Морской Вестник

№4(92)
декабрь
2 0 2 4
ISSN 1812-3694

Morskoy Vestnik

Честь. Флот. Отечество.

1910

1995

115 лет со дня создания
30 лет со дня возрождения

Санкт-Петербургское Морское Собрание

ИНДУСТРИЯ 4.0 НА ПРИМЕРЕ ЗАВОДА «АРМАЛИТ»

Пресс-служба АО «Машиностроительный завод «Армалит»,
контакт. тел. (812) 603 4077, доб. 10118

АРМАЛИТ

В ноябре на площадке АО «Машиностроительный завод «Армалит» состоялось открытое заседание Комитета по информационным технологиям и цифровой экономике и Комитета по финансовым рынкам Санкт-Петербургской торгово-промышленной палаты (СПБ ТПП).

Центральной темой встречи стало внедрение цифровых технологий в сквозной производственный процесс, а также экономические и организационные инструменты поддержки промышленных предприятий Петербурга, льготные займы на приобретение оборудования Фонда развития промышленности Санкт-Петербурга, промышленная ипотека и другие.

Большой интерес участников заседания вызвал доклад генерального директора предприятия Михаила Смаковского.

– Приятно видеть в гостях у «Армалита» представителей ведущих компаний, экспертов и профессионалов, готовых к диалогу и обмену опытом. Мы обсудим ключевые темы, связанные с развитием цифровой экономики, инновационных решений в области информационных технологий и финансовых инструментов, способствующих развитию бизнеса. Уверен, мероприятие станет знаковым на пути цифровизации производства в современной действительности, – приветствовал собравшихся Михаил Сергеевич.

Генеральный директор АО «Армалит» М. С. Смаковский рассказал о росте производительности труда на предприятии

В презентации «Индустрия 4.0. Внедрение современных систем мониторинга производственных процессов на машиностроительных предприятиях сферы ВПК на примере производственной базы АО «Армалит» руководитель предприятия подробно рассказал о внедрении цифровых технологий, пошагово останавливаясь на каждом этапе прохождения заказа.

Вопросы планирования производства и системы оценки загрузки мощностей, внедрение программы мониторинга работы оборудования Winnum, синхронизация мониторинговой системы и программного обеспечения, получение сотрудниками на местах производственных заданий на планшеты через мобильное приложение, работа по привлечению и удержанию персонала на предприятии, интегрирование инструментов «Бережливого производства» и повышение производительности труда – эти и другие примеры из практики, которая давно привычна на «Армалите», стали предметом дискуссии участников заседания.

Рост производительности на предприятии во многом обусловлен тем, что свыше 90 заводчан прошли обучение на Фабрике процессов «Регионального центра компетенций». В целом за последние 5 лет «Армалит» стал участником порядка 200 обучающих программ, направленных на повышение производительности труда.

В завершение встречи заместитель председателя Комитета по промышленной политике, инновациям и торговле Санкт-Петербурга Алексей Яковлев и президент СПБ ТПП Владимир Катенёв поблагодарили всех за открытый и честный диалог и высоко оценили опыт работы «Армалита» с инновационными решениями.

Всего в заседании приняли участие более 70 представителей предприятий и организаций города, которые выразили уверенность, что внедрение цифровизации в производстве способствует росту производительности и содействует развитию экономики Санкт-Петербурга. ■

Участники заседания, посвященного эффективности внедрения современных технологий в производственный процесс на примере завода «Армалит»

Морской Вестник
Morskoy Vestnik
№4(92)
декабрь
2024
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Редакционный совет
Сопредседатели:
М.В.Александров, генеральный директор АО «ЦТСС», президент Ассоциации судостроителей СПб и ЛО
А.Л. Кашин, председатель совета директоров АО «НПО Завод «Волна»
В.С. Никитин, президент Международного и Российского НТО судостроителей им. акад. А.Н. Крылова
Г.А. Туричин, ректор СПбГМТУ
Члены совета:
А.А. Асланян, генеральный директор АО «НПФ «Меридиан»
И.Ю. Бурцев, исполнительный директор ЗАО «ЦНИИ СМ»
Н.М.Вихров, генеральный директор ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»
В.Э. Гель, генеральный директор АО «УК «Радиостандарт»
К.Г. Голубев, генеральный директор АО «ЦМКБ «Алмаз»
К.В.Гольдибаев, генеральный директор АО «ПКБ «РИО»
В.А. Долгих, генеральный директор АО «НТИ «Радиосвязь»
В.Ю. Дорофеев, генеральный директор АО «СПМБМ «Малахит»
М.В.Захаров, генеральный директор ООО «Пумори-северо-запад»
П.А. Зубков, генеральный директор ООО «МКС»
С.Н. Ирютин, председатель Санкт-Петербургского Морского Собрания
Э.А. Конов, директор ООО Издательство «Мор Вест»
Г.А. Коржавин, научный руководитель АО «Концерн «Гранит-Электрон»
А.В. Кузнецов, председатель совета директоров АО «Армалит»
Л.Г. Кузнецов, генеральный конструктор АО «Компрессор»
Н.В. Кулык, генеральный директор АО «НПО Завод «Волна»
Г.Н. Муру, генеральный директор АО «51 ЦКТИС»
И.М. Мухутдинов, генеральный директор ПАО «СФ «Алмаз»
О.А. Остапко, генеральный директор АО «Северное ПКБ»
В.А. Середохо, генеральный директор АО «СНСЗ»
К.А. Смирнов, генеральный директор АО «МНС»
И.С. Суховинский, директор ООО «ВИНЕТА»
В.С. Татарский, генеральный директор АО «ЭРА»
С.Г. Филимонов, генеральный директор АО «Концерн Морфлот»
К.Ю. Шилов, генеральный директор АО «Концерн «НПО «Аврора»
И.В. Щербаков, генеральный директор ООО ПКБ «Петробалт»

СОДЕРЖАНИЕ

Индустрия 4.0 на примере завода «Армалит» 1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

К.В. Антонов, А.В. Кошелев, А.И. Кокурин, В.А. Антонов. *О целесообразности применения din-профилей на транспортных судах. Вопросы снижения массы конструкций, трудоемкости и стоимости постройки судов* 7

С.Н. Гречин, Н.С. Григорьев. *Вертолетные обслуживающие системы на кораблях ведущих стран мира в сравнении с устройствами транспортировки корабельных вертолетов ВМФ РФ. Часть 1* 11

П.А. Зубков. *Оценка влияния инновационных технических решений ООО «МКС» на живучесть корабля с использованием логико-вероятностных методов* 23

О.В. Третьяков, М.В. Шебуняев, П.И. Щукин, А.И. Гайкович. *О влиянии прибли-жений элементов суперматрицы на решение задач методом аналитических сетей* 26

А.Р. Тогуняц, С.Л. Анчиков, Л.И. Вишневский. *О работе лопастных движителей на швартовном режиме* 29

А.А. Крюков. *Цифровое макетирование судовых систем* 33

В.В. Ефимов, А.С. Скрыпка, Е.В. Шишенин. *Автономное судоходство в России: состояние, проблемы, предложения* 35

П.А. Васильев. *Памяти А.Ф. Шлемова* 41

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Л.В. Гукова, Е.А. Логинова, А.В. Протасов, Л.Л. Соколов, В.Г. Юрьев. *Опыт разработки и применения цифровых двойников устройств абразивной обработки изделий судового машиностроения* 42

Д.И. Гомонов, Г.Я. Кремлёв. *Цифровизация судоремонтного предприятия* 44

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

А.Н. Дядик, В.А. Дядик, Д.С. Маловик. *Определение характеристик энергетического отсека с электрохимическим генератором для автономного необитаемого аппарата большой дальности* 49

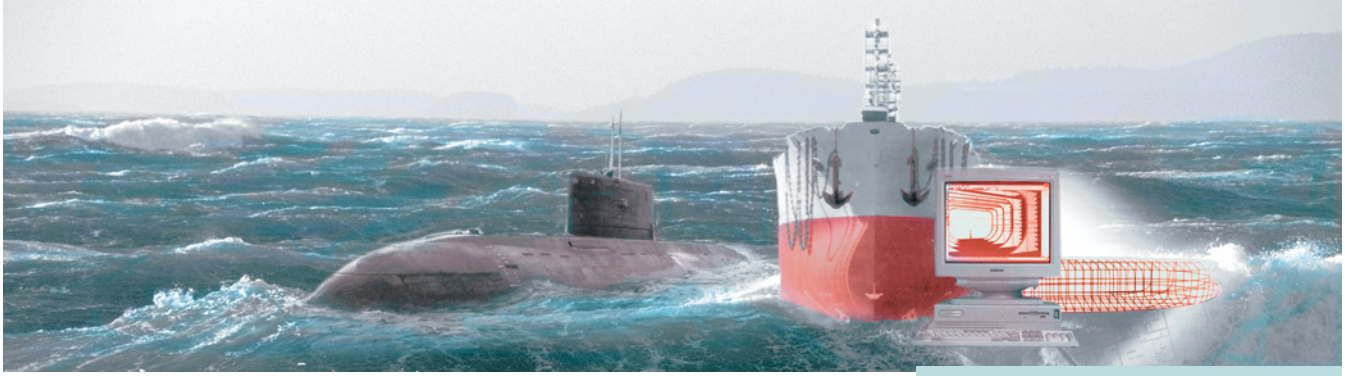
К.Г. Голубев, В.В. Барановский, К.А. Ефремов. *Перспективы развития энергетики кораблей будущего. Анализ технических решений* 56

Д.Л. Аверьянов, А.В. Сихимбаев. *Кингстоны цистерн главного балласта со встроенным пневмопружинным приводом* 61

Р.Р. Хотский, А.В. Бураков. *Разработка и внедрение устройства робастного экспоненциального прогнозирования технического состояния судовых поршневых компрессоров* 65

А.Е. Усов, Г.С. Коленько. *Численное моделирование конденсации пара в технологическом конденсаторе энергетической установки с помощью CAE-пакетов* 71

Н.А. Грибенюк, А.Н. Осин. *Метод определения угла скручивания сменного элемента подъема* 73



В.Р. Ефремов, А.А. Иванов. *Разработка программы проведения теплового и нейтронно-физического расчетов судовых водо-водяных ядерных реакторов* 76

А.Н. Дядик, В.А. Дядик, Д.С. Маловик. *Особенности работы холодильника в одноконтурной схеме ядерной газотурбинной установки* 78

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Б.Ю. Семёнов. *Контроль магнитных моментов низкочастотного электромагнитного поля корабельного электрооборудования с использованием дифференциальной методики компенсации помехи* 83

А.Ю. Степкин, В.А. Казначеев, Я.А. Демидов. *Развитие антенной техники надводных кораблей* 87

А.С. Батурин, А.Н. Киченко, В.Э. Гель. *Анализ моделей распространения радиоволн в декаметровом диапазоне, применяемых при проектировании средств радио-связи* 89

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

С.М. Доценко, Д.В. Звездарёв, А.А. Бенгерт, С.И. Биденко, Д.И. Якушев, Е.А. Рылов, И.А. Полковников. *Моделирование морской транспортной системы в условиях многофакторных рисков* 95

И.М. Жданова, С.С. Дворников, С.В. Дворников. *Модель возникновения аномалий в демодулированном трафике абонентских терминалов VSAT* 101

К.С. Дементьев, В.Н. Кондратьев, К.А. Смирнов. *Имитационное моделирование в системе обучения пилотов телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов* 105

А.Н. Киченко. *Типы сигналов, исследуемые системами радиомониторинга* 107

Е.К. Самаров. *Экспериментальные исследования амплитудного квантователя со стабилизированным порогом при воздействии помех, вызванных волнением поверхности моря* 109

О.Г. Мальцев. *Системный подход к назначению управляемых снарядов в залп с кораблей тактической группы* 113

Е.К. Самаров, Я.Ю. Ионченкова. *Вероятностные и энергетические характеристики гармонических сигналов, которые принимаются корабельными радиоприемными устройствами, модулированных нормальными случайными процессами* 118

С.В. Дворников, С.А. Якушенков, В.К. Снежко. *Математическая модель оценки структурной связности радиотехнических систем морского базирования* 120

В АССОЦИАЦИИ СУДОСТРОИТЕЛЕЙ

В.В. Горелов. *Итоги собрания Ассоциации судостроителей Санкт-Петербурга и Ленинградской области* 122

В МОРСКОМ СОБРАНИИ

С.Н. Ирютин. *Санкт-Петербургскому Морскому собранию 115 лет со дня создания и 30 лет со дня возрождения* 124

Главный редактор
Э.А. Конов, канд. техн. наук
Зам. главного редактора
Д.С. Глухов
Тел.: (812) 600 4586
Факс: (812) 600 4586
E-mail: morvest@gmail. com
www. morvest. ru
Редакционная коллегия
Г.Н. Антонов, д-р. техн. наук, доцент
В.В. Барановский, д-р техн. наук, проф.
Е.И. Глушанков, д-р техн. наук, проф.
Е.А. Горин, д-р эконом. наук, проф.
С.В. Дворников, д-р техн. наук, проф.
В.Н. Илюхин, д-р техн. наук, проф.
Б.П. Ионов, д-р техн. наук, проф.
Д.В. Казунин, д-р техн. наук
Р.Н. Караев, канд. техн. наук
В.В. Кобзев, д-р техн. наук, проф.
Ю.Н. Кормилицин, д-р техн. наук, проф.
П.А. Кротов, д-р истор. наук, проф.
Д.И. Кузнецов, д-р техн. наук, доцент
П.И. Малеев, д-р техн. наук
Д.В. Никущенко, д-р техн. наук
Ю.Ф.Подоплёкин, д-р техн. наук, проф., акад. РАРАН
В.Н. Половинкин, д-р техн. наук, проф.
А.В. Пустошный, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАН
А.А. Родионов, д-р техн. наук, проф.
К.В. Рождественский, д-р техн. наук, проф.
Н.В. Савищенко, д-р техн. наук, проф.
А.Б. Фомичёв, д-р техн. наук, проф.
В.И. Черненко, д-р техн. наук, проф.
Редакция
Тел./факс: (812) 600 4586
E-mail: morvest@gmail. com
Редактор
Т.И. Ильичёва
Дизайн, верстка
С.А. Кириллов, В.Л. Колпакова

Адрес редакции
190068 Санкт-Петербург,
наб. реки Мойки, 84, пом. 13Н
Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12047 от 11 марта 2002 г.
Учредитель-издатель
ООО Издательство «Мор Вест»,
190068, Санкт-Петербург,
наб. реки Мойки, 84, пом. 13Н
Электронная версия журнала
размещена на сайте ООО «Научная электронная библиотека» www. elibrary. ru и включена в Российский индекс научного цитирования
Решением Президиума ВАК журнал «Морской вестник» включен в перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. www.perechen.vak2.ed.gov.ru
Подписка на журнал «Морской вестник»
(индекс ПМ 467) может быть оформлена по каталогу Почты России «Подписные издания» или непосредственно в редакции журнала через издательство «Мор Вест»
Отпечатано в ООО «Сфера»
Адрес типографии: 190005, Санкт-Петербург, ул. Егорова, д. 26а, литер Б.
Тираж 250 экз. Заказ №13277
Дата выхода в свет – 10.12. 2024
Каталожная цена – 675,42 руб.

Ответственность за содержание информационных и рекламных материалов, а также за использование сведений, не подлежащих публикации в открытой печати, несут авторы и рекламодатели. Перепечатка допускается только с разрешения редакции

Морской Вестник
Morskoy Vestnik
№4(92)
December
2024
SCIENTIFIC, ENGINEERING, INFORMATION AND ANALYTIC MAGAZINE

Editorial Council

Co-chairman:
M.V. Alexandrov, General Director JSC SSTC, President of the Association of Shipbuilders of St. Petersburg and Leningrad Region
A.L. Kashin, chairman of the board of directors JSC NPO Zavod Volna
V.S. Nikitin, President of the International and Russian Scientific and Technical Association of Shipbuilders named after Acad. A.N. Krylov
G.A. Turichin, Rector SPbSMTU
Council Members:
A.A. Aslanyan, General Director JSC RPF Meridian
I.Yu. Burtsev, Acting Director JSC CRIME
V.A. Dolgikh, General Director JSC NTI Radiosvyaz
V.Yu. Dorofeev, General Director JSC SPMDB Malachite
S.G. Filimonov, General Director JSC Concern Morflot
V.E. Gel, General Director JSC MC Radiostandart
K.V. Gol'dibaev, General Director JSC PKB RIO
K.G. Golubev, General Director JSC Almaz CMDB
S.N. Iryutin, Chairman St. Petersburg Marine Assembly
E.A. Konov, Director JSC Publishing House Mor Vest
G.A. Korzhavin, Scientific Director JSC Concern Granit-Elektron
N.V. Kulyk, General Director JSC NPO Zavod Volna
A.V. Kuznetsov, chairman of the board of directors JSC Armalit
L.G. Kuznetsov, General Designer JSC Compressor
I.M. Mukhutdinov, General Director JSC Almaz Shipbuilding Company
G.N. Muru, General Director JSC 51 CDTISR
O.A. Ostapko, General Director JSC Severnoye Design Bureau
I.V. Scherbakov, General Director JSC PDB Petrobalt
V.A. Seredokho, General Director JSC SNSZ
K.Yu. Shilov, General Director JSC Concern SPA Avrora
K.A. Smirnov, General Directors JSC MNS
I.S. Sukhovinsky, Director JSC VINETA
V.S. Tatarsky, General Director JSC ERA
N.M. Vikhrov, General Director JSC Kanonersky Shiprepairing Yard
M.V. Zakharov, General Director JSC Pumori-north-west
P.A. Zubkov, General Director MCS LLC

ABSTRACTS

Industry 4.0 on the example of the Armalit plant 1

SHIP DESIGN AND CONSTRUCTION

K. V. Antonov, A. V. Koshelev, A. I. Kokurin, V. A. Antonov. *On the feasibility of using DIN-profiles on transport vessels. Issues of reducing the weight of structures, labor intensity and cost of building ships* 7

S. N. Grechin, N. S. Grigor'ev. *Helicopter maintenance systems on ships of the world's leading countries in comparison with devices for transporting shipborne helicopters of the Russian Navy. Part 1* 11

P. A. Zubkov. *Evaluation of the impact of innovative technical solutions of MCS LLC on ship survivability using logical-probabilistic methods* 23

O. V. Tret'yakov, M. V. Shebunyaev, P. I. Shchukin, A. I. Gaikovich. *On the influence of supermatrix element approximations on solving problems using the analytical network method* 26

A. R. Togunjac, S. L. Anchikov, L. I. Vishnevsky. *On the operation of blade propulsors in mooring mode* 29

A. A. Kryukov. *Digital modeling of ship systems* 33

V. V. Efimov, A. S. Skrypka, E. V. Shishenin. *Autonomous shipping in Russia: status, problems, proposals* 35

P. A. Vasil'ev. *In memory of A. F. Shlemov* 41

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANISATION OF SHIPBUILDING

L. V. Gukova, E. A. Loginova, A. V. Protasov, L. L. Sokolov, V. G. Yuryev. *Experience in the Development and Application of Digital Twins of Abrasive Machining Devices for Marine Engineering Products* 42

D. I. Gomonov, G. Ya. Kremlyov. *Digitalization of a ship repair enterprise* 44

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS

A. N. Dyadik, V. A. Dyadik, D. S. Malovik. *Determining the characteristics of the power compartment with an electrochemical generator for an autonomous Long-Range Unmanned Vehicle* 49

K. G. Golubev, V. V. Baranovsky, K. A. Efremov. *Prospects for the Development of Energy for Future Ships. Analysis of Technical Solutions* 56

D. L. Aver'yanov, A. V. Sikhimbayev. *Kingstons of main ballast tanks with built-in pneumatic spring drive* 61

R. R. Khotskiy, A. V. Burakov. *Development and implementation of a device for robust exponential forecasting of the technical condition of marine piston compressors* 65

A. E. Usov, G. S. Kolenko. *Numerical modeling of steam condensation in a process condenser of a power plant using CAE packages* 71

N. A. Gribenyuk, A. N. Osin. *Method for Determining the Twist Angle of a Replaceable Lifting Element* 73

V. R. Efremov, A. A. Ivanov. *Development of a program for conducting thermal and neutron-physical calculations of marine pressurized water-moderated nuclear reactors* 76

A.N. Dyadik, V.A. Dyadik, D.S. Malovik. *Features of the refrigerator operation in a single-circuit scheme of a nuclear gas turbine plant* 78

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENT MAKING AND RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

B. Yu. Semyonov. *Monitoring magnetic moments of the low-frequency electromagnetic field of ship electrical equipment using a differential interference compensation technique* 83

A. Yu. Stepkin, V.A. Kaznacheev, Ya.A. Demidov. *Development of antenna technology for surface ships* 87

A.S. Baturin, A.N. Kichenko, V.E. Gel. *Analysis of radio wave propagation models in the decameter range used in the design of radio communication equipment* 89

INFORMATION-MEASURING AND MANAGEMENT SYSTEMS

S.M. Dotsenko, D.V. Zvezdaryov, A.A. Bengert, S.I. Bidenko, D.I. Yakushev, E.A. Rylov, I.A. Polkovnikov. *Modeling of the maritime transport system in the context of multifactor risks* 95

I.M. Zhdanova, S.S. Dvornikov, S.V. Dvornikov. *Model of occurrence of anomalies in demodulated traffic of VSAT subscriber terminals* 101

K.S. Dement'ev, V.N. Kondrat'ev, K.A. Smirnov. *Simulation modeling in the training system of pilots of remotely operated unmanned underwater vehicles* 105

