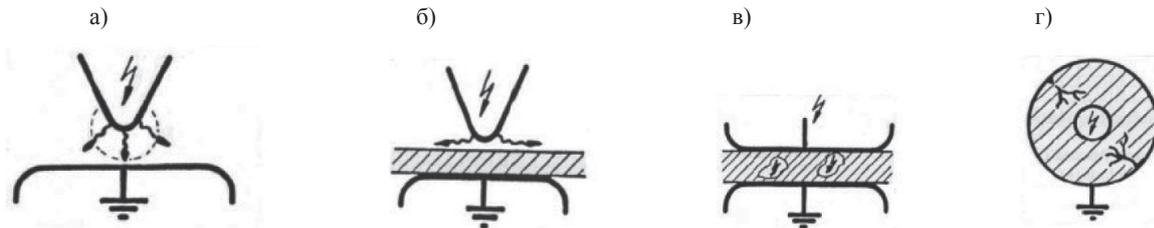


Рис. 1. Классификация типов частичных разрядов:
 а — коронный; б — поверхностный; в — внутренний; г — древовидный

Коронный разряд — это разряд, происходящий при высоком напряжении из-за неравномерности электрического поля около поверхности проводника. Как правило, такой тип разряда происходит около проводника островидной формы. Этот тип разрядов может проявляться в течение долгого времени и не повреждать изоляцию высоковольтного проводника.

Поверхностный разряд — это такой тип разряда, который происходит на границе двух различных диэлектрических материалов, таких как газ и твердый диэлектрический материал.

Внутренний разряд — это разряд, возникающий в полости изоляции вследствие её брака либо нарушения технологии производства.

Древовидный разряд — это разряд, при котором интенсивность электрического поля очень высока, что, в свою очередь, приводит к появлению и ответвлению от главного частичного разряда множества других частичных разрядов, которые и формируют древовидную структуру.

В судовой высоковольтной электроэнергетической системе наиболее часто проявляются внутренний и поверхностный ЧР. Оба типа ЧР могут проявляться как в высоковольтных кабелях, так и внутри высоковольтного оборудования [8].

Описание модели. В основе компьютерного моделирования ЧР лежит изоляционный материал (XLPE), выбранный на основании технической судовой документации танкера-газовоза «Corgovado LNG» [9]. Исходя из толщины изоляции высоковольтного кабеля ($t = 3,4$ мм), выбраны следующие размеры образца изоляционного материала, используемого при моделировании: длина $l = 3,4$ мм, высота $h = 3,4$ мм и толщина $t = 3,4$ мм (рис. 2). Внутри материала имеется вакуумное пространство ($\epsilon_{\text{в}} = 1$) — дефект цилиндрической формы, расположенное по центру.

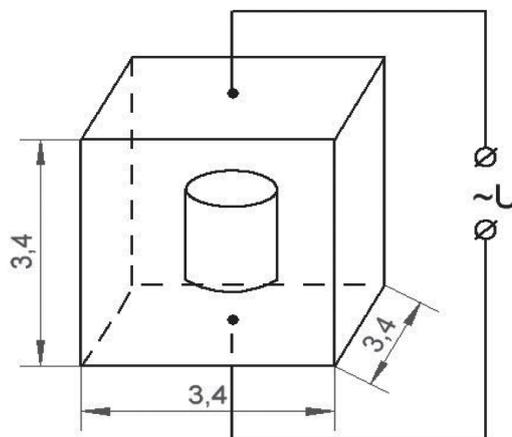


Рис. 2. Изоляционный образец, используемый при моделировании

Для моделирования импульсов ЧР необходимо собрать эквивалентную электрическую схему в Matlab/Simulink, представленную на рис. 3.

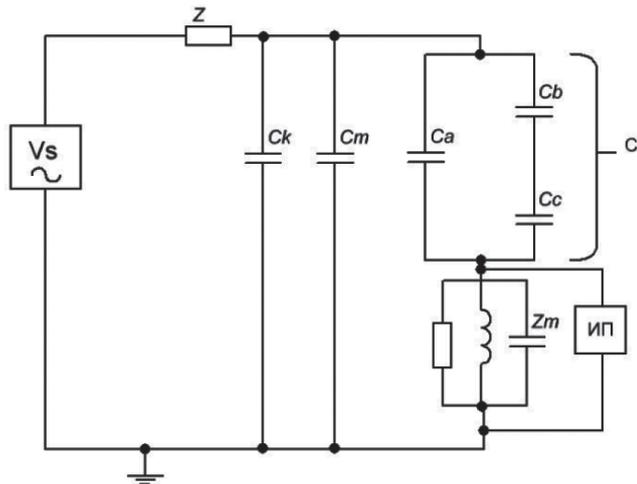


Рис. 3. Общая схема, реализуемая в Matlab/Simulink

Общая схема состоит из высоковольтного генератора V_s , токоограничительного резистора Z (полное сопротивление источника), соединительного конденсатора C_k , высоковольтного конденсатора C_m , модели изоляции с газовым включением (дефектом) C_r , содержащей внутри полость, в которой будут происходить частичные разряды, цепь регистрации и измерения частичных разрядов Z_m и измерительный прибор (осциллограф) ИП.

Модель изоляции с газовым включением представлена в виде двух последовательно соединенных электрических емкостей C_c и C_b и параллельно соединенных с емкостью C_a , где C_c — емкость, учитывающая дефект в изоляции; C_b — емкость, характеризующая неповрежденную изоляцию над и под дефектом; C_a — емкость, характеризующая остальную часть изоляции. Для обнаружения частичных разрядов используется RLC-цепь, которая представлена как Z_m .

Факторы, влияющие на импульс частичного разряда

Напряжение. Во время моделирования ЧР используются значения напряжений, применяемые на судах с высоковольтной электроэнергетической системой, а именно: 3,3 кВ, 6,6 кВ и 11 кВ с частотой питающей сети 60 Гц.

Материал изоляции проводника. В современных судовых высоковольтных системах используются сшитый полиэтилен (XLPE), полипропилен (PE), этиленпропиленовая резина (EPR) и эпоксидная смола. На основании судовой технической документации выбран сшитый полиэтилен. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{низ}}$ для сшитого полиэтилена (XLPE) равна 2,4.

Размер дефекта в изоляции. Является самым значительным фактором, оказывающим влияние на параметры импульса ЧР, а, соответственно, и на оставшийся срок службы изоляции. Для примера взято газовое включение цилиндрической формы, размеры которого указаны в табл. 1.

Таблица 1

Размеры газового включения в изоляции

Высота (h_d), мм	Радиус (r), мм	Обозначение дефекта
1	0,3	г
2	1	д
3	1,7	е

Математическое описание дефекта в изоляции

Дефект в изоляции описывается емкостью C_c . Емкостью C_b , соединенной последовательно с емкостью C_c , характеризуется изоляция над и под дефектом, так как дефект расположен по центру [10]. Емкостью C_a характеризуется неповрежденная часть изоляции. Далее представлены формулы для каждой из емкостей [11]:

$$C_a = \frac{\varepsilon_{\text{рнз}} \cdot \varepsilon_0 \cdot (l^2 - r^2 \cdot \pi)}{h}; \quad (1)$$

$$C_b = \frac{\varepsilon_{\text{рнз}} \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2 \cdot \pi}{h - h_d}; \quad (2)$$

$$C_c = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{рв}} \cdot r^2 \cdot \pi}{h_d}; \quad (3)$$

где l — длина кубического образца изоляции; h — высота изоляции; t — толщина изоляции; r — радиус искусственной пустоты в изоляции; h_d — высота дефекта внутри изоляции; ε_0 — диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$); $\varepsilon_{\text{рв}}$ — диэлектрическая проницаемость воздуха ($\varepsilon_{\text{рв}} = 1$); $\varepsilon_{\text{рнз}}$ — диэлектрическая проницаемость сшитого полиэтилена ($\varepsilon_{\text{рнз}} = 2,4$).

Напряжение V_c и кажущийся заряд q , измеренные на дефекте внутри изоляции, определяются по формулам (4) и (5):

$$V_c = \frac{V_a \cdot C_b}{(C_a + C_b)}; \quad (4)$$

$$q = C_b \cdot V_c, \quad (5)$$

где V_a — напряжение на емкости C_a .

Моделирование импульса частичного разряда в среде Matlab/Simulink

На основе формул (1), (2) и (3) рассчитывается емкость каждого участка изоляции. С помощью формул (4) и (5) определяется значения напряжений на дефекте и кажущийся заряд. Полученные результаты представлены в табл. 2 – 4 для соответствующих значений напряжения.

Таблица 2

Расчётные параметры при напряжении 3,3 кВ

Индекс дефекта	Емкость C_a , Ф	Емкость C_b , Ф	Емкость C_c , Ф	Напряжение на дефекте V_c , В	Кажущийся заряд q , Кл
г	$7,01 \times 10^{-14}$	$2,49 \times 10^{-15}$	$2,48 \times 10^{-15}$	29	$7,2 \times 10^{-14}$
д	$5,23 \times 10^{-14}$	$4,74 \times 10^{-14}$	$1,38 \times 10^{-14}$	402	$1,9 \times 10^{-11}$
е	$1,54 \times 10^{-14}$	$4,79 \times 10^{-13}$	$3,99 \times 10^{-14}$	819,5	$3,9 \times 10^{-10}$

Таблица 3

Расчётные параметры при напряжении 6,6 кВ

Индекс дефекта	Емкость C_a , Ф	Емкость C_b , Ф	Емкость C_c , Ф	Напряжение на дефекте V_c , В	Кажущийся заряд q , Кл
г	$7,01 \times 10^{-14}$	$2,49 \times 10^{-15}$	$2,48 \times 10^{-15}$	58	$1,4 \times 10^{-13}$
д	$5,23 \times 10^{-14}$	$4,74 \times 10^{-14}$	$1,38 \times 10^{-14}$	804	$3,8 \times 10^{-11}$
е	$1,54 \times 10^{-14}$	$4,79 \times 10^{-13}$	$3,99 \times 10^{-14}$	1639	$7,8 \times 10^{-10}$

Таблица 4

Расчётные параметры при напряжении 11 кВ

Индекс дефекта	Емкость C_a , Ф	Емкость C_b , Ф	Емкость C_c , Ф	Напряжение на дефекте V_c , В	Кажущийся заряд q , Кл
г	$7,01 \times 10^{-14}$	$2,49 \times 10^{-15}$	$2,48 \times 10^{-15}$	96,7	$2,4 \times 10^{-13}$
д	$5,23 \times 10^{-14}$	$4,74 \times 10^{-14}$	$1,38 \times 10^{-14}$	1341	$6,35 \times 10^{-11}$
е	$1,54 \times 10^{-14}$	$4,79 \times 10^{-13}$	$3,99 \times 10^{-14}$	2733	$1,3 \times 10^{-9}$

На основании полученных значений емкостей, описывающих газовое включение в изоляционном материале, частичные разряды моделируются с помощью электрической схемы, представленной на рис. 4. Электрическая схема реализована в программе Matlab/Simulink и состоит из следующих элементов: V_{m1} — блок измерения напряжения в цепи; R — токоограничительный резистор; C_m — со-

единительный конденсатор; C_k — высоковольтный конденсатор; C_a, C_b, C_c — конденсаторы, представляющие емкости изоляции; V_{m2} — блок измерения напряжения на дефекте; $\max(u, y)$ y — блок определения максимальных/минимальных значений амплитуды; D_2 — осциллограф; D_1 — дисплей; V_{m3} — блок измерения амплитуды ЧР; PD — детектор частичных разрядов (RLC -цепь); V_s — генератор высоковольтного переменного напряжения; Powergui — блок задания параметров моделирования. В табл. 5 содержатся численные значения параметров элементов электрической схемы.