A.N. Kichenko. *Signal types studied by radio monitoring systems* 107

E.K. Samarov. *Experimental studies of an amplitude quantizer with a stabilized threshold under the influence of interference caused by rough seas* 109

O.G. Mal'tsev. *System approach of designation of controllable projectiles of Navy fleet in volley from ships of a tactical group* 113

E.K. Samarov, Ya.Yu. Ionchenkova. *Probability and energy characteristics of harmonic signals received by ship radio receivers, modulated by normal random processes* 118

S.V. Dvornikov, S.A. Yakushenkov, V.K. Snezhko. *Mathematical model for assessing the structural connectivity of sea-based radio engineering systems* 120

IN THE ASSOCIATION OF SHIPBUILDERS

V.V. Gorelov. *Results of the meeting of the Association of Shipbuilders of St. Petersburg and Leningrad Region* 122

IN THE MARINE ASSEMBLY

S.N. Iryutin. *The St. Petersburg Naval Assembly is 115 years old since its creation and 30 years old since its revival* 124

Editor-in-Chief
E.A. Konov, Ph. D.
Deputy Editor-in-Chief
D.S. Glukhov
Phone: (812) 600 4586
Fax: (812) 600 4586
E-mail: morvest@gmail. com
www. morvest. ru
Editorial Collegium
G.N. Antonov, D. Sc., docent
V.V. Baranovsky, D. Sc., Prof.
V.I. Chernenko, D. Sc., Prof.
S.V. Dvornikov, D. Sc., Prof.
A.B. Fomichyov, D. Sc., Prof.
E.I. Glushankov, D. Sc., Prof.
E.A. Gorin, D. Sc., Prof.
V.N. Ilyukhin, D. Sc., Prof.
B.P. Ionov, D. Sc., Prof.
D.V. Kazunin, D. Sc.
R.N. Karaev, Ph. D.
V.V. Kobzev, D. Sc., Prof.
Yu.N. Kormilitsin, D. Sc., Prof.
A.I. Korotkin, D. Sc., Prof.
P.A. Krotov, D. Sc., Prof.
D.I. Kuznetsov, D. Sc., docent
P.I. Maleev, D. Sc.
D.V. Nikushchenko, D. Sc.
Yu.F. Podoplyokin, D. Sc., Prof., member of the Academy of Rocket and Artillery of Sciences of Russia
V.N. Polovinkin, D. Sc., Prof.
A.V. Pustoshny, D. Sc., Prof., corresponding member of the Academy of Sciences of Russia
A.A. Rodionov, D. Sc., Prof.
K.V. Rozhdestvensky, D. Sc., Prof.
N.V. Savishchenko, D.Sc., Prof.
Editorial staff
Phone/Fax (812) 600 4586
E-mail: morvest@gmail. com
Editor
T.I. Ilyichiova
Design, imposition
S.A. Kirillov, V.L. Kolpakova
Editorial office
office 13N, 84, Nab. r. Moyki, 190068, St. Petersburg

The magazine is registered by RF Ministry of Press, TV and Radio Broadcasting and Means of Mass Communications, Registration Sertificate ПИ № 77-12047 of 11 march 2002
Founder-Publisher
JSC Publishing House «Mor Vest»
office 13N, 84, Nab. r. Moyki, 190068, St. Petersburg
The magazine electronic version
is placed on the site LLC «Nauchnaya electronnaya biblioteka» www. elibrary. ru and is also included to the Russian index of scientific citing
By the decision of the Council of VAK the Morskoy Vestnik magazine is entered on the list of the leading scientific magazines and editions published in the Russian Federation where basic scientific outcomes of doctoral dissertations shall be published.
www.perechen.vak2.ed.gov.ru
You can **subscribe to the Morskoy Vestnik** magazine using Russian Post Catalog «Subscription editions» (subscription index ПМ 467) or directly at the editor's office via the Morvest Publishing House
Printed by Sfera JSC
Printing house address 190005, St. Petersburg, Egorova st., 26a, letter B
Circulation 250 . Order №13277
Publication date – 10.12. 2024
Catalog price – 675,42 rubles

Authors and advertisers are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press.
Reprinting is allowed only with permission of the editorial staff

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ DIN-ПРОФИЛЕЙ НА ТРАНСПОРТНЫХ СУДАХ

ВОПРОСЫ СНИЖЕНИЯ МАССЫ КОНСТРУКЦИЙ, ТРУДОЕМКОСТИ И СТОИМОСТИ ПОСТРОЙКИ СУДОВ

К.В. Антонов, *начальник отдела прочности и конструкционных материалов,*
А.В. Кошелев, *гл. конструктор по перспективному проектированию,*
ООО ПКБ «Петробалт»,
А.И. Кокурин, *вед. инженер-конструктор корпусного бюро ОКПП ПАО «ВСЗ»,*
В.А. Антонов, *канд. техн. наук,*
доцент кафедры технологии судостроения СПбГМТУ,
контакт. тел. (812) 644 5686

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время запрос на проектирование и строительство в России крупнотоннажных морских судов – балкеров и танкеров – сохраняет свою актуальность. При их создании необходимо обеспечивать высокие конструктивные, технологические, временные и экономические показатели, которые в значительной степени зависят от применяемых материалах, в частности выбора профилей для элементов основного (продольного) набора корпуса.

Среди профилей, применяемых для конструкций корпуса, повсеместное распространение получили несимметричные горячекатаные полособульбы. Российский сортамент данных профилей (ГОСТ 21937–76[3]) ограничен его максимальной высотой – 220 мм. Сортамент симметричных полособульбов (ГОСТ 9235–76), которые используют реже, содержит профили максимальной высотой 300 мм.

Проведенный анализ размеров конструкций судов, соответствующие характеристики которых доступны ООО ПКБ «Петробалт», показывает, что для судов дедвейтом от 20 до 60 тыс. т масса профилей, высота которых превышает 220 мм, составляет около 1% от дедвейта. Для судов дедвейтом более 60 тыс. т масса данных профилей достигает 1,2% дедвейта. Приведенные данные оценочны, и, вероятно, занижены, так как учитывают только продольный основной набор в грузовой зоне, без учета поперечных рамных связей и набора оконечностей судна.

Потребность в очень крупных (высотой более 220 мм) профилях вынуждает судостроительные предприятия использовать в качестве балок основного продольного набора зарубежные несимметричные полособульбы стандарта DIN EN 10067 (далее – din-профили). Сортамент din-профилей содержит катаные профили высотой до 430 мм. В условиях антироссийских санкций это влечет за собой дополнительные временные и финансовые издержки, связанные с поставкой данных профилей на отечественные верфи.

Цель настоящей работы – найти решение данной проблемы с целью обеспечения российских судостроительных предприятий аналогом din-профилей.

При выборе профилей балок будем оценивать следующие характеристики конструкций:

- прочность и устойчивость профиля в целом и отдельных его частей;
- наиболее рациональное использование материала;
- минимальные габариты балок;
- удобство установки, возможность простого и надежного соединения с прилегающими конструкциями, простота замены при ремонте;
- доступность при проведении осмотров, обслуживании во время эксплуатации;
- минимальные толщины элементов балок при достаточных запасах на износ и коррозию;
- минимальная стоимость изготовления.

Позиция традиционной отечественной школы судостроения, изложенная в книге Н. В. Барабанова «Конструкция корпуса морских судов» [2], гласит, что в качестве замены очень крупных прокатных балок могут успешно применяться сварные составные балки. Сравнение преимуществ указанных профилей, отмеченные в книге, приведены ниже:

Несимметричный полособульб

- Проще технология «перевязки» с балками другого направления.

Сварной тавр

- Выигрыш в весе по сравнению с катаными профилями в среднем ок. 20%;
- ниже стоимость изготовления;
- ниже стоимость доставки;
- не подвергаются скручиванию при поперечном изгибе;
- нет ограничений по размерам;
- лучше удовлетворяют требованию оптимального расположения материала с точки зрения прочности и жесткости.

Однако современные реалии судостроительного производства отличаются от существовавших более 50 лет назад, тенденция по сокращению сроков строительства крупнотоннажных судов и увеличение листа заказов верфей требуют принимать рациональные решения. В связи с этим необходимо исследовать целесообразность использования сварных тавров для замены очень крупных катаных профилей зарубежного стандарта.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ СОСТАВНЫХ СВАРНЫХ ПРОФИЛЕЙ

Для исследования целесообразности применения сварных тавров вместо din-профилей [1] необходимо найти аналоги – стандартные сварные тавры в соответствии с [2]. Для нахождения аналога выбраны определяющие величины, характеризующие поперечное сечение балки набора в грузовой зоне:

- момент сопротивления – определяет соответствие рассматриваемого элемента набора требованиям к местной прочности при изгибе под действием поперечной нагрузки;
- момент инерции – необходим для включения элемента набора в эквивалентный брус при расчете общей продольной прочности, а также устойчивости.

Помимо подбора аналогов din-профилей среди сортамента стандартных тавров интерес также представляет подбор оптимального сварного таврового профиля – замены с использованием процедуры оптимизации подбора оптимального профиля таврового сечения высотой, не превышающей аналогичный din-профиль.

1. Функция цели оптимизационной задачи – площадь поперечного сечения таврового профиля *S*тавр:

$$F(s_с, b_п, s_п) = \min\{S_{тавр} = h_с s_с + b_п s_п\},$$

где $s_с$ – толщина стенки; $b_п$, $s_п$ – ширина и толщина свободного пояска; $h_с$ – высота стенки, принимается равной высоте аналога (DIN-профиля).

2. Функция ограничений оптимизационной задачи – отклонение геометрических характеристик поперечного сечения таврового профиля от характеристик аналога (DIN-профиля):

$$G(s_с, b_п, s_п) = \max\{(w_{DIN} - w_{тавр});0\} + \max\{(I_{DIN} - I_{тавр});0\} + \max\{s_с - 3{,}5 + 0{,}015L_2;0\} + \max\{s_п - 3{,}5 + 0{,}015L_2;0\} + \max\{b_п - 200 s_п \sqrt{R_{eH}};0\},$$

где w_{din}, $w_{тавр}$ – моменты сопротивления таврового профиля и DIN-профиля; I_{din}, $I_{тавр}$ – моменты инерции таврового профиля и din- профиля; $L_2 = \min\{L, 300\}$ – длина судна согласно Правилам МАКО Ch6 Sec3 [2.1.1].

Для поиска оптимального решения используется метод скользящего допуска, при этом задача сводится к безусловной минимизации, т.е. поиску минимума $F(s_c,b_п,s_п)$ или $G(s_c,b_п,s_п)$ при отсутствии ограничений на параметры. Задача безусловной минимизации решается методом Нелдера–Мида, являющимся модификацией симплекс-метода применительно к задачам нелинейного программирования.

Метод Нелдера–Мида заключается в построении в окрестности начальной точки n-мерного пространства многогранника, имеющего $n+1$ вершину с последующим перемещением его в рассматриваемом пространстве. Стратегия перемещения многогранника выбирается из условия уменьшения значений целевой функции в его вершинах в соответствии со специально составленным алгоритмом. При этом размеры многогранника изменяются в зависимости от характера целевой функции (функции цели или функции ограничений), сжимаясь в окрестности минимума в точку.

Во время поиска оптимального решения методом скользящего допуска координаты вершин многогранника должны либо удовлетворять ограничениям, либо находится в условно допустимой зоне. В качестве критерия допуска выбирается функция координат точек, являющихся вершинами многогранника.

В табл. 1 приведены характеристики DIN-профилей и аналогичные характеристики стандартных и «оптимальных» сварных тавров. Здесь приняты следующие обозначения: F – площадь поперечного сечения без присоединённого пояска, см^2; I – момент инерции поперечного сечения с присоединённым пояском с площадью равной полуторной площади балки, см^4; W – момент сопротивления поперечного сечения с присоединённым пояском с площадью равной полуторной площади балки, см^3.

Таблица 1

Характеристики DIN-профилей и аналогичные характеристики стандартных и «оптимальных» сварных тавров

DIN-профиль				Тавровый профиль – сортамент				Тавровый профиль – оптимизация			
НР	F_o, см^2	I, см^4	Wx, см^3	Профиль	F_o, см^2	I, см^4	Wx, см^3	Профиль	F_o, см^2	I, см^4	Wx, см^3
260x10	36,1	8161	418	6x250/12x120	29,4	8343	478				
260x11	38,7	8554	436	8x250/14x140	39,6	11345	652				
260x12	41,3	8956	455	8x250/14x140	39,6	11345	652	9x260/13x90	35	8904	466
280x11	42,6	11069	526	8x250/14x140	39,6	11345	652				
280x12	45,5	11626	550	8x280/14x140	42	14625	743	10x280/14x100	42	12442	606
280x13	48,28	12168	574	8x280/14x140	42	14625	743				
300x11	46,7	14199	633	8x280/14x140	42	14625	743				
300x12	49,7	14888	661	8x320/14x140	45	19877	875	10x300/14x110	45	15534	707
300x13	52,8	15562	689	8x320/14x140	45	19877	875				
320x12	54,2	18668	779	8x320/14x140	45	19877	875	10x320/14x110	47	18175	773
320x13	57,4	19489	811	8x320/14x140	45,2	19877	875				
320x14	60,85	20308	842	10x320/14x180	57,2	25293	1115				
340x12	58,8	23068	908	10x320/14x180	57,2	25293	1115	10x340/12x150	52	23020	926
340x13	62,24	24158	949	10x320/14x180	57,2	25293	1115				
340x14	65,5	25037	980	10x320/14x180	57,2	25293	1115				
370x13	69,6	32532	1179	10x360/14x200	64	35754	1401	11x370/16x130	62	31975	1180
370x14	73,4	33868	1223	10x360/14x200	64	35754	1401				
370x15	77	34930	1256	10x360/14x200	64	35754	1401				
400x14	81,4	44688	1500	12x400/16x220	83,2	55160	1923	12x400/17x140	72	43319	1476
400x15	85,48	46246	1546	12x400/16x220	83,2	55160	1923				
400x16	89,4	47745	1592	12x400/16x220	83,2	55160	1923				
430x14	89,7	57756	1809	10x450/14x200	73	60065	1852				
430x15	94,1	59648	1862	14x450/18x250	108	93187	2901	13x430/19x150	84	59234	1881
430x17	103	63579	1972	14x450/18x250	108	93187	2901				
430x19	111,4	67458	2083	14x450/18x250	108	93187	2901				
430x20	115	68907	2122	14x450/18x250	108	93187	2901				

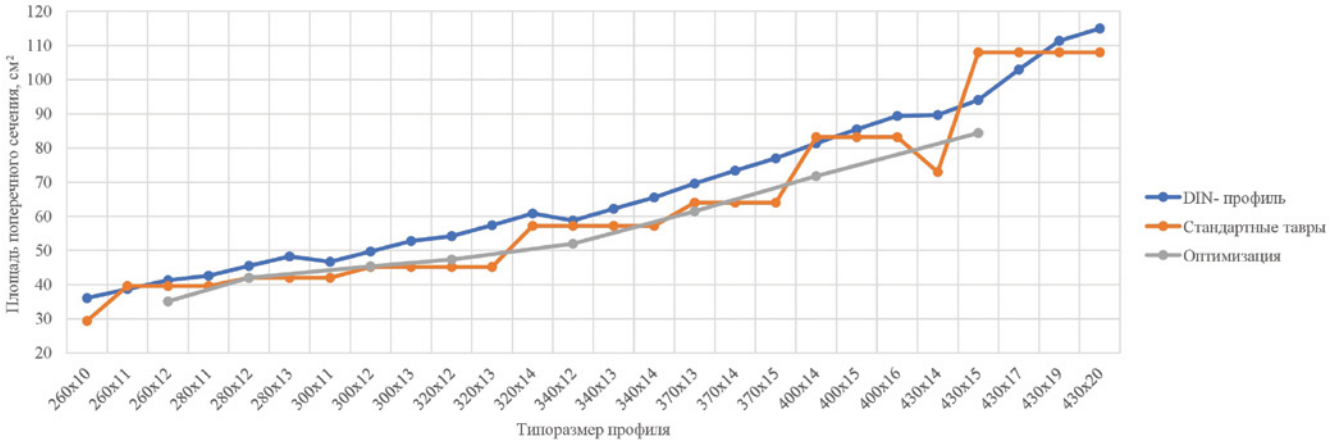


Рис. 1. ***Разности площади DIN-профилей, стандартных и «оптимальных» сварных тавров***

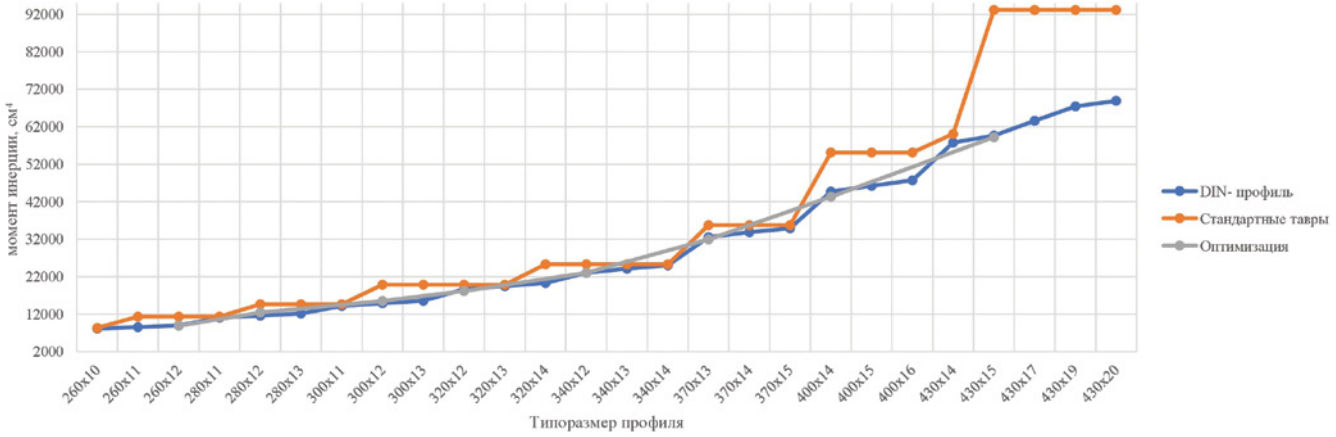


Рис. 2. ***Разности момента инерции DIN-профилей, стандартных и «оптимальных» сварных тавров***

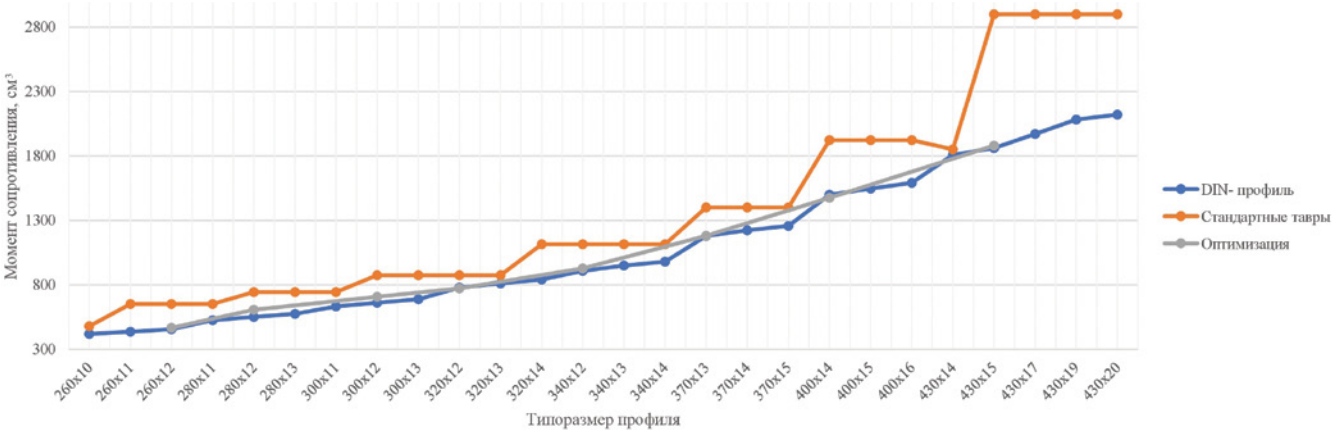


Рис. 3. ***Разности момента сопротивления DIN-профилей, стандартных и «оптимальных» сварных тавров***

На рис. 1–3 представлены графики, отображающие разности площади, момента сопротивления и момента инерции для DIN-профилей, стандартных и «оптимальных» сварных тавров.

Как видно из табл. 1 и рис. 1–3, общая закономерность при сопоставлении din-профиля с аналогом из сортамента для сварных тавров следующая:

- высота стандартного таврового профиля из сортамента в целом *не превышает* высоту соответствующего din-профиля,
- площадь стандартного таврового профиля *ниже* площади соответствующего din-профиля в среднем на 10%,
- момент инерции таврового профиля *выше* момента инерции соответствующего din-профиля в среднем на 15%,
- момент сопротивления таврового профиля *выше* момента сопротивления соответствующего din-профиля в среднем на 20%,
- под конкретные показатели катаных din-профилей может быть подобран более близкий аналог – «оптимальный» сварной тавр с площадью поперечного сечения, не превышающей аналогичный показатель для DIN-профиля.