Таблица 5

Параметры, используемые при моделировании

Номер параметра	Элемент схемы	Символ	Значение	Единица измерения
1	Токоограничивающий резистор	R	10	Ом
2	Конденсатор	C_m	1000	пФ
3	Конденсатор	C_k	1000	мкФ
4	Конденсатор PD	C_{PD}	0,45	мкФ
5	Индуктивность PD	L_{PD}	0,6	мГн
6	Резистор PD	R_{PD}	250	Ом
7	Генератор напряжения	V_s	6600	В

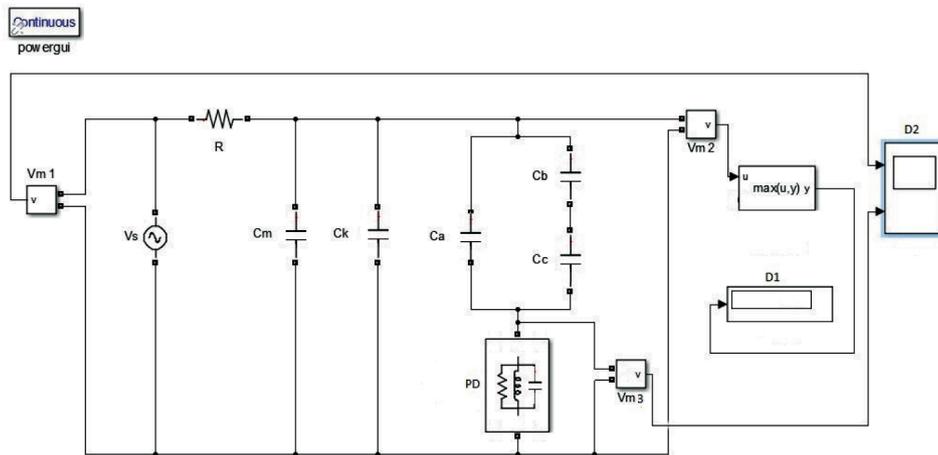


Рис. 4. Экспериментальная схема для моделирования частичных разрядов

На рис. 5 и 6 приведены результаты моделирования импульсов частичных разрядов с напряжением источника 6,6 кВ при $f = 60$ Гц и разных размерах газовых включений.

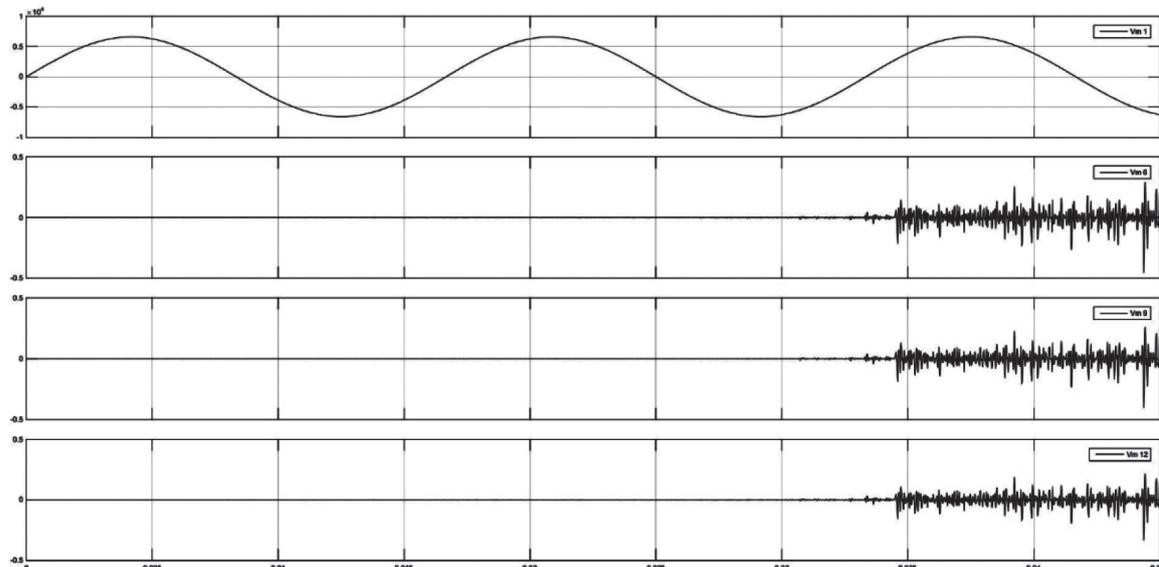


Рис. 5. Результаты моделирования ЧР при разных размерах газовых включений

Как видно из рис. 5, с увеличением в размерах дефекта внутри изоляционного материала происходит уменьшение амплитуды импульса ЧР, и наоборот, при меньших размерах — увеличение. Чтобы получить детальное представление о сигнале (распределение максимальных значений сигнала на частотном диапазоне) необходимо использовать быстрое преобразование Фурье [12], результаты которого представлены на рис. 6.

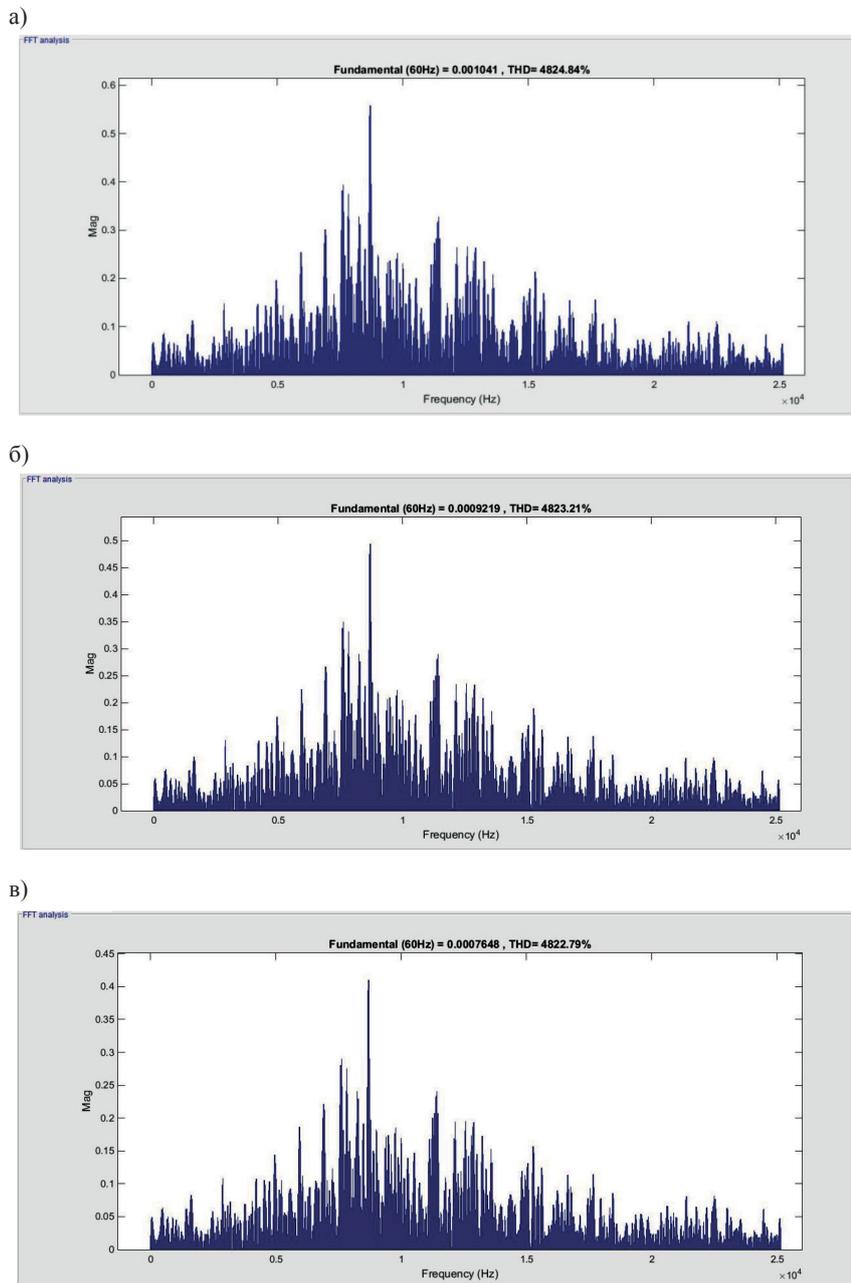


Рис. 6. Результаты спектрального анализа смоделированных ЧР при разных размерах газовых включений

На рис. 6 представлены результаты спектрального анализа смоделированных ЧР для разных размеров газовых включений. Спектры сигналов получены методом быстрого преобразования Фурье. На основании полученных спектров можно сделать вывод, что ЧР наибольшей амплитуды возникают в диапазоне от 6 кГц до 15 кГц. Кроме того, при сравнении трех графиков видно, что максимальная амплитуда ЧР зависит от размера включения, подтверждая тем самым графики, снятые с осциллографа при моделировании.

На рис. 7 показано полученное изменение кажущегося заряда q от площади поперечного сечения дефекта в изоляции ($S = \pi r^2$) при разных значениях приложенного к изоляции напряжения. Из графика можно сделать выводы, что величина кажущегося заряда возрастает с увеличением размеров дефекта в изоляционном материале. Видно, что максимальное значение кажущегося заряда соответствует максимальной площади дефекта в изоляции для трех значений напряжений. Кроме того, на величину кажущегося заряда оказывает значительное влияние приложенное напряжение, что также отображено на рис. 7.

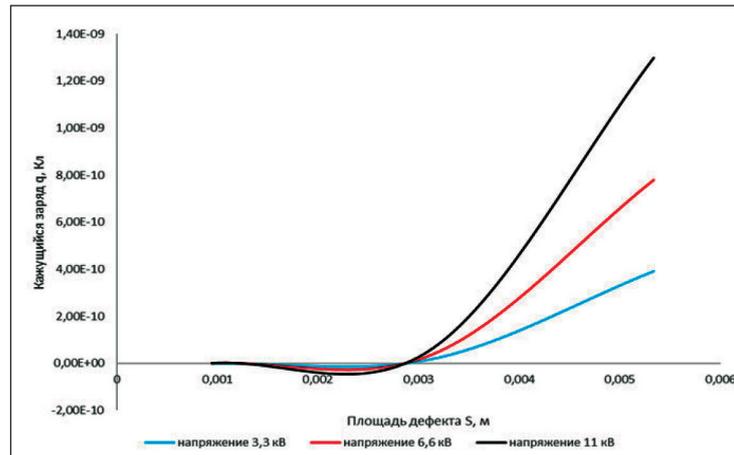


Рис. 7. Зависимость значения кажущегося заряда от площади дефекта при разных напряжениях

На рис. 8 представлены зависимости значения напряжения от амплитуды кажущегося заряда при разных дефектах. Зависимости были получены путем измерения амплитуды ЧР на блоке V_{m3} и отображением их в графической форме. На основании построенных зависимостей можно сделать вывод о том, что для данного образца данного образца изоляционного материала и при данных параметрах моделируемой схемы амплитуда ЧР зависит от размеров дефекта. Данная зависимость особенно проявляется при напряжении выше 6 кВ, при начальных значениях питающего напряжения (3,3 кВ и ниже) зависимость амплитуды ЧР практически не заметна. Кроме того, наблюдается значительное увеличение амплитуды при значениях питающего напряжения выше 6,6 кВ. Характерная особенность объясняется тем, что изоляционный материал переходит в предпробойную стадию, для которой характерно резкое увеличение амплитуды ЧР. Данная особенность также была подтверждена другими исследователями, с использованием другого изоляционного материала, а также других размеров дефекта в изоляционном материале [6].

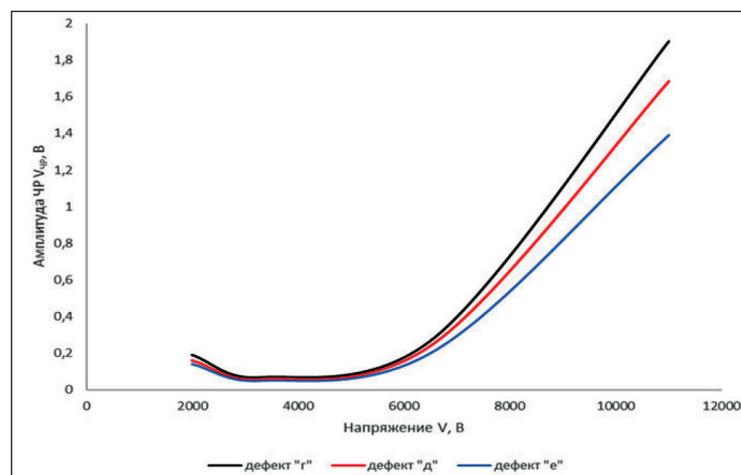


Рис. 8. Зависимость значения напряжения от амплитуды кажущегося заряда при разных дефектах

Заключение (Conclusion)

Частичные разряды являются основной проблемой в системе судового электрооборудования высокого напряжения, так как приводят к снижению допустимого уровня технического состояния изоляции и к короткому замыканию. Следовательно, обнаружение и измерение частичных разрядов необходимо для контроля технического состояния электрической изоляции и поддержания высоковольтного электрооборудования в работоспособном состоянии. В данной работе для моделирования частичных разрядов использовался сшитый полиэтилен как один из изоляционных материалов, применяемых в судовом высоковольтном электрооборудовании. На основе диэлектрической проницаемости и емкостей была построена модель изоляционного материала с газовым включением внутри изоляции разных размеров и площади. Обнаружено, что с увеличением приложенного напряжения и площади поперечного сечения газового включения в изоляции возрастает кажущийся заряд, являющийся одной из главных характеристик ЧР. Исходя из значения кажущегося заряда, можно определить среднее значение тока [13]. По этим двум параметрам можно оценить интенсивность ЧР. Показано, что наибольшая амплитуда частичных разрядов лежит в диапазоне от 6 кГц до 15 кГц. Также показано увеличение амплитуды частичного разряда при значении питающего напряжения выше 6,6 кВ, характерное при переходе изоляционного материала в предпробойную стадию. Однако следует также учитывать, что полученные в результате компьютерного моделирования данные, а именно: значение кажущегося заряда, амплитуда ЧР и его спектральное распределение, справедливы, если датчики обнаружения ЧР будут установлены в непосредственной близости от контролируемого оборудования. При осуществлении контроля ЧР посекционно необходимо также учитывать затухание импульса по мере его распространения. Решение данного вопроса требует усложнения модели и дополнительного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарагаев П. А. Частичные разряды в электрической изоляции / П. А. Тарагаев, К. А. Яновский // Вестник Морского государственного университета. — 2013. — № 58. — С. 94–97.
2. Vedral J. Signal processing in partial discharge measurement / J. Vedral, M. Kríz // Metrology and Measurement Systems. — 2010. — Vol. 17. — No. 1. — Pp. 55–64. DOI: 10.2478/v10178-010-006-8.
3. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 24 с.
4. Вдовенко В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В. П. Вдовенко. — Новосибирск: Наука, 2007. — 155 с.
5. Исмагилов Ф. Р. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика / Ф. Р. Исмагилов, Д. В. Максудов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2011. — Т. 15. — № 3 (43). — С. 98–100.
6. Stone G. C. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair / G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani. — John Wiley & Sons, 2004. — 390 p.
7. Wadhwa C. L. High voltage engineering / C. L. Wadhwa. — 2nd Edition. — New Age International, 2007. — 304 p.
8. ABB Technical Paper. Motors & Generators Optimized Cost of Ownership. — “ABB”, 2013. — 3 p.
9. General Recommendations for Cabling inboard ships. — “GE Energy”, 2013. — 27 p.
10. Sabat A. Simulation of Partial Discharge in High Voltage Power Equipment / A. Sabat, S. Karmakar // International Journal on Electrical engineering and Informatics. — 2011. — Vol. 3. — No. 2. — Pp. 234–247.
11. Kuffel E. High Voltage Engineering / E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel. — 2nd edition. — 2000. — 539 p.
12. Kattan P. I. Matlab for beginners / P. I. Kattan. — Petra books, 2012. — 212 p.
13. Кузнецов С. Е. Диагностирование изоляции судового высоковольтного электрооборудования в процессе эксплуатации / С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 183–190.

REFERENCES

1. Taragaev, P.A., and K.A. Yanovskii. "Chastichnye razryady v elektricheskoi izolyatsii." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 58 (2013): 94–97.
2. Vedral, Josef, and Martin Kriz. "Signal processing in partial discharge measurement." *Metrology and Measurement Systems* 17.1 (2010): 55–64. DOI: 10.2478/v10178-010-006-8
3. USSR. State Standard GOST 20074–83. Elektrooborudovanie i elektroustanovki. Metod izmereniya kharak-teristik chastichnykh razryadov. M.: Izdatel'stvo standartov, 1983.
4. Vdovenko, V.P. *Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniya*. Novosibirsk: Nauka, 2007.
5. Ismagilov, F.R., and D.V. Maksudov. "Mathematical modeling of partial discharges evolution in time of isolation degradation process." *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* 15.3(43) (2011): 98–100.
6. Stone, G.C., E.A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. John Wiley & Sons, 2004.
7. Wadhwa, C.L. *High voltage engineering*. 2nd Edition. New Age International, 2007.
8. *ABB Technical Paper. Motors & Generators Optimized Cost of Ownership*. "ABB", 2013.
9. *General Recommendations for Cabling inboard ships*. "GE Energy", 2013.- 27 p.
10. Sabat, Asima, and S. Karmakar. "Simulation of Partial Discharge in High Voltage Power Equipment." *International Journal on Electrical engineering and Informatics* 3.2 (2011): 234–247.
11. Kuffel, E., W.S. Zaengl, and J. Kuffel. *High Voltage Engineering*. 2nd edition. 2000
12. Kattan, Peter I. *Matlab for beginners*. Petra books, 2012.
13. Kuznetsov, S.E., and Yu.V. Kudryavtsev. "Diagnosis isolation of marine high-voltage electric equipment in operation." *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2016. 183–190.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Сергей Емельянович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: kuznecovse@gumrf.ru
Макаров Даниил Михайлович —
аспирант
Научный руководитель:
Кузнецов Сергей Емельянович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: daniil.makarov.think.tank@gmail.com,
kaf_saees@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Sergey Ye. —
Doctor of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: kuznecovse@gumrf.ru
Makarov, Daniil M. —
Postgraduate
Supervisor:
Kuznetsov, Sergey Ye.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: daniil.makarov.think.tank@gmail.com,
kaf_saees@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 8 мая 2018 г.
Received: May 8, 2018.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-639-646

THE PRINCIPLES GOVERNING THE CONSTRUCTION OF ALGORITHMS AND DEBUG THEM FOR USE IN THE SYSTEMS OF VESSEL TRAFFIC MANAGEMENT

D. S. Vasilchenko

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

In this article, the principles of debugging control algorithms, the basis for the development of a subsystem for debugging algorithms for use in a complex control system, as well as the role of this subsystem in the structure of the ship traffic control system. The relevance of this issue is justified by the arising problems or the incorrect functioning of the software, which is part of the management information system. On the basis of a software module, the debugging subsystem can be implemented, being both an autonomously-functioning element and part of a control system with dependent communications. The issues under consideration play a significant role in the complex debugging of software of various sizes, and the proposed solution will help optimally use the resources of managing computer systems. As the object of integration, the ship traffic control system is considered, which contains certain groups of algorithms represented by software modules. The proposed approach is useful for diagnosing and reconfiguring the hardware and software of the control system. The development, testing and operation of software and hardware that use control algorithms must have not only practical significance, but also a logical-based order of execution. The use of the algorithm debugging subsystem can contribute both to the adaptation of the system to dynamically changing functions, and to the search for solutions in the event of errors in the operation of the system modules, which can sometimes lead to an incorrect functioning of the entire system. Adding a debugging subsystem cannot always be used as part of the basic functions of the system, since this process is rather an additional tool for modifying the operation, rather than a mandatory base component.