УЗЛЫ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрим узлы прохода катаных несимметричных DIN-полособульбов и сварных тавровых балок через поперечные проницаемые рамные связи с установкой компенсационных заделок. Типовые узлы представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, узлы прохода таврового профиля являются более сложными, а следовательно, более трудоемкими в реализации.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

При проведении анализа технико-экономических показателей применения DIN-полособульбов и сварных тавров были рассмотрены параметры трудо-

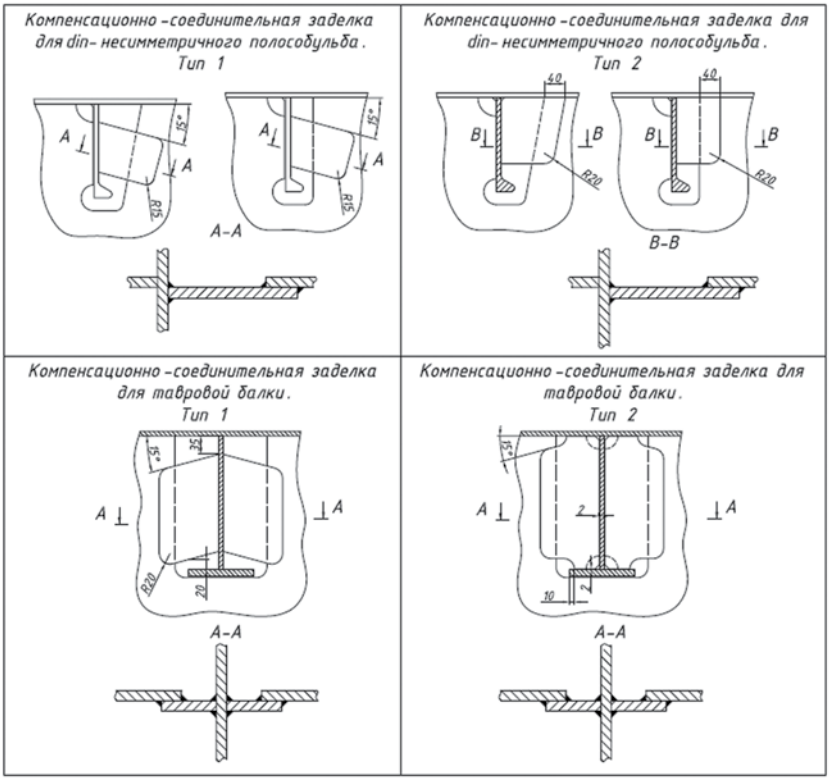


Рис. 4. ***Типовые узлы прохода через проницаемые конструкции***

емкости и стоимости компонентов для проведения работ, предоставленные ПАО «ВСЗ».

Учтены следующие показатели стоимостей:

- закупки DIN-профиля/листового металла,
- сварочного материала,
- лакокрасочного материала,
- нормо-часа.

Также рассмотрены трудоемкости следующих производственных процессов:

- очистка и окраска профилей и листового металла,
- резка профилей и листового металла,
- производство сварного тавра (сварка, очистка, окраска),
- приварка профилей к настилу,
- сборка узла прохода профилей через опорные конструкции.

Технико-экономические показатели для судов различного дедвейта приведены в табл. 2.

Значения разницы представлены относительно показателей полособульба.

Структура трудоемкости применения DIN-полособульбов и сварных тавров представлена на рис. 5.

Структура стоимости применения din-полособульбов и сварных тавров представлена на рис. 6.

Таблица 2

Сравнение технико-экономических показателей

Показатель	Полособульб	Тавровый сварной профиль	Разница в %
Танкер 19 000 DWT			
Масса, т	224	194	–13
Трудоемкость, норм/ч	10 520	15 494	47
Итоговая стоимость, тыс. р.	79 328	83 105	4,8
Балкер 37 400 DWT			
Масса, т	219	192	–12
Трудоемкость, норм/ч	10 628	15 787	49
Итоговая стоимость, тыс. р.	78 980	81 441	3,1
Балкер 57 000 DWT			
Масса, т	384	325	–15
Трудоемкость, норм/ч	15 820	22 204	40
Итоговая стоимость, тыс. р.	126 629	119 388	–5,7

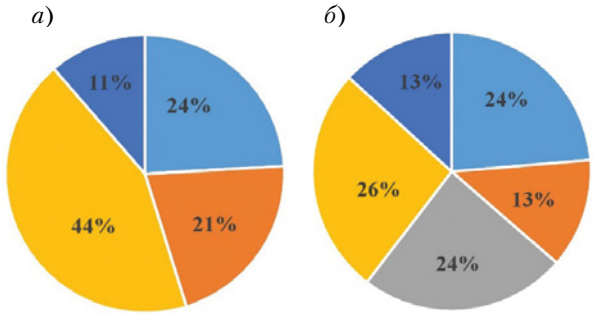


Рис. 5. ***Структура трудоемкости применения DIN-полособульбов (а) и сварных тавров (б)***
■ – окрасочные работы с зачисткой; ■ – резка; ■ – соединение балки с обшивкой; ■ – выполнение проходов; ■ – производство тавра

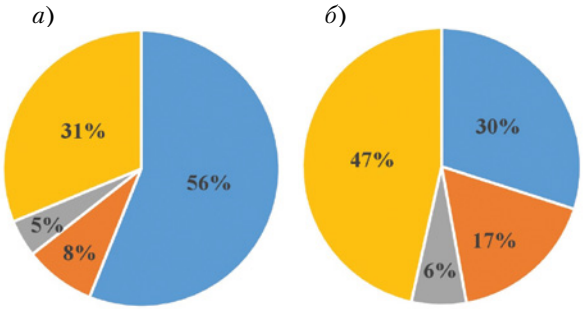


Рис. 6. ***Структура стоимости применения DIN-полособульбов (а) и сварных тавров (б)***
■ – стоимость металла; ■ – стоимость сварной проволоки; ■ – стоимость краски; ■ – стоимость работ

свойства) и массы сварных балок стандартизированного сортамента даёт выигрыш в массе в среднем на 10–15% относительно катаных din-профилей.

2. Трудоёмкость полного технологического процесса изготовления корпусных конструкций с использованием сварных тавровых балок выше на 40–50% относительно полособульбов.

3. Итоговая стоимости закупки материалов и изготовления профилей из сварных балок стандартизированного соизмерима с применением DIN-профилей, и стоимостная разница может варьироваться от –10 до +10%. Рост итоговой стоимости применения сварных балок наблюдается при увеличении дополнительных расходов на производстве.

4. При строительстве крупнотоннажных судов на зарубежных верфях, вопрос об использовании сварных профилей в качестве основного набора практически не возникает, т.к. для сокращения трудоемкости и сроков строительства повсеместно применяются катаные профили высотой до 430 мм.

5. Подбор и применение оптимальных конструктивных решений с использованием катаных профилей под конкретный проект, может достичь экономические показатели и приблизится к весовым характеристикам сварных балок.

6. Следует внести предложение по дополнению сортамента несимметричных горячекатаных полособульбов, отраженного в ГОСТ 21937-76[3].

7. Для массового строительства крупнотоннажных транспортных судов целесообразно применение катанных профилей размеров, превышающих указанных в ГОСТ 21937-76. Такое решение позволит снизить сроки и стоимость строительства на отечественных верфях.

8. Эти выводы применимы к угол-кам стальным горячекатанным неравнополочным.

ВЫВОДЫ

В данной работе рассмотрен вопрос об оптимальном типе профилей основного набора, используемых при строительстве транспортных (в том числе крупнотоннажных) судов.

По результатам выполненного анализа, рассматривающего вопросы:

- подбор оптимального профиля балки с точки зрения массы корпуса и соблюдения прочностных характеристик поперечного сечения,
- сравнение трудоёмкости изготовления корпусных конструкций,
- сравнение итоговой стоимости применения рассматриваемых типов профилей в ходе полного цикла строительства.

Общие выводы по работе:

1. Геометрические характеристики поперечных сечений (прочностные

В дальнейшем интерес представляет анализ с использованием метода конечных элементов требований к усталостной прочности узлов прохода опорных конструкций катаным и сварным профилем, а также актуализация данных о трудоемкости технологических процессов на различных судостроительных предприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. DIN EN 10067–1996. Hot rolled bulb flats – Dimensions and tolerances on shape, dimensions and mass. German version EN 10067:1996.
2. *Барабанов Н.В.* Конструкция корпуса морских судов. –СПб.: Судостроение. – 1968.
3. ГОСТ 21937–76. Полособульб горячекатаный несимметричный для судостроения.
4. ОСТ 5.9373–80. Тавры стальные сварные. ■

ВЕРТОЛЕТНЫЕ ОБСЛУЖИВАЮЩИЕ СИСТЕМЫ НА КОРАБЛЯХ ВЕДУЩИХ СТРАН МИРА В СРАВНЕНИИ С УСТРОЙСТВАМИ ТРАНСПОРТИРОВКИ КОРАБЕЛЬНЫХ ВЕРТОЛЕТОВ ВМФ РФ

ЧАСТЬ 1

С. Н. Гречин, *начальник отдела,*
Н. С. Григорьев, *инженер-конструктор 1-й категории,*
ЗАО «ЦНИИ СМ»,
контакт. тел. (812) 640 1052, sudmash@sudmash.ru

ВВЕДЕНИЕ

Идея посадки вертолета на палубу корабля родилась практически одновременно с этим видом летательных аппаратов, так как разведывательные, транспортные и боевые возможности вертолетов значительно повышают боевую эффективность корабля.

С самого начала совместного использования оба вида техники начали претерпевать различные конструктивные изменения, приспосабливаясь друг к другу. Корабли и летательные аппараты корабельные (ЛАК) начали оснащать различными устройствами, облегчающими их взаимодействие.

В конструкции и архитектуре корабля появились ангар, взлетно-посадочная палуба (площадка), на которые приходится 20–30% общей длины корабля, погреба для хранения боезапаса ЛАК, оснащенные устройствами автоматической подачи. Взлетные палубы оснастили съемным или автоматически заваливающимся ограждением. Появились средства светосемафорного взаимодействия корабля с ЛАК при посадке и специальные рубки для оператора, принимающего ЛАК.

Посадка вертолета на палубу корабля отнюдь не то же самое, что посадка на стационарную площадку. Условия выполнения взлета и посадки вертолетов корабельного базирования существенно сложнее, чем обычных «сухопутных» вертолетов, по следующим основным причинам:

– взлетно-посадочная площадка (ВППл) расположена вблизи надстроек корабля, имеет весьма ограниченные размеры, а также резкий и значительный перепад высот с поверхностью моря;
– ВППл подвержена сложному пространственному движению при ходе и качке корабля на морском волнении;
– основополагающий для всех вертолетов контрольный режим висения, как правило, выполняется так, что при зависании неподвижно над полетной палубой вертолет перемещается относительно поверхности моря со скоростью хода корабля;
– интерференция воздушного потока над ВППл с архитектурой корпуса движущегося корабля и его надстроек вызывает интенсивные сдвиги ветра, вихреобразования, зоны аэродинамического затенения.

Возможность применения корабельных вертолетов существенно зависит от гидрометеоусловий и времени суток. Полеты вертолетов изначально могли выполняться при состоянии моря не более 3 баллов, при которых бортовая качка не превышала 8 градусов, а килевая, учитывая, что площадки для них располагались преимущественно в кормовой части, и того меньше. Применительно к практике полетов большое значение имеет еще один параметр. Оказалось, что летчики не всегда имеют возможность абсолютно точно выполнить посадку, причем, по некоторым данным, разброс точек касания опор шасси укладывается в круг диаметром 2–3 м. Это усложняет швартовку вертолета на посадочной площадке и последующую транспортировку его в ангар.

С тем чтобы расширить диапазон гидрометеоусловий, в которых используются вертолеты, были разработаны специальные приспособления для их посадки и последующей буксировки в ангар. Эти приспособления выполняли роль механической связи между вертолетом и кораблем. Первая система подобного назначения – «Beartrap» (англ. Bear trap, «медвежья ловушка»), разработанная компанией Fairy Canads для посадки вертолетов «Sea King» на эскортные миноносцы и фрегаты класса DLG, была испытана в 1963 г.

С 70-х гг. и для кораблей отечественного флота начались разработки средств помощи посадки и транспортировки вертолетов.

Производители разных стран в развитии устройств помощи в посадке и транспортировке ЛАК в силу целого ряда определяющих факторов пошли разными путями. По-своему развивалась и отечественная техника. Существуют три наиболее выраженные концепции устройств транспортировки корабельных вертолетов:

– транспортировка тягачом;
– рельсовая транспортировочная система;
– лебедочно-тросовая или траверсная транспортировочная система.

На данный момент в отечественном кораблестроении ввиду запуска проектирования кораблей концептуально новых проектов под изменившиеся боевые задачи и новые типы летательных аппаратов, в том числе и беспилотных, наметилась необходимость переосмысления принятой на флоте схемы взаимодействия корабля с летательным аппаратом.

Для того чтобы выработать правильную стратегию развития систем обслуживания вертолетной техники на палубе для кораблей ВМФ полным водоизмещением от 500 до 8000 т, прежде всего надо провести технический анализ мирового опыта использования данных систем в флотах ведущих стран мира. Также необходимо проанализировать и переосмыслить опыт эксплуатации устройств в ВМФ Российской Федерации. В настоящее время рассматриваются корабли следующих отечественных проектов, находящихся в составе ВМФ:

– пр. 20380, корвет (сторожевой корабль) по системе классификации боевых кораблей ВМФ РФ (по классификации НАТО отнесен к классу «corvette»), полным водоизмещением до 2430 т;
– пр. 22350, фрегат по системе классификации боевых кораблей ВМФ РФ (по классификации НАТО относится к классу «frigate»), с полным водоизмещением до 5400 т;
– пр. 11711, большой десантный корабль по системе классификации боевых кораблей ВМФ РФ (по классификации НАТО относится к классу LST), полным водоизмещением до 8000 т.

Выполненный анализ существующих импортных и отечественных подходов к реализации систем обслуживания вертолетов на палубе поможет определить наиболее перспективные пути развития в совокупности с ограничениями, налагаемыми существующими особенностями отечественной техники и подходов к их проектированию.

ПРЕДЫСТОРИЯ

Первые устройства транспортировки (УТ) корабельных вертолетов были разработаны в странах Североатлантического блока НАТО и получили единое

название – Helicopter Handling System (Вертолетная обслуживающая система). Изначально были созданы три типа систем:

- Tractor;
- The Recovery, Assist, Secure and Traverse (RAST);
- «TRIGON».

Tractor («Тягач») – самый простой способ перемещения вертолета по палубе после того, как он приземлился. Помимо веса тягач никакой другой защиты от скольжения или опрокидывания при этом нет, т. е. отсутствует обеспечение безопасности при посадке. Тягачи предназначены только для больших стабильных судов, мало подверженных воздействию качки, имеющих посадочную палубу достаточных размеров для маневрирования тягача с зацепленным ЛАК и вместительный ангар для размещения техники.

Система RAST (The Recovery, Assist, Secure and Traverse, или выравнивание, содействие, закрепление и перемещение) американо-канадской компании Curtiss-Wright's INDAL первоначально была разработана для вертолетов типов «Sea King» и MH-60R «Seahawk» (разработка и производство корпорации Sikorsky), которые являются вертолетами с хвостовым колесом (задняя хвостовая стойка шасси, расположенная на продольной оси фюзеляжа, имеет одно спаренное колесо, а основные стойки шасси разнесены побортно в носовой части).

Данная система стала первой «рельсовой» системой с челночной тележкой, двигающейся по колее или рельсу (рельсам), проложенному из вертолетного ангара до ВППл и встроенному в палубу в кормовой части корабля.

Перед посадкой вертолета в ходе подготовки системы по рельсам из вертолетного ангара на ВППл выводится тележка, или шаттл, которая называется устройством для быстрого крепления (англ. Rapid Securing Device, RSD), также именуемая «медвежьей ловушкой». Управление тележкой осуществляется дистанционно из рубки оператора, встроенной в палубу корабля так, чтобы оператор мог наблюдать все этапы посадки вертолета на ВППл. Тележка оборудована системой фиксации, как у тисков, состоящей из двух пар планок с зубцами со специальным профилем. Планки попарно могут перемещаться по двум координатным осям в плоскости тележки, параллельной палубе корабля. Для подготовки устройства к посадке вертолета тележка RSD останавливается на ВППл над местом, где расположено отверстие в палубе, через которое на палубу подается силовой трос от тяговой лебедки, расположенной под палубой корабля. Изначально конец силового троса закреплен на палубном стакане. В штатном состоянии система фиксации тележки RSD разомкнута, открывая свободный доступ через тележку между планками к концу силового троса на палубе корабля.

Когда вертолет подлетает и зависает над кормовой частью корабля два оператора из личного состава подходят к тележке и начинают вручную тянуть за конец силового троса. Силовой трос от подпалубной гидравлической лебедки системы RAST через отверстие в палубе вытягивается наружу, проходя между разомкнутыми планками системы фиксации тележки RSD. После этого в вертолете, зависшем над палубой, открывается люк в нижней центральной части фюзеляжа, откуда из него выдвигается зонд (англ. Probe, рис. 1), через который начинает опускаться «хватательный» трос с системой зацепления. Далее с помощью специального «ухвата» члены команды ловят конец троса вертолета и соединяют его с силовым тросом, вытянутым ранее (рис. 2). После соединения «хватательного» троса с силовым тросом гидравлической корабельной лебедки он поднимается на вертолет лебедкой зонда, а затем силовой трос соединяется автоматическим замком, расположенным в штоке «зонда». Таким образом, предварительный этап завершается, летчик дает руководителю полетов команду «натяжение».

Вертолет опускается на палубу тянущим усилием лебедки с помощью корабельного троса и при содействии пилота вертолета (рис. 3).

После касания вертолетом палубы корабля зонд захватывается и зажимается планками устройства фиксации тележки RSD (рис. 4, рис. 5).

Тележка RSD ходит по одной колее или одному рельсу, поскольку она однорельсовая.

После закрепления и посадки вертолета задняя часть фюзеляжа выравнивается «хвостовыми» выправляющими лебедками. Чтобы выровнять вертолет на линию транспортировки в ангар при помощи кормовых лебедок, вертолет «качается» вверх и вниз относительно палубы с помощью толкающего воздействия на зонд вертолета перемещениями тележки RSD, планки устройства фиксации («челюсти») RSD при этом немного высвобождаются. Это делается, чтобы ослабить сцепление колес хвостового шасси с палубой корабля. Когда появились вертолеты с хвостовой стойкой шасси, поворачивающейся на 90°, необходимость в раскачивании вертолета отпала.

По некоторым данным, в хвостовой части вертолета дополнительно располагалась «хвостовая штанга». Эта штанга опускалась в решетку на посадочной палубе при посадке для того, чтобы не допустить разворота верто-

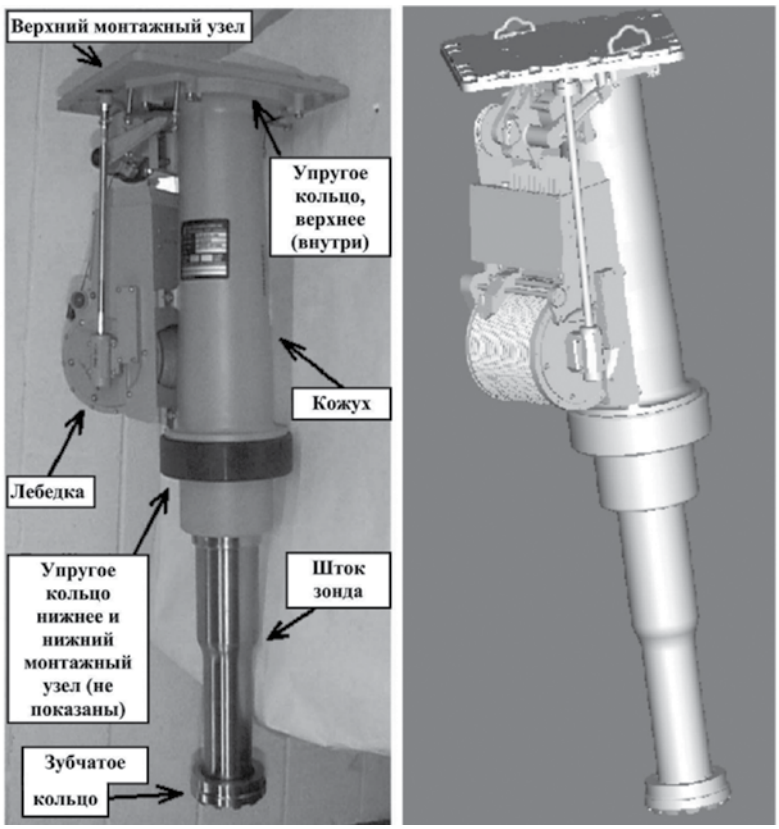


Рис. 1. ***Зонд для системы обслуживания вертолета RAST***
URL: https://s2.q4cdn.com/767595508/files/doc_downloads/indal/rast/6Methodology-ensuring-Safety-Embarked-Helicopter-Securing-System-white-paper.pdf (дата обращения 01.06.2021)

Рис. 2. ***Соединение тросов системы RAST***
URL: https: //aviadejavu.ru /Site /Crafts /Craft32149.htm (дата обращения 01.06.2021)

Рис. 3. ***Приземление вертолета на палубу системой RAST***
URL: https://www.airliners.net /photo /USA-Navy/Sikorsky-SH-60B-Seahawk-S-70B-1 /306314/L (дата обращения 01.06.2021).

Рис. 4. ***Зонд вертолета перед захватом тележкой RSD***
URL: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/s3.spanglefish.com/s/22631/documents/safety-documents/why-trigon-has-no-rails.pdf (дата обращения 01.06.2021)

Рис. 5. ***Тележка RSD системы RAST***
URL: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/s3.spanglefish.com/s/22631/documents/safety-documents/why-trigon-has-no-rails.pdf (дата обращения 01.06.2021).

лета вокруг зонда. Для выравнивания и последующей транспортировки эта штанга должна была высвобождаться. В видеоматериале, находящемся в открытых интернет-ресурсах*, можно увидеть и оценить обслуживание вертолета системой RAST. Из него следует, что ни «хвостовая штанга», ни «решетка для хвостовой штанги» в данной системе обслуживания не используются.