Keywords: control task, the stability of the computational process, the adaptation of control processes, the debugging of algorithms, the automation of the debugging process, the detection of algorithm errors, the technique of debugging algorithms, the description of algorithms, the hierarchical system, the modernizability of the system.

For citation:

Vasilchenko, Dmitrii S. "The principles governing the construction of algorithms and debug them for use in the systems of vessel traffic management." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 639–646. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-639-646.

УДК: 004.021

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ АЛГОРИТМОВ И ИХ ОТЛАДКИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ

Д. С. Васильченко

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

В статье рассмотрены принципы отладки управляющих алгоритмов, основы для разработки подсистемы отладки алгоритмов для использования в комплексной управляющей системе, а также роль данной подсистемы в структуре системы управления движением судов. Актуальность данного вопроса обоснована возникающими неполадками или неверным функционированием программных средств, которые

являются частью управляющей информационной системы. На основе программного модуля подсистема отладки может быть реализована, являясь как автономно функционирующим элементом, так и частью управляющей системы с зависимыми связями. Рассматриваемые вопросы играют весомую роль при комплексной отладке программного обеспечения различного масштаба, и предложенное решение поможет оптимально использовать ресурсы управляющих компьютерных систем. В качестве объекта интеграции рассматривается система управления движения судов, которая содержит определённые группы алгоритмов, представленных программными модулями. Предлагаемый подход полезен для диагностики и реконфигурации программно-аппаратного обеспечения управляющей системы. Разработка, тестирование и эксплуатация программно-аппаратных средств, которые используют управляющие алгоритмы, должны иметь не только практическую значимость, но и логически-обоснованный порядок исполнения. Использование подсистемы отладки алгоритмов может способствовать как адаптации системы к динамически изменяющимся функциям, так и поиску решения в случаях возникновения ошибок в работе модулей системы, что иногда может привести к неверному функционированию всей системы. Добавление подсистемы отладки не всегда может использоваться в составе базовых функций системы, так как данный процесс является, скорее, дополнительным инструментом для модификации функционирования, чем обязательным базовым компонентом.

Ключевые слова: задача управления, устойчивость вычислительного процесса, адаптация процессов управления, отладка алгоритмов, автоматизация процесса отладки, обнаружение ошибок алгоритма, методика отладки алгоритмов, описание алгоритмов, иерархическая система, модернизируемость системы.

Для цитирования:

Васильченко Д. С. Принципы построения управляющих алгоритмов и их отладки для использования в системах управления движением судов / Д. С. Васильченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 639–646. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-639-646.

Введение (Introduction)

В современных управляющих компьютерных системах, в частности, применяемых на водном транспорте разработке накладывающих значительные ограничения на использование внешних ресурсов, вводится ограниченность параметров компьютерных систем [1] в соответствии с минимальными границами потребностей для решения требуемых задач управления. Задачи, реализуемые на управляющих компьютерных системах для управления объектами водного транспорта, сводятся к организации, контролю и обеспечению устойчивости вычислительного процесса в реальном масштабе времени. Полный список задач определяется назначением системы, однако особое внимание уделяется задачам обнаружения сигналов [2], прогнозирования изменения переменных, распределения ресурсов и адаптации процессов управления. Быстрое увеличение сложности и объёма программных приложений системы приводит к необходимости автоматизации и совершенствования технологии разработки программного обеспечения. В свою очередь, большая трудоёмкость отладки алгоритмов приводит к необходимости автоматизации этих процессов, поэтому вопрос особенностей и методов отладки систем управляющих алгоритмов требует особого внимания.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Общая задача отладки алгоритмов состоит в установлении факта правильного функционирования и работоспособности программного обеспечения системы, а также в обнаружении ошибок, их диагностике и устранении. Методы решения этих задач и состав используемых средств в значительной степени зависят от типа управляющей системы [3] и объёма отлаживаемого программного обеспечения. Для реализации необходимо спроектировать комплекс специализированных методов, программного и аппаратного обеспечения, состоящий из модулей и объединяемый в подсистему отладки, представленную на рис. 1.

Архитектура подсистемы отладки определяется разработанной методикой отладки алгоритмов [4] и программных модулей системы управления, уровнем воздействия на отлаживаемое программное обеспечение, способом программной реализации подсистемы отладки, составом и характеристиками аппаратного обеспечения. Подсистема автоматизированной отладки позволит

сократить длительность и общие затраты на разработку системы управления. Однако создание сложных управляющих систем, включающих управляющие алгоритмы, практически невозможно без многоуровневого анализа и синтеза целей, задач и структур.

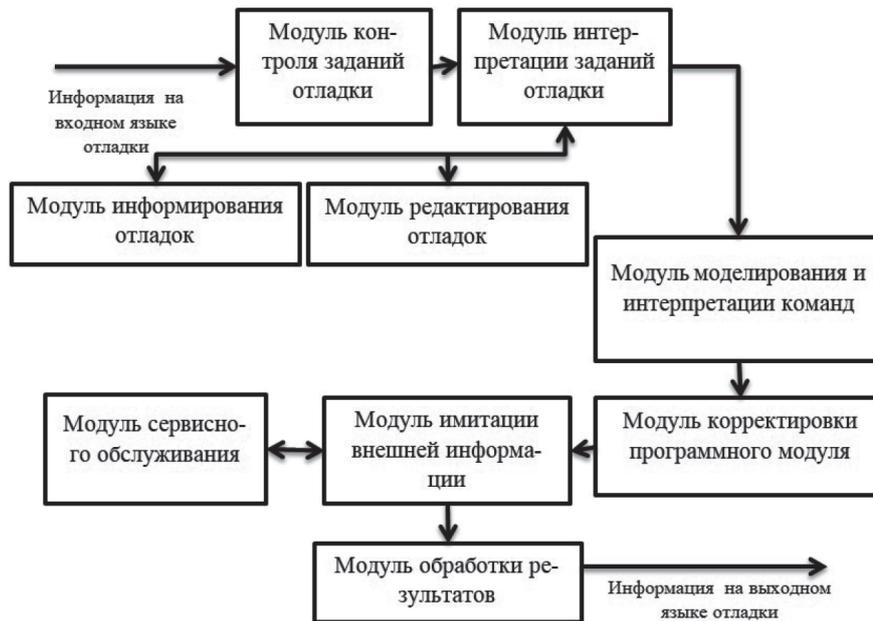


Рис. 1. Схема взаимодействия компонентов подсистемы отладки

Основой для описания алгоритмов являются: исходная информация, описываемая системой знаков; операторы, задаваемые на множестве исходной и результирующей информации; результирующая информация, заданная в конечном алфавите функция [5], связывающая операторы и правила их описания.

Любое сложное управляющее программное обеспечение системы можно разбить на иерархические уровни с определённой структурой. Иерархические системы характеризуются вертикальной декомпозицией с возможностью вмешательства программных модулей верхнего уровня для координации функционирования программных модулей нижнего уровня, хотя в некоторых случаях функционирование модулей верхнего уровня зависит от информации, полученной от модулей нижнего уровня. Таким образом, сверху вниз идут координирующие и управляющие воздействия, а снизу вверх поступает информация о полученных решениях. На каждом уровне иерархии в сложных системах целесообразно иметь достаточную независимость элементов с минимальным взаимодействием в пределах уровня, когда управление сверху вниз заменяется автономно функционирующими элементами нижнего уровня. Это позволяет упростить общее координирование элементов системы и проводить его только по вертикали, а также сократить потоки информации, одновременно повышая надёжность, адаптивность и модернизируемость системы в целом, что приводит к снижению универсальности элементов, но повышает специфичность целей и решаемых задач. При этом необходимо учитывать, что многоуровневое иерархическое построение сложных систем влияет на продолжительность их разработки и отладки. Иерархическая структура требует определённых затрат ресурсов для элементов системы, но это оправдывается существенным упрощением анализа и синтеза всей системы.

Иерархическую структуру алгоритма [6] сложной системы управления также логично представить в виде взаимосвязанных подсистем нескольких уровней, каждый из которых построен по единому принципу. Алгоритм или команда более высокого уровня используют в качестве операторов алгоритмы или команды более низкого уровня. Следовательно, алгоритм или команда каждого иерархического уровня одновременно являются оператором для следующего уровня. Требуемые уровни представлены на рис. 2.

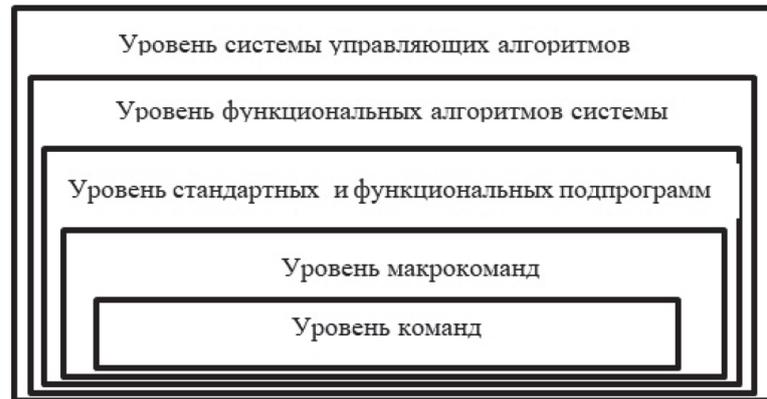


Рис. 2. Иерархия уровней алгоритмов и команд системы управления

Данная система уровней характеризуется последовательным усложнением функций и увеличением количества команд на каждом уровне иерархии. Переход на каждый более высокий уровень соответствует увеличению количества команд при любых целевых задачах управления, а увеличение уникальности совокупности команд, специализируясь, снижает возможность применения алгоритмов более высокого уровня в различных комбинациях. Данная структура позволяет существенно упростить анализ на каждом иерархическом уровне. Приведённое деление алгоритмов на иерархические уровни является условным, и выделенные границы не всегда чётко определены. Это касается и оценки сложности иерархических уровней по количеству команд. Алгоритмы в конкретных управляющих системах могут значительно отличаться при распределении по уровням от значения количества команд из-за сложности решения функциональных задач.

Иерархические уровни связаны не только передачей управления, но и обменом информацией, для каждого из которых определяются локальные переменные, используемые только на определённом уровне, что позволяет значительно ограничивать объём анализируемой информации по мере повышения операторов управляющего алгоритма. Переменные, используемые для взаимодействия алгоритмов и команд различных уровней, также образуют иерархическую структуру связей, которая является более сложной, чем структура связей по управлению [7].