Безопасность членов команды из личного состава, работающих под вертолетом, обеспечивается страховочными поясами, свободно перемещающимися вдоль троса, натянутого над палубой. RSD протягивается тросами под палубой (см. рис. 5).

Таким образом, несмотря на наличие рельсов, в конструкции данного типа устройство транспортировки (УТ) тоже используются лебедки: одна для того, чтобы притянуть вертолет к палубе, две кормовые – для выравнивания вертолета и еще одна лебедка для перемещения тележки по рельсам.

Данные о конструкции лебедок отсутствуют. Лебедка тележки RSD, очевидно, имеет замкнутую тросовую систему. Она должна быть реверсивной и состоять из двух барабанов. Причем второй барабан либо должен вращаться в обратную сторону, в отличие от первого, либо канат должен быть подведен к нему так, чтобы при работе лебедки на один барабан трос № 1, соединенный с тележкой, наматывался, а с другого барабана происходило травление троса № 2, соединенного с тележкой, и наоборот.

Можно реализовать конструкцию с одним барабаном от одного привода, разделенным на две независимые зоны навивки тросов с винтовыми проточками, зеркальными друг другу. Один канат к барабану подводится условно «сверху» к одной зоне, а другой – «снизу» барабана к другой зоне, и, таким образом, один привод лебедки обеспечивает травление одного троса и одновременное выбирание другого троса и наоборот.

Возможен вариант с использованием лебедки с турачкой, на барабане которой нет винтовых проточек. Здесь имеется один трос, имеющий одну-две петли навивки на барабане лебедки для обеспечения сцепления. Трос соединен концами с тележкой с разных сторон.

Лебедка может иметь как электродвигатель, так и гидромотор в качестве привода. В данном случае электродвигатель и контроллер выигрывают по массогабаритным показателям у гидромотора и насосной станции. Электропривод также обеспечивает быстрый отклик от органов управления и более точное

* RAN MH-60 Helicopter RAST Recovery Assist Explained. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.youtube.com/watch?v = 6XvdXwgYN_s (дата обращения 01.06.2021).

управление и позиционирование тележкой.

RAST используется в течение многих лет на более чем двухстах кораблях, построенных для различных флотов.

Система RAST обладает рядом существенных недостатков:

- сложна в управлении как пилотом вертолета, так и оператором за главным пультом (рис. 6);
- подходит только для определенных типов вертолетов с одним хвостовым шасси на продольной оси фюзеляжа (типы «Sea King» и MH-60R «Seahawk»);
- вертолеты должны быть оборудованы зондом и изначально спроектированы так, чтобы выдерживать большие усилия и изгибающие моменты из-за «зонда», встроенного в фюзеляж. Громоздкие механизмы зонда занимают значительный объем и несколько снижают полезную нагрузку ЛАК;
- тележка RSD системы RAST технически сложна в изготовлениии и при ремонте в условиях заказа;
- нужны люди на палубе, чтобы подсоединить спускаемый трос4
- необходимы люди на палубе, чтобы соединить тросы хвостовой выпрямляющей лебедки. Закрепление при посадке – очень трудоемкое и небезопасное занятие, особенно в условиях качки;
- зонд не находится в центре вращения, поэтому тяга на хвостовых направляющих лебедках повреждает шины хвостового колеса и вызывает повышенную усталость конструкций хвоста вертолета от больших знакопеременных нагрузок. Чтобы попытаться снять это напряжение, «челюсти медвежьего капкана» высвобождаются в одном из направлений, когда они расположены вокруг зонда, а вертолет раскачивается взад и вперед, пока он выпрямляется. При этом может произойти опрокидывание вертолета. Эта проблема была на начальном этапе эксплуатации и затем устранена доработкой конструкции вертолетов;
- как было проиллюстрировано выше, эта система очень габаритная и занимает много места, особенно много под палубой. Это может быть критичным для небольших кораблей типа корветов, где очень важна экономия пространства, и, например, это не позволит разместить устройство хранения и подачи авиационного боезапаса в наиболее удобном для этого месте;
- возможно обледенение рельсов при эксплуатации в арктических и субарктических широтах, приводящее к отказу системы;
- значительная трудоемкость обеспечения дренажа морской и талых вод из конструкции рельс.

Рис. 6. ***Пульт управления системой RAST***
URL: https://picryl.com/media/an-interior-view-of-the-recover-assist-securing-traversing-rast-system-control-cdaf16 (дата обращения 01.06.2021)

В настоящий момент система RAST модернизируется с добавлением элементов другой системы компании Curtiss-Wright's INDAL – ASIST до уровня RAST Mark 6 System. Эта версия использует лазерные маяки на вертолете и приемники на корме корабля, чтобы не только отображать визуальные средства посадки пилоту, но и динамически позиционировать тележку RSD прямо под вертолетом, когда он приземляется. Как только вертолет входит в контакт с палубой, RSD фиксирует зонд и транспортирует вертолет в ангар. Выравнивания вертолета на палубе при этом уже практически не требуется, все делается в воздухе благодаря электронной системе точного определения положения вертолета «Helicopter Position Sensing System» («HPSS»), которая непрерывно отслеживает и контролирует точное положение ЛАК относительно назначенной зоны посадки и отображает его пилоту с помощью серии визуальных сигналов.

Таким образом исчезают недостатки, связанные с трудоемкостью посадки и риском членов команды, обслуживающих систему, но появляется дополнительная уязвимость из-за наличия сложной электроники и оптики, которая может быть быстро выведена из строя в результате военных действий.

Система «TRIGON» была первоначально разработана британской компанией MacTaggart Scott для вертолетов марок «Wasp» и «Lynx». Первый является четырехколесным вертолетом, а второй – с одним колесом в носовой части соответственно.Это первая классическая лебедочно-тросовая (или траверсная) система.

Система «TRIGON», как и многие другие, использует систему закрепления при посадке и удержания ЛАК с помощью посадочной решетки (англ. Landing grid), расположенной на ВППл корабля, и палубного замка (англ. Decklock) типа «Гарпун», расположенного на вертолете. Посадка и взлет полностью находятся под контролем пилота (в отличие от системы «зонда»). Устройство данной системы описано в отдельном разделе.

После посадки вертолета на палубу и активации пилотом «Гарпуна» он швартуется личным составом. Гаки тросов от двух кормовых лебедок, расположенных побортно под палубой, выведены на палубу через сквозные шкивы и отверстия в палубе (где они обычно закрепляются на петлях «по-походному»). Тросы кормовых лебедок растравливаются с барабанов лебедок личным составом, и гаки (крюки) тросов крепятся к петлям на осях основных стоек шас-

си вертолета. При этом трассы тросов прокладываются через отклоняющие роликовые барабаны и через одношкивные блоки с вертлюгом, которые предварительно закрепляются на палубе. Третья лебедка располагается в ангаре, гак от нее крепится к носовой стойке шасси вертолета через специальное «буксировочное устройство», которое также предварительно закрепляется на вертолете после его швартовки на ВППл.

Таким образом, система позволяет, изменяя дифференциальное напряжение в тросах, безопасно маневрировать вертолетом и управлять им с помощью джойстика. Компьютер автоматически следит, чтобы натяжение в тросах двух одерживающих лебедок поддерживалось при тяге одной из лебедок в противоположном от них направлении. Алгоритмы работы компьютера позволяют менять управление лебедками в зависимости от погодных условий и условий качки.

Система SATS (Seaboard Aircraft Traversing System) – новая разработка компании MacTaggart Scott. Это электроприводная версия системы «TRIGON», где каждая из лебедок снабжена собственным электроприводом. Информации о том, каким образом в тросах лебедок с электроприводом создается натяжение, нет. Вероятно, натяжение в тросах осуществляется благодаря асинхронным электродвигателям с частотным регулированием и муфтами предельных моментов на каждой из лебедок.

Одношкивные блоки с вертлюгом, отклоняющие ролики, сквозные палубные шкивы, лебедки, силовой щит и пульт управления системы SATS показаны на рис. 7.

Крепления к колесам основных стоек шасси могут различаться, в том числе, по причине разного расположения колес шасси вертолета. На рис. 8 показано расположения крепления тросов к петле колеса через такелажные скобы.

Траверсную систему, используемую на патрульном корабле типа «Тетис» королевских военно-морских сил Дании (штифты с «HDMS Thetis» F 357) можно увидеть и оценить в видеоматериале, находящемся в открытых интернет-ресурсах. В видеоматериале* показано обслуживание вертолета «MH-60R Seahawk» на борту корабля.

Вертолет «MH-60R Seahawk» (рис. 9) с компоновкой шасси, где задняя хвостовая стойка шасси на продольной оси фюзеляжа имеет одно спаренное колесо, а основные стойки шасси разнесены побортно в носовой части, закреплен тросами через «буксировочное устройство». Это устройство представляет собой П-образную балку, концы которой закрепляются на вертолете через оси колес основных стоек шасси. На концах балки побортно, ближе к крепежному узлу с осями колес шасси, расположены петли для гаков кормовых лебедок, находящихся под палубой. Через углы балки перекинут трос, на котором свободно перемещается одношкивный блок с петлей для гака ангарной лебедки. При выравнивании вертолета, когда он стоит под углом к траектории транспортировки ВППл–ангар, блок на тросе позволяет перенести точку приложения вектора тяги в центр оси основных стоек шасси, уменьшая возникающие моменты, приводящие к скольжению или опрокидыванию вертолета. При этом блок будет стремиться занять положение на тросе, при котором силы натяжения в тросе с обоих направлений от блока будут уравновешены, разворачивая вертолет. Здесь важно не превышать допустимый угол между проекцией вектора тянущего усилия на палубу и проекцией продольной оси вертолета на ВППл.

Судостроительная компания Индии GRSE (Garden Reach Shipbuilders & Engineers Ltd.), а также южно-корейские компании Hankook Engineering Pte. Ltd. и BADA Heavy Industries Co., Ltd. производят собственные аналоги траверсной системы. Схемы и элементы таких трехлебедочных траверсных систем идентичны и представлены на рис. 10–14.

Особенность этих систем – фактическое использование пяти лебедок, две из которых называются ограничителями (англ. Restrainer). Каждый из двух ограничителей собран на единой раме с одной из двух кормовых лебедок (рис. 14). Тросы от лебедок и ограничителей выведены на палубу через сквозные шкивы и отверстия в палубе, как и на классических траверсных системах SATS или «TRIGON». ограничители – лебедки натяжения. Они при транспортировке вертолета постоянно натягивают «удерживающие тросы» (рис. 10), создавая растяжение, благодаря чему происходит удержание вертолета от опрокидывания и скольжения. На травление тросов ограничители работают только для того, чтобы подсоединить тросы к вертолету. Остальные лебедки, преодолевая натяжение ограничителей, осуществляют транспортировку вертолета в ангар и из ангара. Тросы от ограничителей также закрепляются на петлях колес основных стоек шасси.

Одношкивные блоки с вертлюгом и отклоняющие ролики также аналогичны по конструкции блокам классических систем SATS или «TRIGON» (рис. 12, рис. 13).

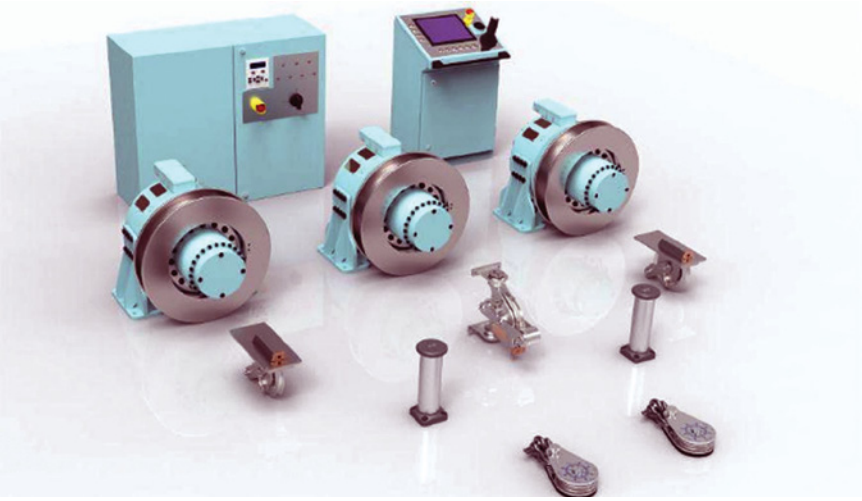


Рис. 7. ***Компоненты системы SATS***
URL: https://www.mactag.com/uploads/images/banner/1549288121CompleteSATSPackage.jpg (дата обращения 03.06.2021).

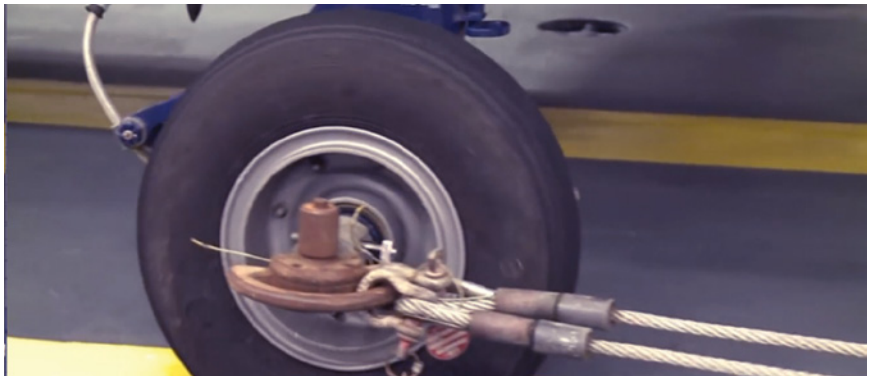


Рис. 8. ***Крепление тросов к шасси вертолета «Lynx»***
URL: https://www.youtube.com/watch?v=qDFEtSRUILI (дата обращения 10.06.2021).

*URL: https://www.youtube.com/watch?v=6XvdXngYN

Рис. 9. ***Крепление тросов к шасси вертолета «MH-60R Seahawk»***
URL: https://www.youtube.com/watch?v=E7A1slO_jMk (дата обращения 10.06.2021).

Рис. 10. ***Безрельсовая траверсная система компании GRSE***
URL: http://www.grse.in/index.php/product-profile/engineering/2-uncategorised/77-deck-machinery-items.html (дата обращения 11.06.2021)..

Рис. 11. ***Вертолетная траверсная система компании Hankook***
URL: http://hankook-eng.com.sg/naval-equipment/?ckattempt=1 (дата обращения 01.06.2021).

Конструкция буксировочных устройств при этом может быть различной и целиком и полностью зависит от конструкции шасси вертолета.

На рис. 14 из видеоматериала, находящегося в открытых интернет-ресурсах, системой компании BADA осуществляется транспортировка вертолета с помощью «буксировочного устройства», смонтированного на полозковом шасси вертолета.

Выравнивание вертолета также требует участия пилота или оператора. Помощь выравниванию оказывает пилотом, выполняющего рулевое управление носовым шасси вертолета либо посредством закрепленного на носовом шасси кронштейна типа водило, которым подруливает оператор из личного состава, обслуживающего устройство. На траверсных системах, подобных системе «TRIGON», сопровождение вертолета, как правило, на всем участке транспортировки в ангар и из ангара выполняется несколькими операторами из команды корабля, дополнительно страхующими вертолет от нештатных ситуаций, как это показано на рис. 9 и рис. 13.

На сайте компании BADA приведен максимальный вес вертолетов для транспортировки их системой обслуживания, равный 14 т.

Опыт эксплуатации траверсных систем разработки ЗАО «ЦНИИ СМ», в составе которых есть две лебедки, показал, что для удержания вертолета массой 12,5 т на палубе от скольжения и опрокидывания в условиях килевой в 4° качки и бортовой в 12,5° требуются усилия: удерживающее в тросе 28,5 ± 1,5 кН и тянущее в тросе 31,5 ± 1,5 кН.

Система «TRIGON», не считая аналогов, используется в течение многих лет на более чем двухстах кораблях, построенных для различных флотов.

По сравнению с системой RAST и прочими «рельсовыми» системами «TRIGON» имеет несколько явных достоинств:

- безопасность при посадке.
- простота в управлении пилотом вертолета;
- адаптивность для любого типа вертолетов;
- ремонтопригодность и простота в обслуживании;
- надежность и отказоустойчивость;
- простота монтажа на корабле.

Основным недостатком данной системы относительно «рельсовых» систем – необходимость наличия обслуживающего персонала на палубе.

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЕРТОЛЕТА

Рельсовая система PRISM была разработана и построена компанией MacTaggart Scott для 16-тонного вер-

Рис. 12. ***Одношкивный блок с вертлюгом системы компании BADA, закрепленный на палубной петле***
URL: https://www.youtube.com/watch?v=ZCCMzdoZSCg&t=263s (дата обращения 15.06.2021).

Рис. 13. ***Транспортировка вертолета из ангара системой компании BADA***
URL: https://www.youtube.com/watch?v=ZCCMzdoZSCg&t=263s (дата обращения 15.06.2021).

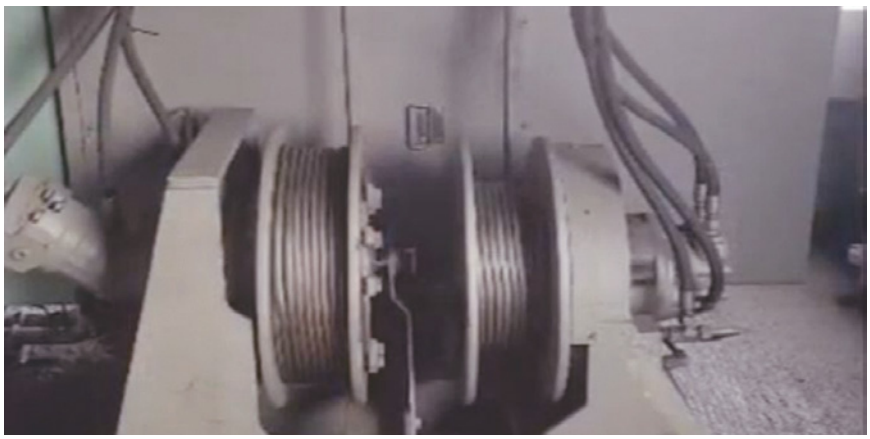


Рис. 14. ***Одна из двух кормовых гидравлических лебедок на единой раме с ограничителем системы компании BADA***
URL: https://www.youtube.com/watch?v=ZCCMzdoZSCg&t=263s (дата обращения 15.06.2021).

Рис. 15. ***Электромеханический замок тележки в зацеплении с зондом вертолета***
URL: https://s2.q4cdn.com/767595508/files/doc_downloads/indal/horizon/Curtiss-Wright-Naval-Handling-Systems-Brochure.pdf (дата обращения 03.06.2021).

толета типа «Merlin» британских фрегатов «Type 23». Это специализированная трехрельсовая система, соединяющаяся с вертолетом через удлинители осей. В данной системе имеются три каретки/тележки, которые закрепляются на колесах шасси и перемещаются тросами внутри рельсов. Информации о механизме выравнивания вертолета нет.

Система ASIST (Aircraft Ship Integrated Securing & Traversing, или авиационное корабельное интегрированное закрепление и перемещение) американо-канадской компании Curtiss-Wright's INDAL обеспечивает выполнение морских операций в условиях волнения моря до 5–6 баллов. Это однорельсовая система.

Вертолет должен быть оборудован зондом, как и для систем RAST.

Система использует лазерные маяки на вертолете и камеры-приемники на палубе в кормовой части корабля, расположенные по бортам, чтобы не только отображать визуальные средства посадки пилоту, но и динамически позиционировать тележку RSD прямо под вертолетом, когда он приземляется.

Таким образом основное выравнивание вертолета делается в воздухе благодаря электронной системе точного определения положения вертолета «Helicopter Position Sensing System» («HPSS»), которая непрерывно отслеживает и контролирует точное положение вертолета относительно назначенной зоны посадки и отображает его пилоту с помощью серии визуальных сигналов.

Данные о местоположении одновременно передаются на управляемое компьютером устройство быстрого закрепления RSD, которое автоматически перемещается вперед и назад по рельсам на полетной палубе для поддержания своего положения непосредственно под зондом, установленным на нижней стороне фюзеляжа вертолета.

Как только вертолет входит в контакт с палубой, RSD фиксирует зонд специальным электромеханическим замком (рис. 15) и транспортирует вертолет в ангар. Использование на зонде лебедки и подача троса через него с вертолета, как на системе RAST, исключено полностью.

Окончательное выравнивание вертолета на палубе может осуществляться при помощи перемещения замка с закрепленным зондом вдоль балки RSD в траверзных направлениях, а также перемещениями самого RSD по рельсу в носовом и кормовом направлениях.

К явным достоинствам относится то, что один оператор в ангаре может выполнять все операции, находясь в безопасном месте. Никакой другой персонал на полетной палубе не требуется,

и корабль может маневрировать без каких-либо ограничений, как только вертолет будет закреплен. После закрепления зонда вертолета маневрирование и транспортировка в ангар могут быть выполнены менее чем за пять минут даже в самых сложных погодных условиях.

ASIST разрабатывалась как более совершенная система на замену системы RAST для вертолетов, оборудованных зондами.

Недостатки данной системы во многом схожи с недостатками системы RAST:

- для вертолетов с одним шасси в передней части фюзеляжа необходимо участие пилота в подруливании вертолетом при выравнивании и транспортировке;
- тележка системы ASIST технически сложна. Низкая ремонтопригодность в условиях заказа;
- система не позволяет разместить устройство хранения и подачи боезапаса под палубой;
- работает только в случае штатной посадки с использованием оптико-электронных систем;
- возможно обледенение рельсов при эксплуатации в арктических и субарктических широтах, приводящее к отказу системы;
- высокая трудоемкость обеспечения дренажа морской и талых вод из конструкции рельсов.