Если рассматривать иерархию уровней снизу вверх (см. рис. 2), то, в первую очередь, необходимо отметить, что команда в управляющих компьютерных системах является наиболее используемым элементом управляющих алгоритмов. Алгоритм функционирования определяется набором типов операций. На первом этапе допустимыми процессами являются последовательные команды, образующие составные части и элементы реализации типовой операции системы. Выполнение каждой команды в программе рассматривается как реализация определённого алгоритма устройствами управляющей компьютерной системы. Именно уровень алгоритмов команд считается базовым и исходным.

На втором уровне операциями являются команды управляющей компьютерной системы, которые объединяются алгоритмами конкретных макрокоманд. Исходными данными являются величины, подлежащие анализу и преобразованию, объём которых в несколько раз больше, чем на предыдущем уровне. Вследствие этого увеличивается объём получаемых результатов, тем самым усложняя алгоритм функционирования. С повышением уровня часть результатов превращается в промежуточные данные, в связи с чем ограничивается скорость роста количества результирующих величин при повышении иерархического уровня. Эта возможность исключения из анализа промежуточных результатов при повышении иерархического уровня является одним из важнейших преимуществ многоуровневого иерархического построения управляющих алгоритмов. Количество типов макрокоманд в сложных алгоритмах того же порядка, что и количество типов команд.

Стандартные подпрограммы решают типовую вычислительную или логическую задачу, но большую по объёму, чем макрокоманда. Данный уровень характеризуется менее разнообразным

использованием. Из стандартных подпрограмм, используемых в качестве операторов, посредством команд и макрокоманд, образующих алгоритм функционирования, формируются функциональные подпрограммы, которые решают автономную частную целевую задачу алгоритма управления. Состав исходной информации в этом случае существенно больший, и увеличивается объём результирующих данных. Отсутствие необходимости раскрытия алгоритмов функционирования элементов, используемых в нижних иерархических уровнях, позволяет выполнять анализ подпрограмм в укрупнённом виде.

Уровень функциональных алгоритмов системы представлен алгоритмами, решающими целевую задачу, являющуюся частью целевой задачи управляющей системы. Функциональный алгоритм объединяет группу стандартных и функциональных подпрограмм, выступающих в нём в роли операторов. Количество исходной и результирующей информации больше, чем на предыдущих уровнях. Следует учитывать, что в некоторых случаях количество результирующей информации при переходе на более высокий уровень уменьшается, так как алгоритм осуществляет селекцию информации, используя промежуточные данные для получения частных результатов.

На уровне системы управляющих алгоритмов осуществляется построение элементов из функциональных алгоритмов и подпрограмм, которые используются как операторы, объединяемые операционной системой управляющей компьютерной системы. Результаты, получаемые системой управляющих алгоритмов, являются основными управляющими сигналами, предназначенными для решения главной целевой задачи управляющей системы в целом. Основными исходными данными на уровне системы управляющих алгоритмов являются сообщения управляемых объектов и внешних источников информации с текущей меткой времени. В каждый момент времени исходными данными является накопленная информация о результатах функционирования управляющей системы.

В рассмотренной иерархической структуре элементы различных уровней внутри одного уровня связаны между собой алгоритмически (взаимодействие по передачам управления) и информационно (взаимодействие через используемые переменные). Для сложных систем алгоритмов целесообразно иметь максимальную автономность элементов и стандартизированные связи между ними. Это обеспечивается тем, что связи по управлению для элементов основной части иерархических уровней строятся в простейшем виде, когда передача управления на включение подпрограммы или блока допускается только в одну точку. Аналогично выйти из блока можно только одним путём. Это позволяет построить более простые иерархические системы связи алгоритмов по управлению, что существенно упрощает их разработку и отладку. Однако иерархическое блочное построение больших алгоритмов может привести к значительному увеличению количества команд и производительности управляющей компьютерной системы, необходимой для реализации определённой совокупности задач управления. Эти потери обусловлены введением в алгоритмы элементов, необходимых для их унифицированного сопряжения [8], и затратами на организацию общего взаимодействия алгоритмов. Многократное использование отдельных подпрограмм и блоков снижает потери в памяти команд [9], однако они могут оставаться достаточно значительными. Требования к производительности управляющей компьютерной системы практически всегда возрастают при блочном иерархическом построении.

Потери вследствие блочно-иерархического построения алгоритмов обычно оказываются оправданными технологичностью проектирования и сокращением затрат на отладку системы алгоритмов [10]. В этом случае подпрограммы и другие элементы могут иметь автономный законченный вид и простые формализованные связи по информации и управлению. При развитии и модернизации системы алгоритмов управления такая структура позволяет корректировать или заменять отдельные алгоритмы или подпрограммы, не нарушая все остальные взаимодействующие алгоритмы. Кроме того, блочно-иерархическое построение существенно упрощает распараллеливание алгоритмов на различных уровнях для их реализации на многопроцессорных компьютерных системах. Отсутствие чёткой иерархической системы построения алгоритмов приводит к большому количеству внутренних связей, что существенно увеличивает длительность отладки

и её сложность. Более сложными представляются иерархические структуры управляющих алгоритмов по информационным связям. Это обусловлено тем, что в блоке или подпрограмме используются переменные, подготавливаемые различными блоками. Подпрограмма может рассчитывать величины для нескольких программ. Эти обстоятельства не позволяют построить простую последовательную схему подчинённости подпрограмм по информационным связям. Поэтому в структуре алгоритмов за основные принимаются связи по управлению, а информационные связи указываются как дополнительные.

Для создания управляющего алгоритма системы управления движением водного транспорта с возможностью отладки необходимо, в первую очередь, сформировать алгоритмы подпрограмм системы, в общем случае содержащие:

- обнаружение судов в зоне видимости;
- сопровождение судов;
- формирование решений конфликтов;
- индикацию движения водного транспорта;
- контроль конфликтных ситуаций;
- контроль движения на соответствие расписанию;
- подготовку и управление прибытием и отправлением судов;
- планирование движения судов;
- функциональный контроль системы;
- безопасность системы;
- тестирование системы;
- центральное управление системой;
- взаимодействие системы с внешними источниками;
- управление и контроль параметров системы.

Следующим этапом является выделение групп по управляющим алгоритмам, которые будут реализовываться с помощью следующих подпрограмм:

- 1) *алгоритмы управления вычислительным процессом*: центральное управление системой, взаимодействие системы с внешними источниками, управление и контроль параметров системы;
- 2) *общие функциональные алгоритмы обработки информации*: обнаружение судов в зоне видимости, сопровождение судов, формирование решений и устранение конфликтов;
- 3) *периодические функциональные алгоритмы*: индикация движения водного транспорта, контроль конфликтных ситуаций, контроль движения на соответствие расписанию, подготовка и управление прибытием и отправлением судов, планирование движения судов;
- 4) *алгоритмы контроля и обеспечения устойчивости решения задач*: функциональный контроль, безопасность и тестирование системы.

Далее осуществляется разработка функциональной схемы управляющего алгоритма системы управления движением судов, представленного на рис. 3, содержащая подсистему отладки.

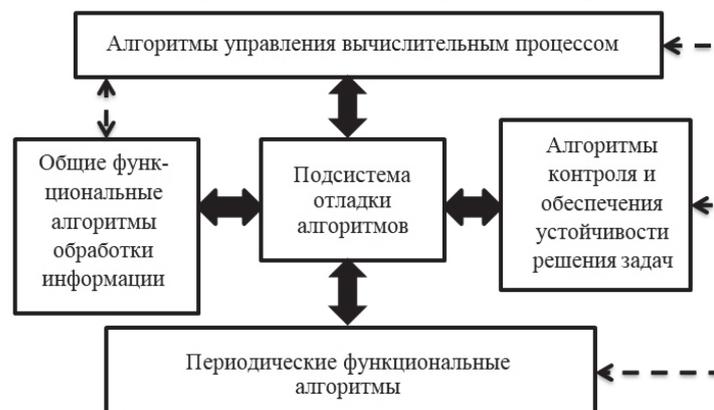


Рис. 3. Функциональная схема управляющего алгоритма системы управления движением судов

На данной схеме пунктирными стрелками обозначены связи групп алгоритмов системы, а стрелки с заливкой указывают на связь подсистемы отладки с алгоритмами. Подсистема отладки алгоритмов может быть как автоматической, так и выполняться по указанию пользователя системы.

Выводы (Summary)

1. Рассмотрены вопросы отладки алгоритмов и программных модулей системы управления движением судов. Представленный метод может быть применён при разработке как универсальных, так и информационно-поисковых систем управления. Однако его основным предназначением является использование при разработке систем управления объектами в реальном масштабе времени.

2. С повышением уровня алгоритмов и команд системы управления увеличивается её сложность и объём как используемой, так и результирующей информации. Причём количество используемых переменных при переходе на более высокий уровень увеличивается в несколько раз, однако темпы роста количества используемых переменных зависят от характера основной целевой задачи, решаемой управляемой системой. Информационная ёмкость различных переменных может существенно отличаться, поэтому иерархическая структура используемых и результирующих переменных является менее стройной, чем иерархическая структура алгоритмов.

3. Существенное влияние на рациональный состав разрабатываемой системы отладки оказывает количество и объём программных модулей, используемых для обеспечения требуемого функционирования. При разработке полной системы автоматизированной отладки сроки и трудоёмкость могут иметь очень большое значение, так как они способны внести корректировку в общий план работ по созданию общей системы управления. Одним из решений в данном случае будет являться использование системы сервисных программ для автоматизации отдельных технологических операций процесса разработки и отладки программных модулей системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Моисеев А. Л.* Автоматизированная система контроля электрических параметров питания узлов компьютерных сетей / А. Л. Моисеев, В. В. Шаров, Р. Р. Моисеева, Ю. Н. Зацаринная // Вестник Казанского технологического университета. — 2013. — Т. 16. — № 11. — С. 240–241.
2. *Бурнаев Е. В.* Об одной задаче многоканального обнаружения сигналов / Е. В. Бурнаев, Г. К. Голубев // Проблемы передачи информации. — 2017. — Т. 53. — № 4. — С. 69–83.
3. *Легков К. Е.* К вопросу организации управляющей информационной сети автоматизированных систем управления инфокоммуникационными системами и сетями специального назначения / К. Е. Легков // Информация и космос. — 2015. — № 2. — С. 12–15.
4. *Федулов В. А.* Программное обеспечение для отладки алгоритмов работы современных станций обзора и целеуказания / В. А. Федулов // Молодежный научно-технический вестник. — 2017. — № 5. — С. 8.
5. *Иванников А. Д.* Формирование отладочного набора тестов для проверки функций цифровых систем управления объектами / А. Д. Иванников // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2017. — Т. 18. — № 12. — С. 795–801. DOI: 10.17587/mau.18.795-801.
6. *Тельнова Е. В.* Хранение и обработка информации с помощью иерархических структур данных / Е. В. Тельнова, И. Н. Филоненко // Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона: науч.-практ. журнал коломенского института (филиала) МГМУ (МАМИ). — 2016. — № 1 (8). — С. 136–146.
7. *Щекочихин О. В.* Объектно-процессная модель данных в управляющих информационных системах / О. В. Щекочихин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2017. — Т. 17. — № 2. — С. 318–323. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-318-323.
8. *Петров Р. В.* Варианты аппаратной реализации унифицированных принципов построения устройств сопряжения интерфейсов корабельных и авиационных систем / Р. В. Петров, А. Б. Токмаков // Морская радиоэлектроника. — 2016. — № 1 (55). — С. 40–43.