Система TC-ASIST (Twin Claw Aircraft Ship Integrated Securing & Traversing, или двухзахватное авиационное корабельное интегрированное закрепление и перемещение) американо-канадской компании Curtiss-Wright's INDAL создана для поддержки вертолетов, необорудованных «зондом». Система служит либо для работы с вертолетами, оборудованными гарпунным палубным замком и посадочными решетками либо в качестве автономной системы.

Оптико-электронные системы-помощники для выравнивания и приземления вертолета HPSS аналогичны ASIST. Устройство быстрого закрепления RSD перемещается из положения ожидания в положение выравнивания с положением вертолета, когда он зависает над ВППл так, чтобы оказаться позади его основных стоек шасси.

После приземления вертолета на палубу и активации пилотом вертолета гарпунного палубного замка RSD уже находится рядом с основными стойками шасси вертолета.

Конструкция RSD TC-ASIST отличается от конструкции RSD ASIST, она использует удлинители осей на колесах основных стоек шасси вертолета. RSD оснащен парой подпружиненных клешневых рычагов для захвата и закрепления удлинителей осей колес, установленных на основных опорах шасси вертолета. Рычаги перемещаются вдоль балки RSD до тех пор, пока датчики не обнаружат, что каждый рычаг замечает колесо, и в это время каждый рычаг захвата вращается вверх, чтобы захватить выступающую ось колеса. Рычаги действуют независимо, но с механической связью между собой для обеспечения одновременной работы. После захвата колес они приподнимаются рычагами над палубой, предохраняя колеса основных стоек шасси от скольжения в процессе выравнивания (рис. 16 и рис. 17).

После того как ЛАК закреплен, он готов к выравниванию для перемещения в ангар или любое промежуточное место. Все палубные операции по обслуживанию могут быть выполнены без

Рис. 16. ***Вертолет с закрепленным RSD системы TC-ASIST***
URL: https://www.cw-ems.com/indal/products/helicopter-securing-and-traversing/TC-ASIST/2018/default.aspx (дата обращения 03.06.2021).

Рис. 17. ***«Клешня» тележки RSD в захвате с выступающей осью колеса вертолета основной стойки шасси***
URL: https://www.cw-ems.com/indal/products/helicopter-securing-and-traversing/TC-ASIST/2018/default.aspx (дата обращения 03.06.2021)

присутствия персонала на полетной палубе. TC-ASIST обеспечивает безопасную и быструю функцию выравнивания и перемещения без использования персонала или кабелей на палубе.

Достоинства и недостатки системы TC-ASIST аналогичны системе «ASIST» с той лишь разницей, что система TC-ASIST может работать с вертолетами, необорудованными зондом, а с любыми типами вертолетов, даже без палубных замков «гарпун», принимая во внимание то, что без палубного замка вертолет уязвим для сильных ветров и волнения моря.

Система TC-ASIST, в отличие от ASIST, – двухрельсовая. Тележка RSD имеет большие габаритные размеры и перемещается на двух рельсах.

Система MAST (The Manual Aircraft Securing & Traversing, или ручное авиационное закрепление и перемещение) также американо-канадской компании «Curtiss-Wright's INDAL»

Работает в сочетании с системой палубного замка «гарпун» и решетки.

Данная система аналогична системе TC-ASIST представляет собой альтернативу для крепления вертолета на полетной палубе во время маневрирования и транспортировки. MAST также использует рычаги для захвата удлинителей осей колес основных стоек шасси.

Доступность системы MAST достигается за счет исключения более сложных автоматических систем управления, используемых в системе TC-ASIST, а также за счет использования одной палубной колеи или рельса.

MAST управляется только одним оператором, находящимся на палубе корабля и управляющим процессом захвата рычагами тележки удлинителей осей колес, а также процессами выравнивания и транспортировки вертолета. Тележка здесь называется устройством палубного закрепления (англ. Deck Securing Device, DSD).

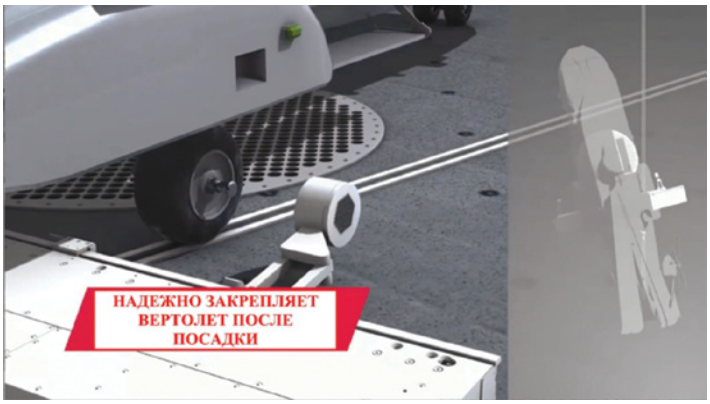
Оператор управляет тележкой через пульт, соединенный с тележкой через кабель, сопровождая ЛАК на всем пути транспортировки (рис. 18, *а–в*).

На рис. 19 представлена схема расположения оборудования системы MAST, взятая с официального сайта компании Curtiss-Wright's INDAL. Помимо траверсной лебедки здесь используется регулятор натяжения троса. Тросовая система перемещения тележки DSD замкнутая. В процессе работы устройства трос будет удлиняться, растягиваясь от нагрузки. Это неизбежный процесс. Регулятор натяжения должен компенсировать это растяжение для устойчивой работы системы.

Упрощение автоматизации дало выигрыш в цене и массогабаритных по-

а)

б)



в)

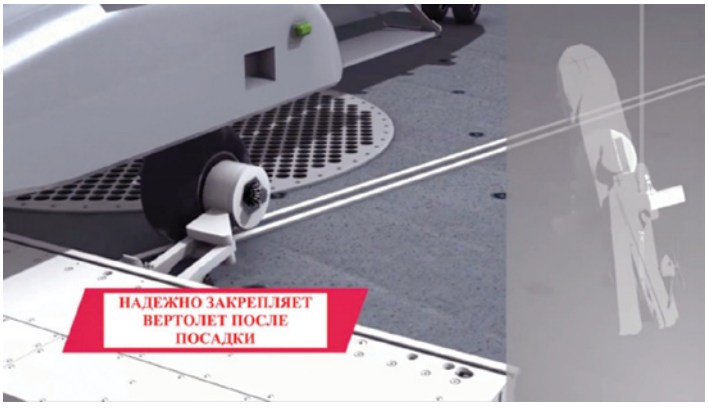


Рис. 18. а–в. ***Тележка системы MAST под управлением оператора***
URL: https://www.youtube.com/watch?v=lUzOV6-ezD8 03.06.2021))

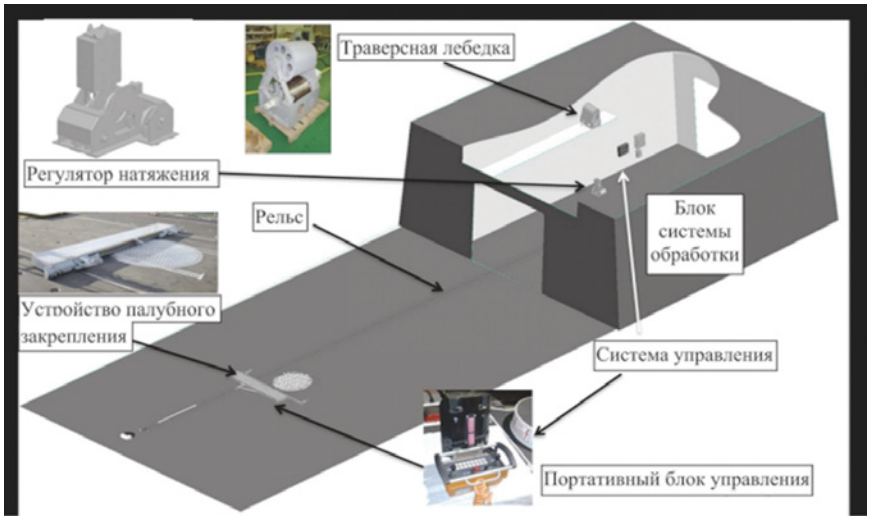


Рис. 19. ***Схема расположения оборудования системы MAST***
URL: https://www.cw-ems.com/indal/products/helicopter-securing-and-traversing/default.aspx (дата обращения 03.06.2021).

казателях, но понизило безопасность в использовании и вернуло персонал на палубу корабля.

Система «SAMAHE» французской компании Naval Group (ранее – DCNS). Предусмотрена сложная рельсовая система, пригодная для вертолетов с носовой центральной стойкой шасси. Тележка на двух рельсах толкает вертолет за носовое шасси, которое фиксируется на тележке специальной буксирной планкой, установка которой – трудоемкое занятие. Носовое шасси приподнимается над палубой специальными домкратами. Выравнивание обеспечивается специальным устройством в составе тележки, которое представляет собой изогнутый длинный плоский рычаг, конец которого закрепляется на фюзеляже вертолета посредствам подпружиненного штифта. Рычаг изогнут для того, чтобы обогнуть носовую стойку шасси. Другой конец рычага закреплен на тележке, позади буксирной планки с носовым шасси на вертикальной оси так, чтобы рычаг мог совершать вращательные движения параллельно палубе, там же расположены цилиндры – приводные тяги для изменения положения рычага. Комбинацией движения тележки по рельсам и тяг рычага вертолет выравнивается. Далее он транспортируется в ангар.

Основные недостатки – трудоемкость закрепления системы на вертолете и ограниченность применения одним типом вертолетов.

Система «FHS» немецкой компании FHS. Предусмотрена сложная рельсовая система, пригодная для вертолетов с носовой центральной стойкой шасси, способной поворачиваться на 90°.

Характерной особенностью является использование трех тележек и перемещение их с помощью цепей (рис. 20 и рис. 21). Две тележки расположены на палубе, имеют каретки с захватами «шпор» колес основных стоек шасси. Их функция – захват, выравнивание и транспортировка вертолета так, чтобы передняя стойка шасси, развернутая на 90° к основной плоскости, попала на третью тележку, которая находится в ангаре и выезжает на палубу, чтобы затем транспортировать вертолет за переднюю стойку шасси.

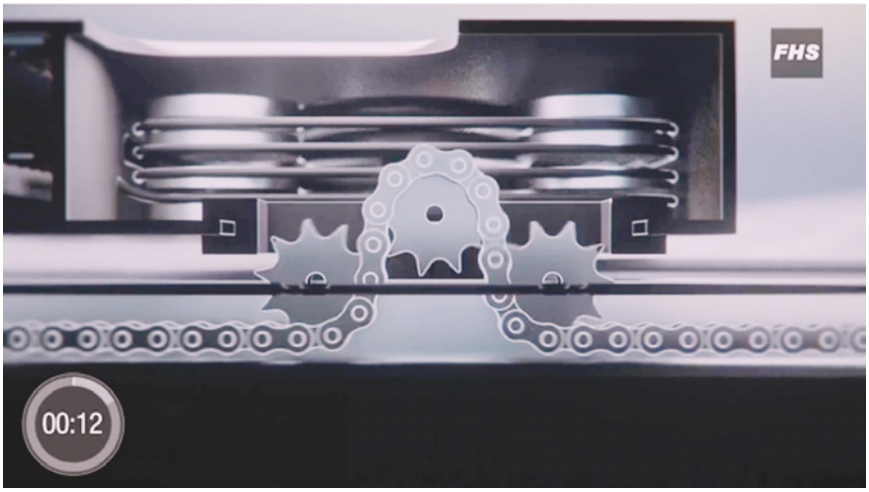


Рис. 20. ***Траверсная система перемещения тележек системы обслуживания вертолетов на палубе «FHS»***
URL: https://www.youtube.com/watch?v=tWJ68de7nqo (дата обращения 04.06.2021).

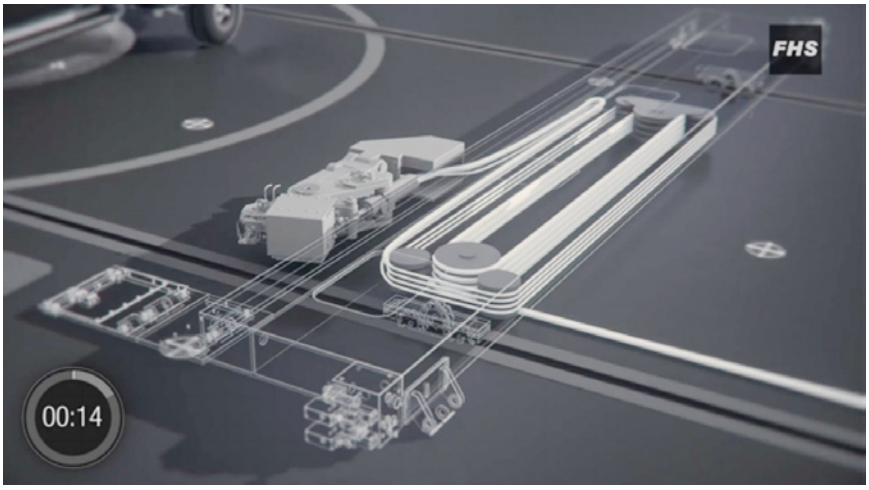


Рис. 21. ***Общий вид тележки системы «FHS» с кабельным укладчиком***
URL: https://www.youtube.com/watch?v=tWJ68de7nqo (дата обращения 04.06.2021).

Высокая степень автоматизации исключает наличие персонала на палубе, но очень низкая ремонтопригодность, наличие множества рельс, отказ в случае выхода из строя хотя бы одной из тележек делают эту систему очень спорным решением для кораблей ВМФ.

Требуется высокая точность посадки на палубу. Выравнивание вертолета возможно на небольших углах отклонения проекции его продольной оси на палубу от линии транспортировки вертолета, параллельной диаметральной плоскости (ДП) корабля.

Свои **аналоги как двухрельсовых балочных, так и траверсных систем** выпускает немецкая компания Bosch Rexroth group.

Системы компаний Naval Group, FHS, Bosch Rexroth group пригодны для эксплуатации только с гарпунным палубным замком и посадочной решеткой, так как не имеют других систем защиты от скольжения и опрокидывания вертолета.

Как и любые рельсовые системы, они имеют недостатки, связанные с необходимостью удаления наледи при эксплуатации в условиях Арктики, влаги из рельсовых конструкций.■

Продолжение следует

Предприятие основано в 1933 году

Россия 197198, С.-Петербург, Петровский пр., 26 лит. Ч, оф. 1
Тел.: +7 (812) 235 5148; Факс: +7 (812) 235 7069
Тел./Факс: +7 (812) 350 1164
E-mail: market@almaz.spb.ru; www.almaz.spb.ru

На правах рекламы

МКС

МОРСКИЕ КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ

«МОРСКИЕ КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ» — ВЕДУЩЕЕ РОССИЙСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩЕЕ ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ В ОБЛАСТИ ВОЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО СУДОСТРОЕНИЯ

НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОМПАНИИ:

- Архитектурно-художественное проектирование
- Разраболтка конструкторской документации
- Полный цикл производства работ по оборудованию помещений
- Оборудование для рыбопромысловых судов

СОБСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО КОМПАНИИ:

- Сэндвич-панели
- Панели композитные «ИНФЛАМАКС» ТГ, ТГ-А, ФП
- Судовая мебель
- Палубные покрытия
- Двери судовые
- Модульные конструкции

ООО «Морские Комплексные Системы»
197022, г. Санкт-Петербург, Аптекарская наб., 20
Тел: +7 (812) 441 24 01
e-mail: info@mcs-spb.com

www.marine-system.ru

*На правах рекламы

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ООО «МКС» НА ЖИВУЧЕСТЬ КОРАБЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ

П.А. Зубков, *канд. техн. наук,*
ген. директор ООО «Морские комплексные системы»,
контакт. тел. (812) 368 3951

В настоящее время военно-морской флот, невзирая на определенные проблемы, в том числе проблему недофинансирования, продолжает обновление своего боевого состава. Этот ключевой вывод следует из анализа российских государственных программ вооружения на 2011 – 2020 гг. и 2018 – 2027 гг. Наблюдается стремление к серийному строительству кораблей, к усовершенствованию уже созданных небольших кораблей с целью увеличения их боеспособности.

В то же время, несмотря на определенный оптимизм во взгляде на развитие отечественного ВМФ, вопросы надежности, безопасности и живучести разрабатываемых комплексов вооружения и корабельного оборудования для строящихся и находящихся в эксплуатации кораблей, а также качество разрабатываемых и внедряемых импортозамещающих материалов в кораблестроении и судоремонте вызывают серьезную обеспокоенность Министерства обороны России и ВМФ.

В качестве ответа на современные запросы флота специалисты компании ООО «МКС» проводят глубокую инженерную проработку проблем проектирования, разработки и изготовления негорючих покрытий и пожаробезопасных материалов. Также развернуто производство корабельной мебели с использованием инновационных негорючих материалов. Одними из последних разработок компании являются инновационная система зашивки «Инфламакс ТГ» для жилых и служебных помещений корабля, имеющая класс огнестойкости В-0, В-15 и палубных покрытий «Инфлакс», «ТикМарин» и «ЭпоксиКоут», имеющих высочайшие показатели износостойкости (рис. 1 и рис. 2).

Рис. 1. ***Вид двухместной каюты, которая отделана с использованием конструктивно-отделочных панелей «Инфламакс ТГ»***

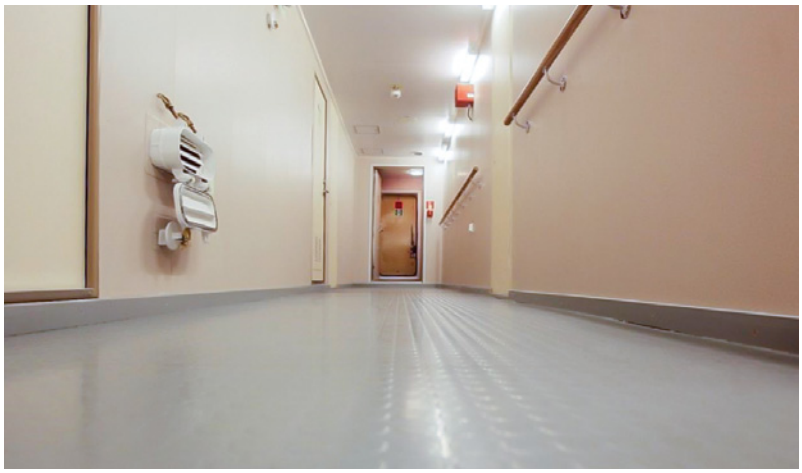


Рис. 2. ***Вид палубного покрытия «Инфлакс»***

Весь комплекс новых разработанных и применяемых технических решений и инновационных материалов, созданных инженерами компании, в той или иной степени влияют на эксплуатационные свойства корабля в целом. Наибольшие изменения касаются таких свойств корабля, как живучесть, безопасность и надежность, что непосредственно сказывается на эффективности выполнения кораблем поставленных задач. В связи с этим вносимые конструктивные инновации и конструктивные решения требуют количественной качественной оценки. В качестве инструмента такой оценки инженеры компании использовали теорию автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем.

В основу математического моделирования влияния принимаемых технических решений непосредственно на живучесть корабля, принят логико-вероятностный метод, позволяющий производить анализ сложных технических систем, в том числе военного назначения.

В общем случае логико-вероятностными называют методы системного анализа, в которых аппарат математической логики используется для первичного структурного и детерминированного аналитического описания условий функционирования элементов в исследуемой системе, а методы теории вероятностей применяются для количественной оценки различных свойств ее устойчивости (надежности, живучести, безопасности), эффективности или риска (ожидаемого ущерба) функционирования на основе заданных вероятностных и других параметров элементов [1].

Создателем, общепризнанным лидером и руководителем отечественной научной школы логико-вероятностных методов (ЛВМ) моделирования является академик И.А. Рябинин [1]. Большой вклад в становление и развитие отечественной школы ЛВМ внесли выдающиеся отечественные ученые А.С. Смирнов, Г.Н. Черкесов, Ю.М. Парфенов, Э.А. Лосев, В.Г. Китушин, А.О. Алексеев, О.В. Татусьян и многие другие [2]. Их многочисленные труды и работы учеников внесли определяющий вклад

в создание современной отечественной теории логико-вероятностного анализа систем. Сформировались новые научные направления, такие как логико-вероятностная теория живучести систем, логико-вероятностная концепция теории безопасности [2], а также основы теории и технологии автоматизированного структурно-логического моделирования систем [2].

Математическая сущность ЛВМ заключается в использовании функций алгебры логики для аналитической записи условий работоспособности или отказа систем и последующего перехода от них к соответствующим расчетным вероятностным моделям (аналитическим, статистическим, Марковским или сетевым). Эти вероятностные модели далее применяются для расчета различных вероятностных показателей надежности, живучести, безопасности, эффективности и риска функционирования исследуемых системных объектов.

Общий ЛВМ системного анализа, который последовательно реализуют специалисты компании, подразделяется на пять этапов:

I. Выбор прямого, обратного или комбинированного подхода к логико-вероятностному моделированию.

II. Формализованная постановка задачи, первичное структурно-логическое моделирование.

III. Построение логической функции безопасности системы или перехода в опасное состояние.

IV. Построение расчетной математической модели системы.

V. Выполнение расчетов системных вероятностных характеристик.

Содержания указанных этапов проиллюстрированы простым примером ЛВМ и расчета вероятностной оценки риска перехода системы в опасное состояние (перерастания возгорания в каютах в объемный пожар и распространение пожара в смежные помещения).