9. Бахтенко Е. А. Исследования особенностей организации машинной памяти в рамках разработки алгоритма верификации символов на стороне сервера / Е. А. Бахтенко, Е. О. Баланин // Таврический научный обозреватель. — 2016. — № 8–2 (13). — С. 6–9.

10. Липатников В. С. Отладка алгоритмов обработки радиолокационных сигналов в системе GNU RADIO / Липатников В. С., Чинёнов Д. А. // Цифровая обработка сигналов. — 2015. — № 4. — С. 63–68.

REFERENCES

1. Moiseev, A.L., V.V. Sharov, R.R. Moiseeva, and Yu.N. Zatsarinnyaya. “Avtomatizirovannaya sistema kontrolya elektricheskikh parametrov pitaniya uzlov komp’yuternykh setei.” *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* 16.1 (2013): 240–241.

2. Burnaev, E.V., and G.K. Golubev. “Ob odnoi zadache mnogokanal’nogo obnaruzheniya signalov.” *Problemy peredachi informatsii* 53.4 (2017): 69–83.

3. Legkov, K.E. “K voprosu organizatsii upravlyayushchei informatsionnoi seti avtomatizirovannykh sistem upravleniya infokommunikatsionnymi sistemami i setyami spetsial’nogo naznacheniya.” *Informatsiya i kosmos* 2 (2015): 12–15.

4. Fedulov, V.A. “Programmnoe obespechenie dlya otladki algoritmov raboty sovremennykh stantsii obzora i tseleukazaniya.” *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik* 5 (2017): 8.

5. Ivannikov, A.D. “Formirovanie otladochnogo nabora testov dlya proverki funktsii tsifrovyykh sistem upravleniya ob’ektami.” *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* 18.12 (2017): 795–801. DOI: 10.17587/mau.18.795-801.

6. Telnova, E.V., and I.N. Filonenko. “Storage and processing of information using hierarchical data structures.” *Kompleksnye problemy razvitiya nauki, obrazovaniya i ekonomiki regiona: nauchno-prakticheskii zhurnal kolomenskogo instituta (filiala) MGMU (MAMI)* 1(8) (2016): 136–146.

7. Schekochikhin, O.V. “Object-process data model in management information systems.” *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 17.2 (2017): 318–323. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-318-323.

8. Petrov, R.V., and A.B. Tokmakov. “Variants of the hardware implementation for the unified aufbau principles of the interaction interface means intended for interaction of the shipborne and aircraft systems.” *Marine Radio-electronics* 1 (55) (2016): 40–43.

9. Bakhtenko, E.A., and E.O. Balanin. “Issledovaniya osobennosti organizatsii mashinnoi pamyati v ramkakh raz-rabotki algoritma verifikatsii simvolov na storone servera.” *Tavricheskiy nauchnyi obozrevatel’* 8-2(13) (2016): 6–9.

10. Lipatnikov, V.S., and D.A. Chinenov. “Otladka algoritmov obrabotki radiolokatsionnykh signalov v sisteme GNU RADIO.” *Tsifrovaya obrabotka signalov* 4 (2015): 63–68.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 16 мая 2018 г.

Received: May 16, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-647-657

AUTOMATING SEARCH OPTIMAL ROUTES AND GOODS FLOWS IN TRANSPORT NETWORKS MEANS THE INTEGER LINEAR PROGRAMMING

V. V. Saharov, I. A. Sikarev, A. A. Chertkov

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

It is shown that the integration of the transport industry in a unified system of domestic digital economy is becoming particularly urgent development of breakthrough digital technology to automate the information management processes in transport networks. Emphasizes that the automation functioning of transport systems if you have complex functional relationship should be based on new information technologies to reduce the cost and load tension traffic ensuring a minimum of transport work. It is noted that the main problem of modeling the transport networks is to develop models for adequate real logistics systems using computer methods of discrete combinatorial optimization, which should be flexible in regarding performed tasks quickly and with a small investment of time and resources to adapt to the changing directions of transport routes and conditions of operation of the logistics system. With a view to enhancing the effectiveness and quality of the logistic system proposed solution streaming tasks in such a system to produce the example transport network with complex topology in the form of a directed graph with various options the orientation of the rib by computer search optimal routes and cargo flows to achieve specified quality criteria. To obtain optimal solutions offers numerical algorithm and optimization procedure to reduce the time required to move the traffic from the source to the destination, according to the criterion of quality, by choosing the shortest routes in parts of the transport network. The effectiveness of the algorithm shows a specific example.

Keywords: logistic system, transport network, a weighted graph, the matrix, the matrix of weights, production matrix, shortest route, traffic, transport work, optimization, quality criterion.

For citation:

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.

УДК 621.396

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ И ГРУЗОВЫХ ПОТОКОВ В ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ СРЕДСТВАМИ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

В. В. Сахаров, И. А. Сикарев, А. А. Чертков

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

Показано, что в условиях интеграции транспортной отрасли в единую систему отечественной цифровой экономики особую актуальность приобретает разработка прорывных цифровых технологий для автоматизации информационно-управленческих процессов в транспортных сетях. Акцентируется внимание на том, что автоматизация процессов функционирования транспортных систем при наличии сложных функциональных связей должна базироваться на качественно новых информационных технологиях, позволяющих снизить грузонапряженность и себестоимость трафика перевозок с обеспечением минимума транспортной работы. Отмечается, что основной проблемой моделирования транспортных сетей является разработка моделей, адекватных реальным логистическим системам, с применением компьютерных методов дискретной комбинаторной оптимизации, которые должны быть гибкими в отношении выполняемых задач, быстро и с малыми затратами времени и ресурсов адаптироваться к изменяющимся

направлениям маршрутов перевозок и условиям функционирования логистической системы. С целью повышения эффективности и качества функционирования логистической системы предлагается решение потоковых задач в такой системе производить на примере транспортной сети со сложной топологией в форме ориентированного графа с различными вариантами ориентации ребер методами компьютерного поиска оптимальных маршрутов и грузовых потоков для достижения заданного критерия качества. Для получения оптимальных решений предлагаются вычислительный алгоритм и процедура оптимизации, позволяющие сократить время, необходимое на перемещения грузопотока из исходного в конечный пункт, согласно критерию качества, за счет выбора кратчайших маршрутов по звеньям транспортной сети. Эффективность применения алгоритма демонстрируется на конкретном примере.

Ключевые слова: логистическая система, транспортная сеть, взвешенный граф, матрица весов, производственная матрица, кратчайший путь, трафик, транспортная работа, оптимизация, критерий качества.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Поиск оптимальных, в частности, кратчайших маршрутов при управлении транспортными системами, а также технических, технологических и организационных решений, способствующих оптимизации трафика перевозки грузов с обеспечением минимума транспортной работы, связан с решением класса потоковых задач различной сложности. Такие задачи в транспортных сетях решаются методами исследования операций на графах, в частности, на основе известных рекурсивных алгоритмов Беллмана–Форда, Дейкстры, подробно рассмотренных в работах [1] – [3]. Не менее эффективными являются методы дискретной комбинаторной оптимизации, рассмотренные авторами в работах [4] – [5]. В исследовании операций к классу задач планирования трафика с выбором кратчайшего пути часто относят также задачи о замене оборудования, планировании выполнения работ, размещении предприятий и объектов инфраструктуры, планировании производства и др.

Важным механизмом совершенствования трафика перевозки грузов с позиций системности является комплекс наиболее эффективных научно обоснованных решений в данной предметной области, получаемых методами моделирования и алгоритмизации с применением инструментария вычислительных сред и компьютерных технологий соответствующего назначения для адаптации управления трафиком к изменяющимся условиям функционирования транспортной системы. Например, при различных направлениях трафика грузов по транспортной сети используются различные варианты ориентирования ребер (как прямое, так и обратное). Актуальность решения задач данной проблематики подтверждается усилением требований к менеджменту качества и обоснованности принимаемых решений по организации и управлению производством с учетом динамики соответствующих секторов рынка [6] – [7].

В работе приводятся результаты исследований авторов, связанные с моделированием и алгоритмизацией трафика перевозки грузов по сети на заданном временном интервале и определением наиболее эффективных вариантов перевозок в условиях ограничений. Алгоритмом предусматривается двухэтапное решение. На первом этапе определяются наикратчайшие пути доставки грузов из пунктов отправления в пункты назначения, причем схемы доставки грузов по сети генерируются на допустимом множестве комбинаций трафика. Ограничения задаются в форме балансовых уравнений для каждого узла с учетом входных и выходных потоков. На втором этапе моделируется процесс доставки грузов с учетом имеющихся запасов в каждом пункте отправления и требуемого количества грузов в пунктах назначения. Поиск наилучшего варианта доставки осуществляется с использованием производственной матрицы маршрутизации грузов методом линейного программирования. Алгоритм реализации трафика предусматривает расчет

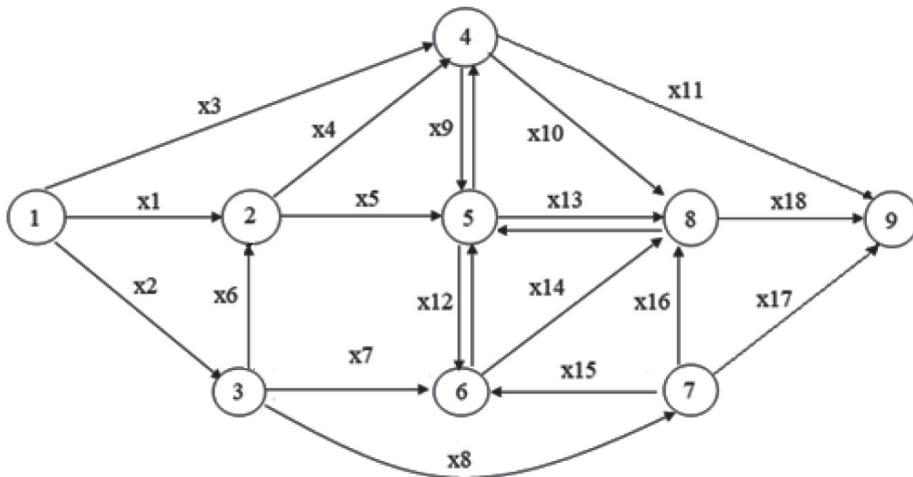
объемов следования грузов по каждой ветви транспортной сети и введение ограничений с учетом ее пропускной способности. Для транспортируемых однородных грузов модель должна предусматривать выбор маршрутов доставки, обеспечивающих минимум суммарной транспортной работы, традиционно измеряемой как произведение объема перевозок на расстояние доставки.

Поскольку многие потоковые задачи являются многокритериальными, существенно усложняется поиск оптимальных решений, основанных, как правило, на принятии некоторых компромиссных оценок, которые, вообще говоря, могут не отвечать оптимуму ни по одному из критериев. Кроме того, часто приходится принимать во внимание нелинейный характер ряда эксплуатационных показателей сети и параметров ее модели, которые оцениваются методами параметрической и структурной идентификации по эксперименту.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Вычислительный алгоритм. Пусть некоторая транспортная сеть задана в виде взвешенного графа, приведенного на рисунке, где каждой дуге (ребру) соответствует определенное расстояние. Необходимо найти кратчайший путь для перевозки грузов из i -го узла транспортной сети в заданный j -й узел [8]. При построении модели и вычислительного алгоритма в сети с заданной топологией сначала выбирают узлы (порты отправления и назначения), затем определяют целевую функцию, вводят ограничения в форме матричных уравнений: равенств и неравенств, устанавливают требуемые нижнюю и верхнюю границы вектора переменных состояния, размерность которого равна числу дуг графа.

Согласно процедуре вычислительного алгоритма, элементы вектора, соответствующие нижней границе, не должны принимать отрицательных значений. Для выполнения вычислительных операций на первом этапе в структуре алгоритма предусматривается обращение к функции линейного программирования *intlinprog* инструментария Optimization Toolbox вычислительной среды MatLAB [9] – [10]. На втором этапе для решения задачи о назначениях используется функция *linprog* [11] – [12]. Подготовка данных и ввод информации осуществляются при соблюдении синтаксиса функций. Поиск минимума транспортной работы на маршрутах, содержащих дуги (ребра) с двумя направлениями, выполняют в цикле, представляющем все возможные варианты, определяемые с использованием булевых функций, из которых выбирают наиболее подходящие решения. В отличие от существующих алгоритмов, в предлагаемом алгоритме ограничения трафика определяют численными оценками критерия качества, получаемыми на первом этапе для всех допустимых условий функционирования сети.



Расчетная схема транспортной сети

Кроме того, в отличие от известных рекурсивных алгоритмов Беллмана–Форда, Дейкстры и др., строящихся на пошаговых процедурах динамической оптимизации [1] – [2], авторам удалось

получить оптимальные решения данной задачи с помощью инструментария *intlinprog* целочисленного линейного программирования без использования пошаговых процедур в процессе вычислений. Это позволило избежать сложностей вычислительных процедур и временных затрат, возрастающих в степени 2^n , где n — количество вершин в графе.

Для построения сетевой модели и алгоритма в работе используется математический аппарат дискретного программирования, в котором искомые переменные принимают только целочисленные или логические (булевы или бинарные) значения: нуль или единицу [10]. Построим без потери общности математическую модель и алгоритм применительно к транспортной сети (см. рисунок), представленной в виде взвешенного неориентированного графа, который состоит из девяти узлов (вершин) и 18 дуг (ребер). Определим кратчайшие пути от узлов 1, 2, 3 к узлам 8, 9. Численные значения ребер (дуг) взвешенного графа приведены в столбцах табл. 1.

Таблица 1

Матрица весов ребер исходного графа

Вершины	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Исток	$x_1=1$	$x_2=4$	$x_3=6$	—	—	—	—	—
2	—	—	—	$x_4=3$	$x_5=5$	—	—	—	—
3	—	$x_6=3$	—	—	—	$x_7=5$	$x_8=7$	—	—
4	—	—	—	—	$x_9=1$	—	—	$x_{10}=4$	$x_{11}=5$
5	—	—	—	$x_9=1$	—	$x_{12}=1$	—	$x_{13}=2$	—
6	—	—	—	—	$x_{12}=1$	—	—	$x_{14}=3$	—
7	—	—	—	—	—	$x_{15}=4$	—	$x_{16}=7$	$x_{17}=6$
8	—	—	—	—	$x_{13}=2$	—	—	—	$x_{18}=2$
9	—	—	—	—	—	—	—	—	Сток

Матрицу инцидентий заполним по следующему правилу: каждый ее элемент S_{ij} , соответствующий n_i -й строке и n_j -му столбцу, равен:

$$S_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } x_j\text{-я дуга не инцидентна вершине } n_i; \\ -1, & \text{если } x_j\text{-я дуга инцидентна вершине } n_i\text{-й вершине и исходит из нее;} \\ +1, & \text{если } x_j\text{-я дуга инцидентна вершине } n_i\text{-й вершине и входит в нее.} \end{cases}$$

Используя это правило, образуем матрицу инцидентий и представим ее в форме, удобной для выполнения дальнейших расчетов. Полученная матрица для ориентированного графа (см. рис. на с. 649) имеет вид:

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}
1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	1	0	0	0	-1(1)	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	1(-1)	0	0	-1(1)	-1(1)	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1(-1)	0	-1	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1(-1)	1		1	0	-1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1

Найдем кратчайшие пути от вершины 1 до всех остальных вершин. С этой целью используем аппарат математического программирования для исследования линейной модели с вектором состояния x , содержащим бинарные переменные с индексами дуг:

$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14} \ x_{15} \ x_{16} \ x_{17} \ x_{18}]^T$
 и целевой функцией

$$J = \min_x (f \cdot x), \quad (1)$$

где f — вектор-строка с «весовыми» коэффициентами:

$$f = [1 \ 4 \ 6 \ 3 \ 5 \ 3 \ 5 \ 7 \ 1 \ 4 \ 5 \ 1 \ 2 \ 4 \ 3 \ 7 \ 6 \ 2].$$

Минимизацию функции (1) выполним при соблюдении линейных ограничений-равенств, представленных в матричной форме. Ограничения составим по уравнениям баланса потоков в каждом узле транспортной сети:

$$Sx = B,$$

или

$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1(1) & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1(-1) & 0 & 0 & -1(1) & -1(1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1(-1) & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1(-1) & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot x = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

где вектор B в модели (2) определяется из условий баланса потоков в соответствующих узлах графа.

При принятых обозначениях направлений потоков имеем:

- для узла-источника — «Выход – Вход» = -1;
- для промежуточных узлов — «Выход – Вход» = 0;
- для узла-стока — «Выход – Вход» = +1;
- все неизвестные — неотрицательные переменные.

В общем случае, при различных направлениях трафика грузов по транспортной сети, отдельные ребра графа могут иметь разные направления (как прямое, так и обратное). Такими ребрами, как следует из расчетной схемы, показанной на рисунке, являются ребра x_9 , x_{12} и x_{13} . Эти пути помечены стрелками с прямым и обратным направлениями. При составлении вычислительного алгоритма и реализации процедуры минимизации функции цели для них выбрано восемь вариантов ориентирования (табл. 2), определяемых двумя бинарными переменными.

Таблица 2

Варианты ориентирования ребер x_{34} , x_{35}

Номер варианта	Вершина 4	Вершина 5			Вершина 6	Вершина 8
	ребро x_9	ребро x_9	ребро x_{12}	ребро x_{13}	ребро x_{12}	ребро x_{13}
1	1	-1	-1	-1	1	1
2	-1	1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1
4	-1	1	1	-1	-1	1
5	1	-1	-1	1	1	-1
6	-1	1	-1	1	1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1
8	-1	1	1	1	-1	-1

Среди множества решений системы (2) требуется найти такой неотрицательный результат, который доставляет минимум целевой функции (1).

Таблица 3

Расчетные значения наикратчайших маршрутов трафика перевозки грузов

Начало	Конец	Наикратчайший путь	Расстояние
1	8	$S = [x1\ x4\ x9\ x13] = [1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$	$J_{18} = 7$
1	9	$S = [x1\ x4\ x11] = [1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$	$J_{19} = 9$
2	8	$S = [x4\ x9\ x13] = [0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$	$J_{28} = 6$
2	9	$S = [x4\ x11] = [0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$	$J_{29} = 8$
3	8	$S = [x7\ x12\ x13] = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$	$J_{38} = 8$
3	9	$S = [x7\ x12\ x13\ x18] = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]$	$J_{39} = 10$

На втором этапе с помощью алгоритма решается задача распределения грузов, содержащихся в пунктах отправления (узлы 1, 2, 3), по потребителям (пунктам назначения), расположенным в узлах 8 и 9. Решения основываются на данных, приведенных в табл. 3. Рассматривается процесс полной доставки грузов в пункты назначения при отсутствии накопителей на пути их следования. Расчеты выполняются на основе производственной матрицы второго этапа, представленной в табл. 4. В ней приведены узлы отправления грузов, расположенные в левом столбце, и узлы приема (назначения) грузов, указанные в верхней строке. Видно, что весовыми коэффициентами производственной матрицы являются данные, представляющие собой минимальные расстояния между соответствующими узлами отправления и приема грузов, содержащиеся в четвертой графе табл. 3. Объемы поставок указаны в четвертой графе табл. 4, а объемы потребления — в нижней строке данной таблицы. Эти данные соответствуют условиям задачи трафика по сети с топологией, приведенной на рисунке (см. с. 169).