Пример 1. Рассматриваются каюта (рис. 3, *а*), мебель которой (стол письменный и шкаф) выполнена из дерева (столярная плита, облицованная шпоном), и каюта (см. рис. 3, *б*), где используется металлическая мебель (стол письменный и шкаф, выполненные из стали и стилизованы под дерево).

Для упрощения в качестве основных элементов каюты, которые достоверно подвергаются огневому воздействию, будут рассматриваться мебель – стол письменный (x_2) и примыкающий к нему шкаф (x_3), а также ограждающие каюту от смежных помещений переборки (x_4). В качестве источника воспламенения рассматриваться урна (x_1), находящаяся под столом и заполненная бумагой, которая достоверно воспламеняется от выброшенного из пепельницы

Рис. 3. ***Общий вид оборудования и мебели в каютах на корабле: а – деревянная мебель; б – металлическая мебель***
x_1 – урна с мусором (установлена под столом и на рисунке не видна, воспламеняется от брошенного окурка); x_2 – стол письменный; x_3 – шкаф для одежды; x_4 – переборки смежного помещения

сигаретного пепла с не полностью погашенным окурком.

С использованием ЛВМ следует определить вероятность перерастания возгорания в каютах (от брошенного пепла в урну и достоверного ее возгорания) в объемный пожар (событие Y_1), т.е. возгорания письменного стола, под которым стоит урна, и возгорания шкафа, который соприкасается с письменным столом, а также вероятность распространения пожара в смежные помещения, т.е. разрушения переборок от огневого воздействия (событие Y_2).

Этап I. Выбор подхода к ЛВМ. Выбираем прямой подход, так как мы используем структурную модель, которая представляет логические условия реализации системой перехода в опасное состояние, т.е. вероятности перерастания возгорания в объемный пожар и распространение его за пределы каюты.

При обратном подходе рассматривались бы вероятности неперерастания возгорания в объемный пожар и нераспространения его за пределы каюты.

Этап II. Формализованная постановка задачи. На данном этапе определяем следующие три основные группы данных:

1. В соответствии с выбранным подходом строится формализованная структурная модель исследуемого свойства системы (в нашем случае перехода в опасное состояние каюты, т.е. возникновения в ней большого объемного пожара). Она задается в графической форме (рис. 4 и рис. 5), которая обеспечивает строгое представление и учет:

– поражения огнем или непоражения основных элементов каюты (в нашем случае это стол, шкаф, ограждающие переборки, представляемых простыми бинарными случайными событиями x_i:

$$i = 1,2,...,H, \quad \tilde{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}. \qquad (1)$$

– функциональных взаимосвязей между выделенными элементами, которые определяют условия реализации ими соответствующих выходных (интегративных) функций y_i:

$$\tilde{y}_i = f(\tilde{x}_i, \varphi_i(\tilde{y}_j, \tilde{y}_k, ..., \tilde{y}_l)) \qquad (2)$$

– возможность алгоритмической (ручной или машинной!) реализации процедуры построения логической функции перехода в опасное состояние системы:

$$G(X,Y) = S\{\tilde{y}_i = f(\tilde{x}_i, \varphi_i(\tilde{y}_j, \tilde{y}_k, ..., \tilde{y}_l)), \; i = 1,2,...,H\}. \qquad (3)$$

В рассматриваемом примере исходная схема (см. рис. 3) оборудования и мебели кают представляется (см. рис. 4 и рис. 5) в виде схем функциональной целостности (СФЦ) при описаний условий развития большого объемного пожара в каютах и распространения его в смежные помещения. В первом случае (см. рис. 4) условием развития большого объемного пожара в каюте считается воспламенение от горящей урны письменного стола и от него – шкафа для одежды, т.е. возгорания всего оборудования и мебели каюты. Во втором случае (см. рис. 5) условием распространения пожара в смежные помещения считается разрушение ограждающих каюту переборок от температурного воздействия большого объемного пожара в каюте.

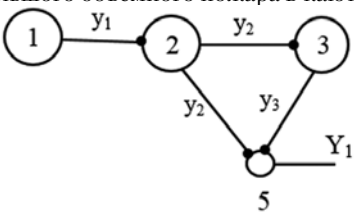


Рис. 4. ***Схема функциональной целостности при описании логических условий перерастания возгорания в каюте в большой объемный пожар***

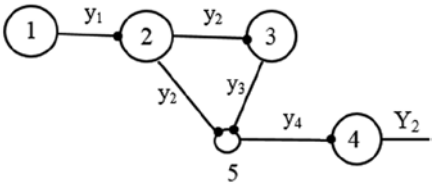


Рис. 5. ***Схема функциональной целостности при описании логических условий распространения пожара в смежные помещения***

Прежде всего следует осознать, что СФЦ – это своеобразная знаковая система, язык записи формализованных

знаний о составе и условиях функционирования элементов в исследуемой системе. Более подробно методология построения СФЦ изложена в [2, 3].

В математическом смысле СФЦ – это графическая форма записи системы логических уравнений, где частные решения определяются после задания начальных условий, критериев функционирования системы и параметров элементов.

Физический смысл СФЦ – строго формализованно представить знания о функционировании элементов, т.е. при каких условиях реализует функцию каждый элемент.

2. Задание логического критерия функционирования системы. В рассматриваемом примере определены два логических критерия, а именно:

– ЛКФ$_1$ – перерастание возгорания в каютах (от брошенного пепла в урну и достоверного ее воспламенения) в большой объемный пожар (событие Y_1);
– ЛКФ$_2$ – распространение пожара в смежные помещения, т.е. разрушение переборок от огневого воздействия (событие Y_2).

3. Определение собственных вероятностных параметров элементов кают.

В данном случае подразумевается определение, например, вероятностей возгорания оборудования и мебели в каютах, т.е. возгорания стола письменного от горящей урны с мусором, возгорание шкафа от горящего стола письменного, разрушение ограждений (переборок) в каютах от огневого воздействия на них большого объемного пожара.

Определение этих параметров справедливо называют «проблемой исходных данных», которая должна решаться отдельно в различных областях системных исследований.

В ЛВМ разрешение проблемы исходных данных зависит от следующих аспектов:

– определимости исходных данных и их соответствия физическому и смысловому содержанию исходных бинарных событий;
– точности параметров и статистической устойчивости вероятностных характеристик элементов.

В рамках данного примера следует исходить из условия, что проблема исходных данных разрешена и вероятностные характеристики элементов кают представлены (см. таблицу).

Таблица

Вероятностные характеристики возгорания (разрушения) оборудования кают и мебели

Оборудование кают и мебель	Обозначение	Вероятность возгорания (разрушения) p_i	
		Деревянная мебель	Металлическая мебель
Урна с мусором	x_1	1,0	1,0
Стол письменный	x_2	0,9	0,1
Шкаф для одежды	x_3	0,8	0,05
Ограждающие переборки	x_4	0,2	0,2

Этап III. Построение логической функции опасного состояния (ЛФОС). В тех случаях, когда структурная система велика, а критерии сложные, логические функции не могут быть построены вручную из-за высокой трудоемкости и большой размерности задачи, прибегают к автоматизированному структурно-логическому моделированию с использованием программ расчета надежности, живучести и безопасности на ПЭВМ, разработанных профессором А.С.Можаевым [4–5].

Для представленного примера структурная схема имеет небольшую размерность и позволяет продемонстрировать построение ЛФОС вручную. Для критерия функционирования Y_1 (перерастание возгорания в каюте в большой объемный пожар) функция опасного состояния имеет вид

$$ФОС_1 = 1 \cdot 2 \cdot 3. \quad (4)$$

Это означает, что для перерастания возгорания в каюте в большой объемный пожар необходима последовательная реализация цепочки событий: возгорание урны с мусором от температурного воздействия горящей урны происходит возгорание письменного стола, от температурного воздействия горящего письменного стола происходит возгорание шкафа для одежды, что все в совокупности свидетельствует о наличии большого объемного пожара в каюте.

Для критерия функционирования Y_2 (распространение пожара в смежные помещения) функция опасного состояния имеет вид

$$ФОС_2 = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4. \quad (5)$$

Последнее означает, что для распространения пожара в смежные помещения после образования большого объемного пожара в каюте от температурного воздействия должны разрушиться ограждающие переборки, которые выполнены с определенным классом огневой устойчивости. В противном случае пожар будет протекать и затухать (после выгорания всего того, что составляет пожарную нагрузку) в пределах каюты, где он возник.

Этап IV. Построение вероятностной функции опасного состояния (ВФ). Сущность данного этапа состоит в строгом переходе по законам теории вероятностей от составленных логических функций опасного состояния к вероятностным функциям, определяющим вероятность сложного случайного события. В том случае, когда ЛФОС имеют большую размерность, можно также прибегнуть к автоматизированному структурно-логическому моделированию с использованием программ расчета на ПЭВМ.

В данном случае ЛФОС являются достаточно простыми для ручного перехода к вероятностным функциям. В процессе перехода к ВФ цифры в уравнениях записи ЛФОС заменяются на вероятностные показатели, характеризующие надежность соответствующих элементов:

$$ВФ_1 = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3; \quad (6)$$

$$ВФ_2 = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4. \quad (7)$$

Следует заметить, что в ВФ$_1$ и ВФ$_2$ осуществлен переход от логического произведения записи ЛФОС к вероятностному произведению по законам теории вероятностей.

Этап V. Выполнение расчетов системных вероятностных характеристик. На основе построенных вероятностных функций вычисляются системные вероятностные характеристики, в частности, вероятности развития большого объемного пожара в каюте с деревянной мебелью ($P_1^{дер}$) и в каюте с металлической мебелью ($P_1^{мет}$), а также вероятности распространения пожара в смежные помещения ($P_2^{дер}$, $P_2^{мет}$) для обоих вариантов кают.

Расчеты выполняем путем подстановки в уравнения вероятностных функций значения исходных характеристик вероятностей возгорания мебели и вероятности разрушения переборок из таблице.

$$P_1^{дер} = 1{,}0 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}8 = 0{,}72; \quad (8)$$

$$P_1^{мет} = 1{,}0 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}05 = 0{,}005; \quad (9)$$

$$P_2^{дер} = 1{,}0 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}2 = 0{,}144; \quad (10)$$

$$P_2^{мет} = 1{,}0 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}2 = 0{,}001. \quad (11)$$

В качестве результатов оценки рассматриваются следующие вероятностные показатели:

1) вероятность развития большого объемного пожара при достоверном воспламенении урны с мусором в каюте с деревянной мебелью составляет $P_1^{дер} = 0{,}72$ (72%), что свидетельствует о высокой пожарной опасности кают с таким оборудованием;

2) вероятность развития большого объемного пожара при воспламенении урны с мусором в каюте с металлической мебелью составляет $P_1^{мет} = 0{,}005$ (0,5%), что свидетельствует о ее высокой пожарной безопасности;

3) вероятность распространения пожара в смежные помещения из каюты с деревянной мебелью составляет $P_2^{дер} = 0{,}144$ (14,4%), а из каюты с металлической мебелью – $P_2^{мет} = 0{,}001$ (0,1%).

Полученная вероятность зависит от двух факторов: от суммарной пожарной нагрузки оборудования каюты и мебели, что предопределяет среднеобъемную температуру большого объемного пожара, а также от класса огневой устойчивости ограждающих каюту конструкций (переборок), т.е. от их способности не разрушаться при длительном воздействии высоких температур.

Кроме вероятности перехода в опасное состояние структурно сложных систем, с использованием ЛВМ можно получить количественную оценку ряда других показателей, таких как живучесть при форс-мажорных воздействиях на корабль и надежность, включая комплексные показатели надежности.

ВЫВОД

Использование аппарата логико-вероятностных методов в совокупности с моделированием развития пожара в помещениях позволяет количественно оценить вероятностные характеристики противопожарной безопасности жилых и служебных помещений корабля и на их основе спрогнозировать изменение перспективных негорючих материалов.

На основе анализа полученных вероятностных характеристик можно сделать вывод о том, что существенный вклад в противопожарной безопасности жилых и служебных помещений корабля вносит горючесть материала оборудования и мебели, что способствует прогнозированию необходимых физических свойств разрабатываемых перспективных материалов.

Использование инженерами компании ООО «МКС» современных методов математического моделирования и логико-вероятностного метода анализа сложных технических систем, а также внедрение созданных на их основе технических и технологических решений позволяет не только оснащать перспективные корабли мебелью, имеющей характеристики, обеспечивающие комфортные условия пребывания на корабле личного состава, но и существенно (в разы) повышать противопожарную безопасность жилых и служебных помещений и корабля в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рябинин И.А., Черкесов Г.Н.* Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М.: Радио и связь, 1981. – 286 с.
2. *Можаев А.С.* Автоматизация моделирования систем ВМФ: Учебник ВМА. – Ч.II: Автоматизированное структурно-логическое моделирование систем. – СПб.: ВМА, 2006. – 577 с.
3. *Можаев А.С.* Универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программный модуль построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем. – Тр. Международной научной школы: «Моделирование и анализ безопасности, риска в сложных системах» (МА БР – 2003). – СПб.: СПбГУАП, 2003, с.101–110.
4. *Можаев А.С.* Учебно-методическое пособие по автоматизированному структурно-логическому моделированию и расчету показателей надежности, живучести и безопасности систем на ПЭВМ. – СПб.: ВМА, 1998.
5. Моделирование пожаров и взрывов / Под ред. *Н.Н. Брушлинского, А.Я. Корольченко.* – М.: Пожнаука, 2000. – 482 с.

О ВЛИЯНИИ ПРИБЛИЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СУПЕРМАТРИЦЫ НА РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МЕТОДОМ АНАЛИТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

***О.В. Третьяков**, д-р техн. наук, доцент,*
***М.В. Шебуняев**, канд. техн. наук,*
***П.И. Щукин**, канд. техн. наук, доцент,*
***А.И. Гайкович**, д-р техн. наук, проф.,*
НИИ К и В ВУНЦ ВМФ ВМА им. Н.Г. Кузнецова,
контакт. тел. +7 (812) 232 7946

...более дивной музыки, чем музыка
о теории чисел, я не слышал...
В. Дудинцев. «Не хлебом единым»

Метод аналитических сетей (МАС) представляет собой универсальную теорию измерений влияния в шкале отношений с учетом зависимостей и обратных связей. Автор метода Томас Л. Саати выделяет восемь основных этапов для получения итогового результата [1]:

1. Сформулировать главную цель исследования.

2. Для рассматриваемого решения сформулировать критерии и подкритерии в управляющих иерархиях выгод, возможностей, издержек и рисков и определить их приоритеты из матриц парных сравнений. Если величина глобального приоритета управляющего критерия или подкритерия не превышает 3%, следует внимательно проанализировать возможность его устранения из иерархии.

3. На начальном этапе построить максимально обобщенную сеть кластеров и их элементов, которая объединяет все управляющие критерии.

4. Из обобщенной сети выбрать кластеры, которые имеют отношение к каждому управляющему критерию или подкритерию, и установить между ними связи, соответствующие внешним и внутренним зависимостям.

5. Определить подход к способу анализа кластеров или элементов: рассматривать активное влияние одного кластера (элемента) на другие кластеры (элементы) относительно заданного критерия или анализировать кластеры (элементы), подверженные влиянию других кластеров.

6. Для каждого управляющего критерия построить суперматрицу, последовательно разместив все кластеры и содержащиеся в них элементы сверху вниз по вертикали и слева направо по горизонтали. Записать в соответствующие позиции суперматрицы векторы приоритетов, полученные из парных сравнений, как блоки соответствующих столбцов суперматрицы.

7. Выполнить парные сравнения элементов кластеров, определяя их влияние на элементы в других кластерах, с которыми они связаны, или на элементы собственного кластера. Выполнить парные сравнения кластеров по критериям управляющей иерархии. Полученные веса использовать как весовые коэффициенты для элементов соответствующих блоков суперматрицы. В результате умножения суперматрицы на весовые коэффициенты кластеров получается взвешенная суперматрица, стохастическая по столбцам.

8. Вычислить предельные приоритеты стохастической суперматрицы, возведя последнюю в предельную степень.

В методе аналитических сетей, равно как и в его частном случае – методе анализа иерархий, эксперты, используя фундаментальную шкалу относительной важности, вынуждены пользоваться помимо рациональных чисел от 1 до 9 еще и их обратными иррациональными значениями: 0,333..., 0,166..., 0,142..., 0,111...

Таким образом, выполняя округления, оператор заменяет исходное число другим, представляющим его прибли-

женно. Возникающую при этом погрешность будем называть *погрешностью округления* [1]. Исходные данные в силу своей иррациональности не будут нам известны точно. Мы будем знать не сами числа, а некоторые области, в которых они помещаются. В [1] они называются *областями неопределенности*. В результате вычислений также будет получено не точное значение, а некоторая область, в которую оно помещается, даже если последующие вычисления проводились точно, без округлений. Границы этой области определяют пределы *неустранимой погрешности*, не зависящей от способа записи чисел.

Третий вид погрешностей, не зависящий ни от погрешностей исходных данных, ни от способа записи чисел, ни от точности вычислений, носит название *погрешности метода*. Его суть заключается в том, что для решения задачи $y = A(x)$ мы заменяем пространства R_1 и R_2 другими пространствами S_1 и S_2 и функцию A другой функцией F. Поэтому даже при точных данных и при точных вычислениях с этими данными мы решим задачу, отличающуюся от той, которая нам дана. Естественно, и решение будет отличаться от точного решения исходной задачи.

Принимая вышеизложенное во внимание, остается открытым вопрос о том, *с какой же точностью оператору требуется записывать величины приоритетов в суперматрицу и как отразится на итоговом результате округление иррациональных значений*?

Такая постановка вопроса особенно актуальна при проведении расчетов на этапах 6–8. Так, в соответствии с правилами матричного исчисления [3, 4] произведением матрицы $A = (a_{ik})$ размером $(m \times n)$ на матрицу $B = (b_{kj})$ размером $(n \times p)$ называется матрица $C = (c_{ij})$ размером $(m \times p)$, у которой

$$c_{ij} = a_{i1} \cdot b_{1j} + a_{i2} \cdot b_{2j} + \ldots + a_{in} \cdot b_{nj} = \\ = \sum_{k=1}^{n} a_{ik} \cdot b_{kj} \text{при } \forall i, j. \quad (1)$$

Процедура возведения матрицы в передельные степени являет собой многократное выполнение операции ее умножения на саму себя. Исходные погрешности будут последовательно переходить, преобразовываясь от операции к операции и порождать новые погрешности.

В качестве примера можно привести вычисление трех тождественных выражений при различной точности иррационального числа $\sqrt{2} \approx 1{,}4 \approx 1{,}4167$, как показано в табл. 1. В таблице получены существенно отличающиеся друг от друга ответы, и не видно сразу, какой из них ближе к верному [1].

Особенности математического аппарата метода аналитических сетей (равно, как и метода анализа иерархий) позволяют знания экспертов об объекте исследования интерпретировать в терминах относительных сравнений, выраженных в виде отношений. Иными словами учитывая, что оператор уже произвел парные сравнения и вывел векторы локальных приоритетов, которые не противоречат его суждениям и полностью отражают его компетенции, можно ограничиться лишь погрешностью округления.

Таблица 1

Пример влияния погрешности округления на итоговый результат

$\sqrt{2}$	$\left(\sqrt{2}-1\right)^6$	$\left(3-2\cdot\sqrt{2}\right)^3$	$99-70\cdot\sqrt{2}$
$\frac{7}{5}$	0,0050960	0,00800	1
$\frac{17}{12}$	0,005238	0,0046296	–0,16666...

Рассмотрим приведенную в [1] задачу о покупке автомобиля при условии зависимости элементов от самих себя. Сетевая структура задачи показана на рис. 1. Ход вычислений векторов локальных приоритетов, а также матрицы парных сравнений достаточно подробно приведены в [1] и не представляют интереса для темы исследования.

Рис. 1. ***Структура задачи о покупке автомобиля с зависимостью элементов от самих себя***

Для изучения погрешностей округления рассмотрим три варианта суперматриц, составленных по уже проверенным суждениям экспертов, как показано в табл. 2–4. Для объективности и упрощения вычислений будем исследовать погрешность округления весового показателя стоимости американского автомобиля: в таблицах он выделен полужирным курсивом.

Таблица 2

Первый вариант взвешенной суперматрицы W_1, полученной с точностью до 0,000001

	Стоимость	Затраты	Долговечность	Американский	Европейский	Японский
Стоимость	0,500000	0,000000	0,000000	***0,317446***	0,125000	0,200000
Затраты	0,000000	0,500000	0,000000	0,095498	0,125000	0,100000
Долговечность	0,000000	0,000000	0,500000	0,087056	0,250000	0,200000
Американский	0,319155	0,290776	0,052298	0,500000	0,000000	0,000000
Европейский	0,052298	0,054726	0,319155	0,000000	0,500000	0,000000
Японский	0,128547	0,154498	0,128547	0,000000	0,000000	0,500000
∑	1,000	1,000	1,000	**0,999**	1,000	1,000

Таблица 3

Второй вариант взвешенной суперматрицы W_2, полученной с точностью до 0,001

	Стоимость	Затраты	Долговечность	Американский	Европейский	Японский
Стоимость	0,500	0,000	0,000	***0,318***	0,125	0,200
Затраты	0,000	0,500	0,000	0,095	0,125	0,100
Долговечность	0,000	0,000	0,500	0,087	0,250	0,200
Американский	0,319	0,291	0,052	0,500	0,000	0,000
Европейский	0,052	0,055	0,319	0,000	0,500	0,000
Японский	0,129	0,154	0,129	0,000	0,000	0,500
∑	1,000	1,000	1,000	**0,999**	1,000	1,000

Таблица 4

Третий вариант взвешенной суперматрицы W_3, полученной с точностью до 0,001

	Стоимость	Затраты	Долговечность	Американский	Европейский	Японский
Стоимость	0,500	0,000	0,000	***0,317***	0,125	0,200
Затраты	0,000	0,500	0,000	0,095	0,125	0,100
Долговечность	0,000	0,000	0,500	0,087	0,250	0,200
Американский	0,319	0,291	0,052	0,500	0,000	0,000
Европейский	0,052	0,055	0,319	0,000	0,500	0,000
Японский	0,129	0,154	0,129	0,000	0,000	0,500
∑	1,000	1,000	1,000	**0,999**	1,000	1,000

Как видно, все таблицы удовлетворяют условиям существования предела $\lim_{k\to\infty} W^k$ [1].

Учитывая, что все элементы предельной суперматрицы по строкам имеют одинаковые значения, результаты отобразим, как показано в табл. 5–7 (табл. 7 приведена для практического отражения предельного значения $\lim_{k\to\infty} W_3^k$).

На рис. 2 данные приоритеты показаны в виде гистограмм.

Полученные таблицы и графическое отображение приоритетов показывают, с какой осторожностью нужно обращаться с приближенными числами. Конечно, общее соотношение весовых коэффициентов осталось неизменным во всех трех случаях, но при работе с суперматрицей W_3 была допущена ошибка, которая привела к тому эффекту, при котором ее предельное значение стремится к нулю.

Это можно объяснить, исходя из формулы о произведении матриц (1). В случае с матрицей W_3 округление элемента 0,317446 по известным правилам до 0,317 привело к тому, что матрица перестала быть стохастической по столбцам: сумма элементов в соответствующем столбце составила 0,999. Как следствие, выполнялось многократное произведение величины, меньшей единицы, на подобную себе (тоже меньшую единицы), которое по определению всегда стремится к нулевому значению [3, 4]:

$$\begin{cases} \lim\limits_{n\to\infty} W^n = 0 \\ \text{при} \sum\limits_{j=1}^{n} a_{ij} < 1; \\ \lim\limits_{n\to\infty} W^n = \infty \\ \text{при} \sum\limits_{j=1}^{n} a_{ij} > 1. \end{cases} \quad . \qquad (2)$$

Очевидно, если округление было бы произведено в большую сторону, и сумма элементов в соответствующем столбце, предположим, составила бы 1,001, то предела в данном случае может не быть.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Для получения корректных значений предельных приоритетов необходимо при округлении собственных векторов в блоках суперматрицы добиться, чтобы последняя была обязательно стохастической по столбцам.

2. Особенности математического аппарата метода аналитических сетей (равно, как и метода анализа иерархий) позволяют знания экспертов об объекте исследования интерпретировать в терминах относительных сравнений, выраженных в виде отношений. Иными словами, учитывая, что оператор уже произвел парные сравнения и вывел вектора локальных приоритетов, которые не противоречат его суждениям и полностью отражают его компетенции, можно утверждать, что наибольшее влияние в методе оказывает именно погрешность округления, источником которой является сам оператор или лицо, принимающее решение.

3. Невнимательное обращение с приближенными величинами может исказить итоговый результат, так как особенность нахождения предельного значения суперматрицы приведет к тому, что исходные погрешности будут последовательно переходить, преобразовываясь от операции к операции, и порождать новые погрешности.

Таблица 5

Предельные приоритеты суперматриц при возведении в 50-ю степень

	W_1	W_2	W_3
Стоимость	0,232	0,232	0,229
Затраты	0,105	0,105	0,104
Долговечность	0,163	0,163	0,161
Американский	0,226	0,226	0,224
Европейский	0,140	0,140	0,138
Японский	0,134	0,134	0,133
∑	1,000	1,000	**0,989**

Таблица 6

Предельные приоритеты суперматриц при возведении в 100-ю степень

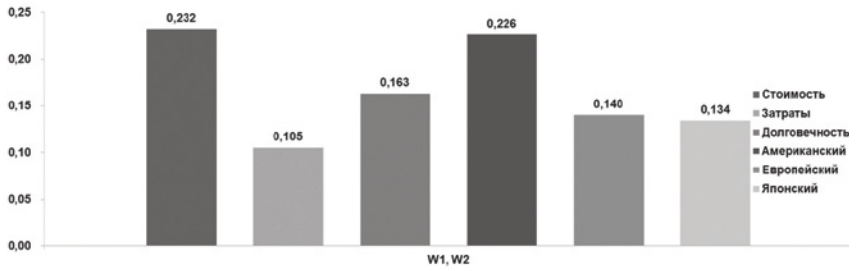
	W_1	W_2	W_3
Стоимость	0,232	0,232	0,227
Затраты	0,105	0,105	0,103
Долговечность	0,163	0,163	0,159
Американский	0,226	0,226	0,221
Европейский	0,140	0,140	0,137
Японский	0,134	0,134	0,131
∑	1,000	1,000	**0,978**

Таблица 7

Предельные приоритеты суперматриц при возведении в 10000-ю степень

	W_1	W_2	W_3
Стоимость	0,232	0,232	0,024
Затраты	0,105	0,105	0,011
Долговечность	0,163	0,163	0,017
Американский	0,226	0,226	0,024
Европейский	0,140	0,140	0,015
Японский	0,134	0,134	0,014
∑	1,000	1,000	**0,105**

а)



б)

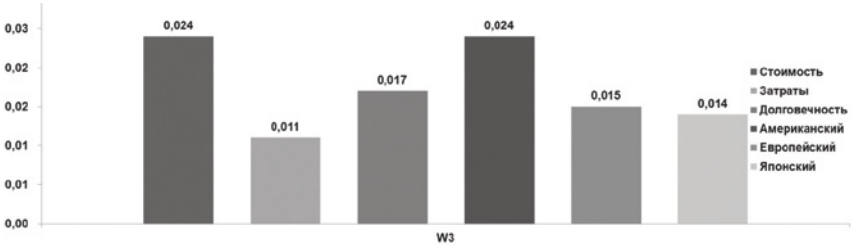


Рис. 2. ***Предельные приоритеты для суперматриц W_1 и W_2 (а) и суперматрицы W_3 (б)***

ЛИТЕРАТУРА

1. *Саати Т.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях. – М: Изд-во ЛКИ, 2008. –360 с.
2. *Березин И. С., Жидков И. П.* Методы вычислений. – М: Физматгиз, 1959. – 464 с.
3. *Воднев В. Т., Наумович Н. Ф.* Основные математические формулы: Справ. – Минск: Вышэйшая школа, 1995. – 380 с.
4. *Выгодский М. Я.* Справочник по высшей математике. М.: Астрель, 2010. – 703 с.

О РАБОТЕ ЛОПАСТНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА ШВАРТОВНОМ РЕЖИМЕ

***А.Р. Тогуняц**, канд. техн. наук, инженер,*
***С.Л. Анчиков**, зам. ген. директора,*
АО «Научно-производственное предприятие «Морская техника»,
***Л.И. Вишневский**, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник*
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
контакт. тел. (812) 327 2802, +7 (921) 337 2652

ВВЕДЕНИЕ

Швартовный режим работы лопастных движителей не является, как правило, одним из основных (за исключением ледоколов, судов ледового плавания и буксиров). Однако в последнее время появились суда и объекты морской техники, для которых швартовный режим и близкие к нему режимы существенны и занимают значительное эксплуатационное время. Этим обстоятельством объясняется появление материалов по изучению физических аспектов работы гребного винта (ГВ) на швартовном режиме, включая кавитационные явления с привлечением методов экспериментальной и вычислительной гидродинамики (Experimental Fluid Dynamics, EFD и Computational Fluid Dynamics, CFD соответственно) [1]. Если швартовный режим входит в перечень рабочих режимов судна, то целесообразно на стадии проектирования движителя определить его энергоэффективность в этих условиях. Это позволит при выборе конструктивных элементов движителя и его геометрии оценить необходимость поиска компромиссных решений, удовлетворяющих условиям эксплуатации судна на всех основных режимах. Гидродинамические характеристики лопастных движителей на швартовном режиме, как правило, представлены в виде диаграмм серийных испытаний их моделей, т.е. определенных методами EFD, характеризующихся точностью достаточной для выполнения их успешного проектирования. Полученные результаты относятся к модельным числам Рейнольдса (Re). Авторы полагают, что условия автомодельности при переходе к натуре будут соблюдены и натурное число Re не изменит ситуацию качественно. Рассмотрим некоторые закономерности работы лопастных движителей на швартовном режиме в свободной воде, а также параметры, определяющие их гидродинамическую эффективность*.

ПОКАЗАТЕЛИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОПАСТНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА ШВАРТОВНОМ РЕЖИМЕ

На швартовном режиме движитель не выполняет работу (скорость перемещения движителя равна нулю) и его КПД равен нулю. Поэтому для оценки эффективности его работы используются иные показатели. В свободной воде (т.е. без корпуса судна) на швартовном режиме тяга движителя и упор равны, соответственно равны коэффициент тяги K_e и коэффициент упора движителя K_T. Рассмотрим выражения, определяющие гидродинамическую эффективность движителя на швартовном режиме. Традиционное выражение для определения тяги

$$T_e = K_e \rho n^2 D^4 \text{ [кгс]}, \qquad (1)$$

где ρ – плотность воды, кгс с²/м⁴; n – частота вращения, 1/с; D – диаметр гребного винта, м.

Выражение для определения потребляемой мощности [2]:

$$P_D = 0{,}0616\, K_Q \rho n^3 D^5 \text{ ,кВт}, \qquad (2)$$

где K_Q – коэффициент момента, $Q = K_Q \rho n^2 D^5$.

Наиболее наглядным показателем гидродинамической эффективности движителя на швартовном режиме является отношение его тяги T_e к расходуемой мощности P_D.

Таким образом, с использованием (1) и (2) получим показатель

$$T_e/P_D = K_e/K_Q \; \frac{1}{0{,}0616\, nD} \text{ , кгс/ кВт.} \qquad (3)$$

Показатель T_e/P_D удобен в расчетах, однако размерный параметр nD не позволяет однозначно, используя зависимость (3), выбрать для швартовного режима оптимальный по энергозатратам движитель.

Использование выражения, которое рекомендовано Справочником [3]:

$$T_e = 30{,}2\, (P_D D)^{2/3} K_e/(K_Q)^{2/3} \text{ , кг}, \qquad (4)$$

где коэффициент 30,2 определен из условия, что r = 104,5 кгс с²/м⁴ (это соответствует соленой воде при температуре 4 °С и принято в отечественной практике расчетов), исключает этот недостаток и дает возможность по данным серии гребных винтов по величине $K_e/(K_Q)^{2/3}$ без дополнительных вычислений при заданных величинах мощности P_D определить оптимальное шаговое отношение P/D гребного винта и рассчитать T_e при выбранном диаметре гребного винта D. Параметр $K_e/(K_Q)^{2/3}$ можно рассматривать как гидродинамическое качество лопастного движителя на швартовном режиме. В этом качестве указанный параметр используется для характеристики эффективности средств активного управления [3]. Формула (4) может быть получена из формулы (1) заменой частоты вращения n ее значением из (2), т.е. выраженной через P_D, D, K_Q.

Для оценки эффективности лопастного движителя на швартовах также используется коэффициент относительного гидродинамического качества (КОГК), применяемый при проектировании средств активного управления [4]. Критерий КОГК аналогичен коэффициенту эффективности Бендемана ζ [5, 6, 7] (коэффициент ζ также применяется в авиации и вертолетостроении) и отличается от параметра $K_e/(K_Q)^{2/3}$ на постоянную величину $1/\pi\,(2)^{1/3} = 0{,}253$:

$$\zeta = K_e/(K_Q)^{2/3}\, 1/\pi\,(2)^{1/3}, \qquad (5)$$

Выражения для тяги (1) и мощности (2) можно записать следующим образом:

$$T_e = K_e \rho D^2 (nD)^2, \qquad (6)$$

$$P_D = 0{,}0616\, K_Q \rho\, D^2 (nD)^3. \qquad (7)$$

Рассмотрение T_e и P_D в виде (6), (7) наглядно показывает, что увеличение передаваемой движителю мощности P_D, благодаря росту nD, будет опережать рост тяги T_e (P_D увеличивается по кубической зависимости от nD, а T_e –по квадратичной зависимости). Вследствие этого показатель эффективности T_e/P_D, кгс/кВт, для движителей малой мощности выше, чем для движителей большой мощности.

При проектировании движителя может представлять интерес оценка его гидродинамической эффективности на швартовном режиме в зависимости от диаметра гребного винта при постоянной располагаемой мощности P_D и выбранном шаговом отношении P/D. Пусть диаметр гребного винта увеличился в x раз, тогда в силу условия сохранения постоянной мощности P_D на основании выражения (2) можно записать

$$(Dx)^5 n_x^{\,3} = n^3 D^5 = \text{const}, \qquad (8)$$

где n_x – частота вращения ГВ увеличенного диаметра, 1/с.

Из выражения (8) следует, что $n_x = n/x^{5/3}$.

Таким образом, новое значение параметра $n_x Dx = n/x^{5/3}\, Dx = nD\, 1/x^{2/3}$ меньше исходного nD на $x^{2/3}$ и, следовательно, показатель эффективности T_e/P_D увеличится в соответствии с (3) при увеличении диаметра.

Разумеется, увеличение диаметра ГВ не является универсальным средством увеличения как пропульсивного коэффициента при движении судна [8], так и показателя эффективности T_e/P_D

* В статье применена система единиц измерений МКГСС как наиболее удобная при работе с данными первоисточников, использованных в расчетах.

на швартовах. На практике увеличение диаметра ограничено конструктивными особенностями морского объекта, а также изменением гидродинамических характеристик гребного винта при снижении частоты вращения ниже критического значения.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ И СООСНЫХ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ПРОТИВОПОЛОЖНОГО ВРАЩЕНИЯ (СГВ) НА ШВАРТОВНОМ РЕЖИМЕ

Известно, что СГВ имеют более высокий КПД по сравнению с открытыми ГВ. Это преимущество оценивается в 10–12% во всем диапазоне ходовых нагрузок (C_T = 0,6 ÷ 5,0) при условии, что дисковое отношение одиночных ГВ A_E/A_0 равно суммарному дисковому отношению $(A_E/A_0)_\Sigma$ СГВ[9], [10]. Для анализа гидродинамических характеристик на швартовном режиме были использованы материалы диаграмм серийных испытаний моделей СГВ (дисковое отношение $(A_E/A_0)_\Sigma$ = 0,575+0,545, число лопастей $z_п = 4$, $z_з = 4$) [11] и одиночных гребных винтов (A_E/A_0=1,1, z = 3) [12].

Для сравнительного анализа были выбраны режимы, значительно различающиеся по мощности, передаваемой на движитель P_D и, соответственно, параметру nD (частоте вращения n и величине диаметра D). Для наиболее полного охвата диапазона встречающихся на практике относительных шаговых отношений расчеты выполнены для P/D = 0,8 и P/D = 1,3.

Для малой мощности (характерной, например, для движителя небольшого необитаемого аппарата) приняты следующие данные для расчетов:

– тяга движителя на швартовном режиме T_e= 14 кгс (137,3 Н);
– диаметр ГВ D = 0,147 м.

Для большой мощности (характерной, например, для большого морозильного траулера) приняты следующие данные для расчетов:

– тяга движителя на швартовном режиме T_e= 25 000 кгс (245 кН);
– диаметр ГВ D = 3,7 м.

Гидродинамические характеристики одиночных ГВ серии [12] на швартовном режиме (относительная поступь J = 0 на диаграммах $K_T - J$ и $K_Q - J$ характеризуются параметрами:

– для шагового отношения P/D = 0,8 K_e= 0,40, K_Q= 0,0515, ζ = 0,73;
– для шагового отношения P/D = 1,3 K_e= 0,70, K_Q= 0,145, ζ = 0,64.

Гидродинамические характеристики СГВ серии [11]на швартовном режиме (относительная поступь J = 0 на диаграммах $K_T - J$ и $K_Q - J$) характеризуются параметрами:

Таблица 1

Результаты расчетов потребной мощности на швартовном режиме для T_e= 14 кгс (137,3 Н), D = 0,147 м для СГВ и ГВ

Движитель	P/D	P_D, кВт	n ,об/мин (1/с)	T_e/P_D,кгс/кВт	nD, м/с	ζ
◇ СГВ [11]	0,8	0,370	1400 (23.3)	37,8	3.43	0.82
◇ СГВ [11]	1,3	0,414	996 (16,6)	33,8	2,44	0,80
◆ ГВ [12]	0,8	0,440	1608 (26,8)	31,8	3,94	0,73
◆ ГВ [12]	1,3	0,540	1215 (20,25)	25,9	2,98	0,64

Таблица 2

Результаты расчётов потребной мощности на швартовном режиме для T_e= 25 000 кгс (245 кН), D = 3,7 м для СГВ и ГВ

Движитель	P/D	P_D, кВт	n ,об/мин (1/с)	T_e/P_D, кгс/кВт	nD, м/с	ζ
● СГВ [11]	0,8	1100	93,2 (1,55)	22,7	5,74	0,82
● СГВ [11]	1,3	1130	64,3 (1,07)	22,1	3,96	0,80
▲ ГВ [12]	0,8	1300	107 (1,78)	19,2	6,60	0,73
▲ ГВ [12]	1,3	1600	81 (1,35)	15,6	4,99	0,64

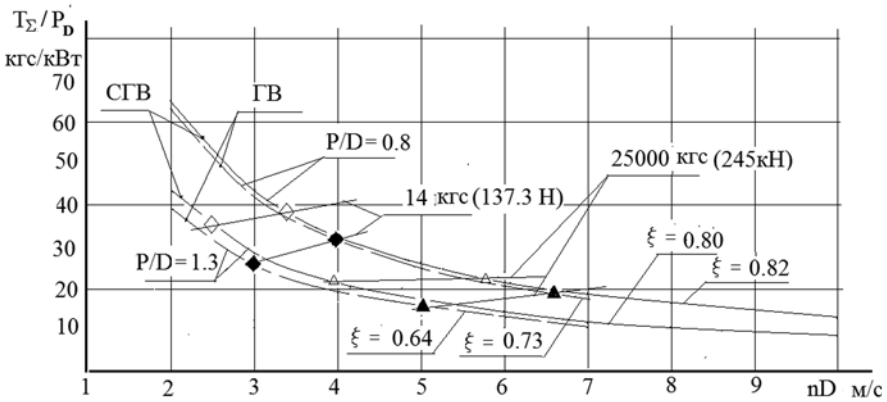


Рис. 1. ***Зависимость показателя эффективности T_e/P_D, кгс/кВт, от параметра nD, м/с, для СГВ [11] и ГВ [12] и результаты расчетов потребной мощности на швартовном режиме для тяги T_e= 14 кгс (137,3 Н)и тяги T_e= 25 000 кгс (245 кН)***

◇ – эффективность T_e/P_D СГВ при тяге T_e= 14 кгс(137,3 Н), D =0 ,147 м;
◆ – эффективность T_e/P_D ГВ при тяге T_e= 14 кгс(137,3 Н), D = 0,147 м;
△ – эффективность T_e/P_D СГВ при тяге T_e= 25 000 кгс(245 кН), D = 3,7 м;
▲– эффективность T_e/P_D ГВ при тяге T_e= 25 000 кгс(245 кН), D =3 ,7 м

– для шагового отношения P/D = 0,8 K_e= 0,53, K_Q= 0,066, ζ = 0,82;
– для шагового отношения P/D = 1,3 K_e= 1,10, K_Q= 0,205, ζ = 0,80.

Результаты расчетов показателя эффективности T_e/P_D, кгс/кВт, от параметра nD , м/с, для СГВ [11] и ГВ [12] и потребной мощности на швартовном режиме для тяги T_e= 14 кгс (137,3 Н) и тяги T_e= 25 000 кгс (245 кН) представлены в табл. 1 и табл. 2, а также на рис 1.

Из выполненной сравнительной оценки потребной мощности на швартовном режиме для достижения тяги T_e= 14 кгс (137,3 Н) и тяги T_e= 25 000 кгс (245 кН) ГВ и СГВ следует:

– показатель эффективности T_e/P_D (для P/D = 0,8) СГВ превышает значение T_e/P_D одиночного ГВ на 18–19% (сравнение выполнено по лучшим показателям);
– для открытых лопастных движителей бóльшая эффективность достигается на гребных винтах с меньшим шаговым отношением P/D (в рассматриваемом случае при P/D = 0,8), для которых характерна повышенная частота вращения (преимущество по T_e/P_D достигает величины ≈ 20%);
– большие значения коэффициента Бендемана ζ СГВ по сравнению с ГВ характеризуют качественное преимущество этого лопастного движителя, но не количественное.

Преимущество СГВ по сравнению с одиночным ГВ по показателю эффективности T_e/P_D,кг/кВт, объясняется тем, что швартовный режим, характеризуется большими вызванными скоростями, которые всегда есть потери. В случае использования СГВ передний винт меньше нагружен, потому от него меньше осевые вызванные скорости, а, следовательно, и потери. Второй (задний) винт при этом не работает на швартов-

ном режиме, а потому меньше нагружен, от него меньше вызванные скорости. С этой точки зрения целесообразно для дальнейшего повышения эффективности СГВ использовать в качестве заднего винта конструкцию винта изменяемого шага (ВИШ). Это было показано в работе [13].