Таблица 4

Производственная матрица плана перевозок грузов по сети

Узлы отправления грузов	Узлы приема грузов		Объемы поставок, т
	8	9	
1	7	9	40
2	6	8	35
3	8	10	25
Объемы потребления	30	70	

Определение плана перевозок по оптимальным маршрутам транспортной сети выполним с помощью линейного программирования. Цель планирования состоит в минимизации транспортной работы по алгоритму трафика. Введем вектор состояния y , элементами которого являются объемы перевозок между узлами отправления и приема грузов (см. табл. 4) с аналогичной индексацией:

$$y = [y_{18}\ y_{19}\ y_{28}\ y_{29}\ y_{38}\ y_{39}]^T.$$

Подготовим данные для использования функции *linprog* инструментария Optimization Toolbox. Согласно синтаксису функции, на основании производственной матрицы (см. табл. 4) получим

$$f1 = [7\ 9\ 6\ 8\ 8\ 10].$$

При отсутствии ограничений-неравенств численные значения $A1$, $b1$ приравняем «пустым» матрицам. Ограничения-равенства представим выражениями:

$$A1eq = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad b1eg = [40 \ 35 \ 25 \ 30 \ 70]^T.$$

Введем ограничения на переменные состояния: нижняя граница $lb1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ и верхняя граница $ub1 = []$. Тогда вычисления с использованием функции *linprog* приводят к следующему результату:

$$y_{opt} = [0 \ 40 \ 30 \ 5 \ 0 \ 25]^T.$$

Объем минимальной транспортной работы (при условии, что расстояния измеряются в километрах, а перевозимые грузы в тоннах) составляет

$$J1 = 830 \text{ т-км.}$$

Загрузку звеньев сети, соответствующую расчетному режиму по алгоритму, представим вектором

$$x_{opt} = [x_{12} \ x_{13} \ x_{14} \ x_{24} \ x_{25} \ x_{32} \ x_{36} \ x_{37} \ x_{45} \ x_{48} \ x_{49} \ x_{56} \ x_{58} \ x_{68} \ x_{76} \ x_{78} \ x_{79} \ x_{89}]^T = \\ = [40 \ 0 \ 0 \ 75 \ 0 \ 0 \ 25 \ 0 \ 30 \ 0 \ 45 \ 25 \ 55 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 25]^T.$$

Результаты (Results)

На основе разработанного алгоритма получены решения, сведенные в табл. 5.

Таблица 5

План перевозок по оптимальным маршрутам транспортной сети

Узлы отправления грузов	Узлы приема грузов		Объемы поставок
	n_6	n_7	
n_1	$y_{16}=0$	$y_{17}=40$	40
n_3	$y_{36}=30$	$y_{37}=5$	35
n_4	$y_{46}=0$	$y_{47}=25$	25
Объемы потребления	30	70	

Обсуждение (Discussion)

Таким образом, предложен алгоритм трафика перевозки грузов в сетях с ограниченными ресурсами, базирующийся на экстремальных решениях, получаемых методами исследования операций с использованием компьютерных вычислительных средств и способов количественной оценки принимаемых решений. Предложенная модель поиска кратчайших маршрутов и расчета оптимального трафика перевозки грузов по минимуму транспортной работы задана уравнениями функции цели и ограничениями в форме балансовых уравнений с учетом входных и выходных потоков для каждого узла сети при соответствующих граничных условиях. Введены бинарные переменные состояния, что позволило фиксировать принадлежность каждой заданной операции (дуги) соответствующему кратчайшему пути и использовать для расчетов функции линейного программирования, содержащиеся в инструментарии Optimization Toolbox среды MatLAB.

Выводы (Summary)

1. Корректность и эффективность предложенных алгоритмических решений подтверждены на примере автоматизации поиска кратчайших маршрутов и расчетов оптимального трафика

перевозки грузов с полным анализом возможных вариантов, а также проведением машинного эксперимента.

2. Приведенный алгоритм может быть использован не только для автоматизации и оптимизации логистических систем на водном транспорте, но и в телекоммуникационных системах пакетной передачи данных [14], в системах оптимизации маршрутных карт [13], а также в системах автоматизации и управления технологическими процессами высокой размерности различного назначения [15] – [16].

3. Реализация управления трафиком по алгоритму, обеспечивающему минимум транспортной работы, предусматривает уменьшение потребления топлива на перевозки, что также определяет практическую ценность предлагаемых решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. *Чертков А. А.* Рекурсивный метод оптимизации логистических путей средствами MATLAB / А. А. Чертков, А. А. Вардомская, А. А. Дмитриев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34) — С. 196–204. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-196-204.

3. *Сахаров В. В.* Алгоритм оптимального планирования группового взаимодействия роботов / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Д. С. Тормашев // Морской Вестник. — 2014. — № 4. — С. 119–122.

4. *Сахаров В. В.* Алгоритм трафика перевозки грузов с обеспечением минимума транспортной работы / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, А. А. Дмитриев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 180–188. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-180-188.

5. *Чертков А. А.* Автоматизация определения критического пути в логистической системе / А. А. Чертков, А. А. Вардомская, А. А. Дмитриев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5(33). — С. 194–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-194-200.

6. *Гузаиров М. Б.* Моделирование транспортной сети поставок в строительной индустрии / М. Б. Гузаиров, В. А. Тарасова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2008. — Т. 10. — № 2. — С. 58–63.

7. *D' Ambrosio C.* Mathematical programming techniques in water network optimization / C. D' Ambrosio, A. Lodi, S. Wiese, C. Bragalli // European Journal of Operational Research. — 2015. — Vol. 243. — Is. 3. — Pp. 774–788. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.12.039.

8. *Бояринцева Т. И.* Теория графов: методические указания к выполнению домашнего задания по курсу «Дискретная математика» / Т. И. Бояринцева, А. А. Мاستихина. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 40 с.

9. *Рассел Д.* Диаграмма состояний (теория автоматов) / Д. Рассел. — Изд-во VSD, 2012. — 96 с.

10. *Харари Ф.* Теория графов / Ф. Харари; пер. с англ. и предисл. В. П. Козырева; под ред. Г. П. Гаврилова. — Изд. 2-е. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 296 с.

11. *Зарилова Э. Р.* Дискретная математика. Ч. III: Теория графов / Э. Р. Зарилова, М. Г. Кокотчикова. — М.: Изд-во РУДН, 2013. — 179 с.

12. *Reich D.* A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints / D. Reich // European Journal of Operational Research. — 2013. — Vol. 230. — Is. 3. — Pp. 487–494. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.04.049.

13. *Bozhenyuk A.* The method of the maximum flow determination in the transportation network in fuzzy conditions / A. Bozhenyuk, I. Rozenberg, E. Rogushina // Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies «IS&IT'11». — М.: Physmathlit, 2011. — Vol. 4. — Pp. 17–24.

14. *Dutta D.* Multi-choice goal programming approach for a fuzzy transportation problem / D. Dutta, S. Murthy // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. — 2010. — Vol. 2. — Pp. 132–139.

15. *Kumar A.* Generalized Simplex Algorithm to Solve Fuzzy Linear Programming Problems with Ranking of Generalized Fuzzy Numbers / A. Kumar, P. Singh, J. Kaur // Turkish Journal of Fuzzy Systems. — 2010. — Vol. 1. — No. 2. — Pp. 80–103.

16. Kumar A. Fuzzy Optimal Solution of Fully Fuzzy Linear Programming Problems with Inequality Constraints / A. Kumar, J. Kaur, P. Singh // *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences*. — 2010. — Vol. 6. — Pp. 37–41.

REFERENCES

1. 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.
2. Chertkov, Alexandr Alexandrovich, Anna Alexandrovna Vardomsкая, and Alexandr Alexandrovich Dmitriev. “A recursive method of optimization of the logistic ways by means of MATLAB”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 196–204. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-196-204.
3. Saharov, V.V., A.A. Chertkov, and D.S. Tormašev. “Optimal planning group communication Algorithm of robots.” *Morskoy Vestnik* 4 (2014): 119–122.
4. Saharov, Vladimir Vasilevich, Alexandr Alexandrovich Chertkov, and Alexandr Alexandrovich Dmitriev. “Ensuring minimum transport work algorithm for goods traffic”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 180–188. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-180-188.
5. Chertkov, Alexandr Alexandrovich, Anna Alexandrovna Vardomsкая, and Alexandr Alexandrovich Dmitriev. “Automation to define critical way in logistical system”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 194–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-194-200.
6. Guzairov, M.B., and V.A. Tarasova. “Modelirovanie transportnoi seti postavok v stroitel’noi industrii.” *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* 10.2 (2008): 58–63.
7. D’Ambrosio, Claudia, A. Lodi, S. Wiese, and C. Bragalli. “Mathematical programming techniques in water network optimization.” *European Journal of Operational Research* 243.3 (2015): 774–788. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.12.039.
8. Boyarintseva, T.I., and A.A. Mastikhina. *Teoriya grafov: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu domashnego zadaniya po kursu «Diskretnaya matematika»*. M.: MGTU im. N.E. Baumana, 2014.
9. Rassel, D. *Diagramma sostoyanii (teoriya avtomatov)*. Izd-vo: VSD, 2012.
10. Kharari, F. *Teoriya grafov*. Edited by G. P. Gavrilov. 2nd ed. M.: Editorial URSS, 2003.
11. Zaripova, E.R., and M.G. Kokotchikova. *Diskretnaya matematika. Chast’ III. Teoriya grafov*. M.: Izd-vo RUDN, 2013.
12. Reich, Daniel. “A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints.” *European Journal of Operational Research* 230.3 (2013): 487–494. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.04.049.
13. Bozhenyuk, A., I. Rozenberg, and E. Rogushina. “The method of the maximum flow determination in the transportation network in fuzzy conditions.” *Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies «IS&IT’11»*. Vol. 4. M.: Physmathlit, 2011. 17–24.
14. Dutta, Debashis, and Satyanarayana Murthy. “Multi-choice goal programming approach for a fuzzy transportation problem.” *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences* 2 (2010): 132–139.
15. Kumar, Amit, Pushpinder Singh, and Jagdeep Kaur. “Generalized simplex algorithm to solve fuzzy linear programming problems with ranking of generalized fuzzy numbers.” *Turkish Journal of Fuzzy Systems* 1.2 (2010): 80–103.
16. Kumar, Amit, Jagdeep Kaur, and Pushpinder Singh. “Fuzzy optimal solution of fully fuzzy linear programming problems with inequality constraints.” *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences* 6 (2010): 37–41.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сахаров Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: _saharov_@rambler.ru,
SaharovVV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saharov, Vladimir 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: _saharov_@rambler.ru,
SaharovVV@gumrf.ru

Сикарев Игорь Александрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: sikarev@yandex.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru

Чертков Александр Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru

Sikarev, Igor A. —
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: sikarev@yandex.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru

Chertkov, Alexandr A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 16 мая 2018 г.
Received: May 16, 2018.*

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 10. № 3

2018 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Редактор *Т. В. Середова*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*
Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 22.06.18. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 24,5. Тираж 500 экз. Заказ № 238/2018

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7