СРАВНИТЕЛЬНАЯ РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТКРЫТЫХ ГВ И ГВ В НАПРАВЛЯЮЩЕЙ НАСАДКЕ НА ШВАРТОВНОМ РЕЖИМЕ

Анализ гидродинамических характеристик на швартовном режиме был выполнен по материалам серийных испытаний моделей гребных винтов фиксированного шага в насадке (дисковое отношение A_E/A_0 = 0,58, число лопастей z = 4, серия 1 [14]) и одиночных гребных винтов (A_E/A_0=0,55, z = 4 [2, с. 280],) близких по величине дискового отношения A_E/A_0. Нагрузки лопастных движителей для сравнения и их геометрические характеристики были выбраны такие же, как и для СГВ и ГВ (T_e – 14 кгс (137,3 Н) и 25 000 кгс (245 кН), D – 0,147 м и 3,7 м, P/D – 0,8 и 1,3).

Гидродинамические характеристики одиночных ГВ серии [2] на швартовном режиме (относительная поступь J = 0 на диаграммах K_T – J и K_Q – J характеризуются параметрами:

- для шагового отношения P/D = 0,8 K_e= 0,345, K_Q = 0,0415, ζ = 0,73;
- для шагового отношения P/D =1,3 K_e= 0,525, K_Q = 0,095, ζ = 0,64.

Гидродинамические характеристики ГВ в насадке серии 1 [14] на швартовном режиме (относительная поступь J = 0 на диаграммах K_T – J и K_Q– J характеризуются параметрами:

- для шагового отношения P/D = 0,8 K_e= 0,330, K_Q= 0,0253, ζ = 0,97;
- для шагового отношения P/D =1,3 K_e = 0,660, K_Q = 0,0695, ζ = 0,99.

Результаты расчетов показателя эффективности T_e/P_D, кгс/кВт, от параметра nD, м/с, для ГВ в насадке [14] и ГВ [2] и потребной мощности на швартовном режиме для тяги T_e= 14 кгс (137,3 Н) и тяги T_e= 25 000 кгс (245 кН) представлены в табл. 3 и табл. 4, а также на рис 2.

Из выполненной сравнительной оценки потребной мощности на швартовном режиме для достижения тяги T_e= 14 кгс (137,3 Н) и тяги T_e= 25 000 кгс (245 кН) открытого ГВ и ГВ в насадке следует:

- показатель эффективности T_e/P_D, кгс/кВт, (для P/D = 0,8) ГВ в насадке превышает значение T_e/P_D открытого ГВ на 60–90%;
- для ГВ в насадке изменение эффективности в зависимости от шагового отношения P/D, строго говоря, выявить не удалось (в отличие от открытых ГВ и СГВ), так как полученные результаты не превысили погрешности опытного определения гидродинамических характеристик K_e и K_Q (см. значения P_D в табл. 3 и табл. 4).

Таблица 3

Результаты расчетов потребной мощности на швартовном режиме для T_e= 14 кг (137,3 Н), D = 0,147м для ГВ в насадке и ГВ

Движитель	P/D	P_D, кВт	n,об/мин (1/с)	T_e/P_D, кгс/кВт	nD, м/с	ζ
◇ ГВ в насадке 13]	0,8	290	1770 (25,9)	≈ 50	4,33	0,97
◇ ГВ в насадке [13]	1,3	280	1250(20,8)	≈ 50	3,06	0,99
◆ ГВ [14]	0,8	442	1770 (29,5)	31,6	4,34	0,73
◆ ГВ [14]	1,3	538	1400 (23,3)	26,0	3,43	0,64

Таблица 4

Результаты расчетов потребной мощности на швартовном режиме для T_e= 25 000 кгс (245 кН), D = 3,7 м для ГВ в насадке и ГВ

Движитель	P/D	P_D, кВт	n,об/мин (1/с)	T_e/P_D, кгс/кВт	nD, м/с	ζ
◺ ГВ в насадке [13]	0,8	852	118(1,93)	≈ 30	7,97	0,97
◺ ГВ в насадке [13]	1,3	849	83,3 (1,39)	≈ 30	5,14	0,99
● ГВ [14]	0,8	1310	115,0(1,92)	19,1	7,09	0,73
● ГВ [14]	1,3	1600	93,5(1,56)	15,6	5,77	0,64

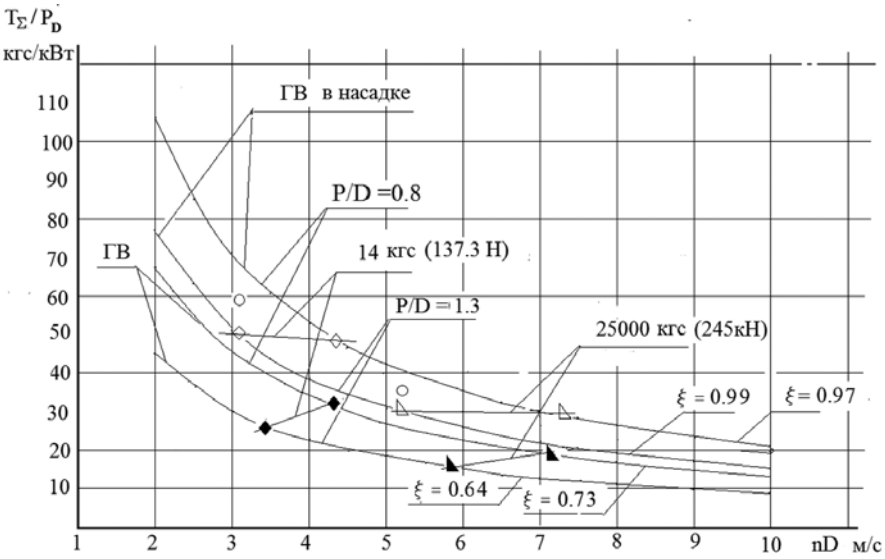


Рис. 2. ***Зависимость показателя эффективности T_e/P_D, кг/кВт, от параметра nD, м/с ,для ГВ в насадке [13] и ГВ [14] и результаты расчетов потребной мощности на швартовном режиме для тяги T_e= 14 кгс (137,3 Н)и тяги T_e= 25 000 кгс (245 кН)***

◇ – эффективность Te/PD ГВ в насадке при тяге Te= 14 кгс(137,3 Н), D = 0,147 м;

◆ – эффективность Te/PD ГВ при тяге Te= 14 кгс(137,3 Н), D = 0,147 м;

◺ – эффективностьTe/PD ГВ в насадке при тяге Te= 25 000 кгс (245 кН), D = 3,7 м;

◣ – эффективность Te/PD ГВ при тяге Te= 25 000 кгс, (245 кН) D = 3,7 м;

○ – прогноз эффективности Te/PD для СГВ в насадке

Для различных значений P/D (0,8 и 1,3) показатель T_e/P_D практически не изменился. Отличие на швартовном режиме в закономерностях $T_e/P_D = f(P/D)$ открытого ГВ и ГВ в насадке (см. рис. 1 и рис. 2) можно объяснить различными условиями обтекания ГВ: насадка вызывает ускорение потока в месте расположения ГВ и снижает отрицательное влияние большого значения P/D на T_e/P_D .

ПРОГНОЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СГВ В НАСАДКЕ НА ШВАРТОВНОМ РЕЖИМЕ

Использование в практике судостроения СГВ в насадке в настоящее время не получило распространения, несмотря на очевидное преимущество этого лопастного движителя по гидродинамической эффективности по сравнению с открытыми СГВ на режимах, характеризуемых коэффициентом нагрузки по упору $C_m = 2T/\rho V_A^2 A_0 > 1,5$ (где T– упор гребного винта, ρ – плотность воды, V_A – поступательная скорость гребного вин-

та, A_0 – площадь диска гребного винта) [15, 16]. Это проявление традиционного консерватизма в судостроении, несомненно, будет в следующие годы (через 5–10 лет), преодолено. Разумеется, движители типа СГВ в насадке не являются универсальными, но они найдут применение на судах различных назначений, заменив одиночные ГВ в насадках. Патенты на конструкции лопастных движителей типа СГВ в насадке появились несколько десятилетий тому назад [17, 18]. Модельные исследования гидродинамической эффективности СГВ в насадке, выполненное японскими специалистами на ходовых режимах, показали преимущество движителя этого типа перед движителем ГВ в насадке, которое составило 10% [19], что соответствует предварительной расчетной оценке, представленной в [15, 16].

На швартовном режиме СГВ превзошли ГВ (для P/D = 0,8) по показателю T_e/P_D на 18–19 % (см. табл. 1 и табл. 2). Предполагается, что это же преимущество СГВ в направляющей насадке по сравнению с одиночным ГВ в направляющей насадке сохранится. В этом случае показатель эффективности СГВ в насадке T_e/P_D для T_e= =14 кгс (137,3 Н) составит ≈ 59 кгс/кВт (50 кгс/кВт × 1,18), а для T_e= 25 000 кг (245 кН) ≈ 35,4 кгс/кВт (30 кгс/кВт × × 1,18). Для наглядности этот прогноз по T_e/P_D (без учета уменьшения частоты вращения СГВ по сравнению с ГВ) показан на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчетная оценка параметров гидродинамической эффективности открытых ГВ, ГВ в насадке, соосных гребных винтов противоположного вращения (СГВ) на швартовном режиме, выполненная на основе данных диаграмм серийных испытаний их моделей (т. е. данных EFD), показала:

- показатель эффективности T_e/P_D, кгс/кВт, (для P/D = 0,8) СГВ превышает значение T_e/P_D одиночных ГВ на 18–19%;
- для открытых лопастных движителей бóльшая эффективность достигается на ГВ с меньшим шаговым отношением P/D (в рассматриваемом случае при P/D = 0,8), для которых характерна повышенная частота вращения (преимущество по T_e/P_D достигает величины около 20%);
- показатель эффективности T_e/P_D, кгс/кВт, ГВ в насадке превышает значение T_e/P_D открытого ГВ на 60–90%;
- для ГВ в насадке изменение эффективности в зависимости от шагового отношения P/D выявить не удалось (в отличие от открытых ГВ и СГВ), так как полученные результаты не превысили погрешности опытного определения гидродинамических характеристик K_e и K_Q;

Можно ожидать , что размещение СГВ в направляющей насадке приведет к повышению на швартовном режиме показателя эффективности T_e/P_D, кгс/кВт на величину ≈18% по сравнению с одиночными ГВ в насадке.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пустошный А.В., Таранов А.Е., Шевцов С.П. Рудниченко.* Физические аспекты работы гребного винта на швартовном режиме// Тр. КГНЦ. – 2020. – Вып. 3 (393).
2. *Русецкий А.А., Жученко М.М., Дубровин О.В.* Судовые движители. – Л.: Судостроение, 1971, с. 38.
3. Справочник по теории корабля. – Т.3. – Л.: Судостроение, 1985, с. 235.
4. *Каган З.Л.* Анализ испытаний средств активного управления (САУ) судном с помощью коэффициента относительного гидродинамического качества (КОГК)// Речной транспорт (XXI век). – 2019. – №3.
5. *Гофман А.Д.* Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна: Справочник. – Л.: Судостроение, 1988, с.241.
6. *Каган З.Л., Каган Д.З.* Вывод для выражения коэффициента относительного гидродинамического качества (КОГК) z ‘с использованием методов теории размерностей и подобия// Речной транспорт (XXI век). – 2020. – №4.
7. *Beveridge J.* Design and Performance of Bow Thrusters. – Marine Technology. 1972.
8. *Воеводская Е.Н., Каретников О.Н.* Повышение пропульсивных качеств судов с низкооборотными гребными винтами увеличенного диаметра и снижение нестационарных нагрузок на валопровод//Вопросы судостроения. – Сер.:Проектирование судов. – ЦНИИ «Румб». – 1984. – Вып. 41.
9. *Турбал В.К.* Применение движителей новых типов на морских транспортных судах. – Проблемы прикладной гидромеханики судна. – Л.: Судостроение, 1975.
10. *Воеводская Е.Н., Турбал В.К.* Перспективы повышения ходовых качеств быстроходных транспортных судов// Вопросы судостроения. – Сер.: Проектирование судов. – ЦНИИ «Румб». –1977. – Вып. 15.
11. *Воеводская Е.Н.* Вопросы проектирования и эффективность использования соосных гребных винтов на крупнотоннажных транспортных судах//Тр. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1975. – Вып. 285.
12. *Басин А.М., Миниович И.Я.* Теория и расчет гребных винтов. – Л.: Судпромгиз, 1963.
13. *Вишневский Л.И., Тогуняц А.Р.* Многорежимный винт изменяемого шага и эффективность его работы в составе соосных гребных винтов противоположного вращения//Тр. КГНЦ . – 2022. – Т. 4. – №402. – С. 33–40.
14. Комплекс движительный гребной винт-насадка. Методика расчета и правила проектирования. ОСТ 5.4129–75.
15. *Togunjac A.R., Anchikov S.L., Vishnevsky L.I.* Means of Performance Improvements of Two-Stage Blade Propulsors. – The 24th Symposium on Theory and Practice of Shipbuilding (in moriam prof. Leopold Sorta) SORTA – 2020) with International participation 15.10–16.10. 2020. – Online event. – University of Rijeka-Faculty of Engineering.
16. *Анчиков С.Л., Тогуняц А.Р., Вишневский Л.И.* Средства улучшения эксплуатационных характеристик двухступенчатых лопастных движителей // Морской вестник.– 2021.– №3 (79).– С.76 –80.
17. *Tetsuji Hoshino.* Counter-rotating nozzle propeller. Patent JPS5984693A. Published 1984. Mitsubishi Heavy Industries Ltd.
18. *Бедекер В.Ф., Тогуняц А.Р.* Судовая движительно-двигательная установка типа «поворотная колонка». Патент № 2 115 589. – Офиц. бюлл. «Изобретения», 1998, № 20.
19. *Hideki Shuto.* Super Eco Inland Vessels Line-Shaft Contra Rotating Propellers with Diesel Electric Propulsion System. – Workshop Inland Navigation CO2 Emissions. – Strasbourg, 2011. ■

ЦИФРОВОЕ МАКЕТИРОВАНИЕ СУДОВЫХ СИСТЕМ

А. А. Крюков, *ст. преподаватель, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, контакт. тел. +7 (924) 326 0089, aleksey902@mail.ru*

ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроение уже в начале этого столетия планомерно переходит на использование инновационной техники с применением компьютерных технологий. Еще недавно машиностроительные предприятия применяли станки с числовым программным управлением на базе перфолент и перфокарт. Сегодня все процессы могут быть осуществлены дистанционно из любой точки мира. Особую роль здесь сыграл период пандемии новой коронавирусной инфекции, которая способствовала развитию дистанционных технологий и повышению общей мобильности трудовых ресурсов уже после ее окончания.

С введением санкций остро стал вопрос об импортозамешении оборудования, механизмов, приборов, комплектующих, поскольку российский рынок изделий машиностроения сильно зависит от импортных поставок, стоимость которых значительно колеблется в зависимости от мировой конъюнктуры. Также наблюдается тотальная зависимость от китайских поставщиков комплектующих, которые в настоящее время сопоставимы по цене и качеству с европейскими аналогами, но санкционная политика ряда западных стран влияет на конечное ценообразование товаров.

Решению вышеизложенных проблем способствует развитие реверс-инжиниринга (обратная разработка) – технологического процесса разработки конструкторской документации, которая базируется на основе полученных в ходе различных обмеров изделия и последующего анализа данных для его дальнейшего изготовления [1]. К такому процессу обычно прибегают в том случае, когда отсутствуют чертежи, пояснительная записка и другая техническая документация на изделие. При этом имеется необходимость в короткие сроки начать пуск, наладку или даже ремонт всего оборудования.

ПОНЯТИЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И МАКЕТИРОВАНИЯ

В процессе реверс-инжиниринга инженеры-проектировщики рассматривают большое количество вариантов решений, которые зависят от множества факторов, например таких, как геометрия детали, специальные требования, материалы изготовления и др. В некоторых случаях может возникать потребность в создании опытных образцов или целой трехмерной модели механизма или агрегата для того, чтобы продемонстрировать заказчику или чтобы проверить соразмерность будущего элемента системы, машины и механизма. Этот процесс создания копии будущего изделия называется *прототипированием*, которое состоит из двух основных этапов – цифрового и физического. Физическому прототипированию посвящено немало работ [2, 3]. Данный тип прототипирования может быть связан с применением аддитивных технологий [4], которые позволяют получать физические изделия методом трехмерной печати. Если считать, что цифровое прототипирование это часть процесса создания физической модели, то при создании трехмерной электронной модели дальнейший процесс изготовления изделия может быть отложен на неопределенный срок, а целью получения цифровой модели может быть лишь совершенствование будущего объекта изготовления и его демонстрация. Цифровые модели могут быть использованы для проведения трехмерных газодинамических расчетов проточной части турбины [5], а также для создания управляющих программ для станков с числовым программным управлением [6].

Макетирование – это процесс, подобный прототипированию, но его целью является не создание работоспособного прототипа, а цифровая копия законченного изделия.

Инженер-конструктор, даже если он обладает значительным опытом чтения чертежей, а также хорошим пространственным мышлением, не всегда сможет конкретно и точно представить реальное изделие в трехмерном виде. Поэтому прототипирование и макетирование позволяют заменить двухмерные чертежи трехмерной графикой. Но работать с готовым физическим макетом, который можно взять в руки, значительно удобнее, чем с трехмерным изображением. Существуют основные этапы обратного инжиниринга. Они показаны на рис. 1.

Самые важные этапы реверс-инжиниринга – это создание трехмерной модели будущего изделия с применением современной техники, например 3D-сканера, позволяющего получить и скомпилировать трехмерную модель, и использование систем автоматизированного проектирования вручную по размерам трехмерной модели.

Качество создаваемого прототипа – достаточно сложная задача, которая решается с помощью периодически повторяющихся замеров геометрии изделия. Возможность создания практически абсолютно гладкой поверхности с использованием аддитивных технологий позволяет быстро и просто получить идеальные прототипы будущего изделия [7].

Рис. 1. ***Основные этапы обратного инжиниринга***

Построение электронной модели будущего изделия обычно осуществляется на базе твердотельной модели из CAD-систем.

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ СУДОВЫХ СИСТЕМ

Судовой системой называется сеть трубопроводов с арматурой, механизмами, аппаратами, приборами, устройствами и емкостями, предназначенными для обеспечения мореходности, непотопляемости и противопожарной безопасности судна, нормальных условий эксплуатации его двигателей и теплообменных аппаратов, а также поддержания требуемых условий обитаемости в судовых помещениях. Современные методы изготовления и прокладки систем судовых трубопроводов изложены в работе [8].

Современные CAD-системы имеют соответствующие дополнения для проектирования сети трубопроводов, на-

пример Компас3D с приложением под названием «Оборудование: Трубопроводы». Другая отечественная CAD-система – nanoCAD – посредством программы Старт-Проф, разработанной НТП «Трубопровод», позволяет проектировать трубопроводы, а именно выполнять:

- постройку модели трубопровода в автоматическом режиме с автоматической расстановкой элементов системы в местах его поворотов и разветвлений, выполнение врезок и разделок углов;
- постройку моделей труб по готовым траекториям;
- размещение на трубопроводе модели арматуры и деталей;
- редактирование геометрии трубопровода, отдельных его участков, труб и деталей.

Бесспорным лидером зарубежного программного обеспечения является CADMATIC. Этот программный комплекс обеспечивает цифровое преобразование в судостроении, формируя все этапы рабочего проекта от проектирования до технического обслуживания и эксплуатации судна [9].

На начальном этапе проектирования судовых систем определяют способы прокладки трасс трубопроводов и, следовательно, выполняют сборочно-монтажный чертеж. На сборочно-монтажном чертеже, показанном на рис. 2, изображают несколько трубопроводов, относящихся к одной группе соответствующего классификатора. Трассы трубопроводов наносят на совмещенный чертеж с указанием набора и корпусных конструкций и размещением труб и арматуры в строгом соответствии с координатами макета.

Также на судостроительном производстве популярна изометрическая модель судовых систем, начерченная в двухмерных системах координат CAD-системы.

На сборочно-монтажном чертеже трассы труб изображают сплошной линией, а арматуру – условно в соответствии с действующими ГОСТ. Базами для обозначения координат трассы служат следы корпусных конструкций (переборок, настилов и т.д.), а также условные плоскости и линии (ДП, ОН, ОЛ).

Метод цифрового прототипирования с использованием CAD-системы позволяет проектировать общее расположение систем на судне или конкретно выбранной судовой системы. Возможности современных отечественных CAD-систем в последние годы приблизились по функционалу к зарубежным, и направлены в основном на решение задач рабочего проектирования [10]. На рис. 3 показаны трехмерные модели судовых систем, полученные с использованием программного комплекса CADMATIC при проектировании судна на судостроительном комплексе «Звезда».

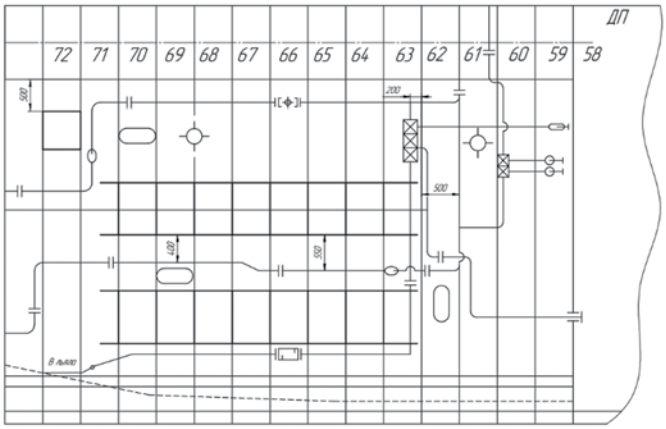


Рис. 2. ***Сборочно-монтажный чертеж системы трубопроводов***

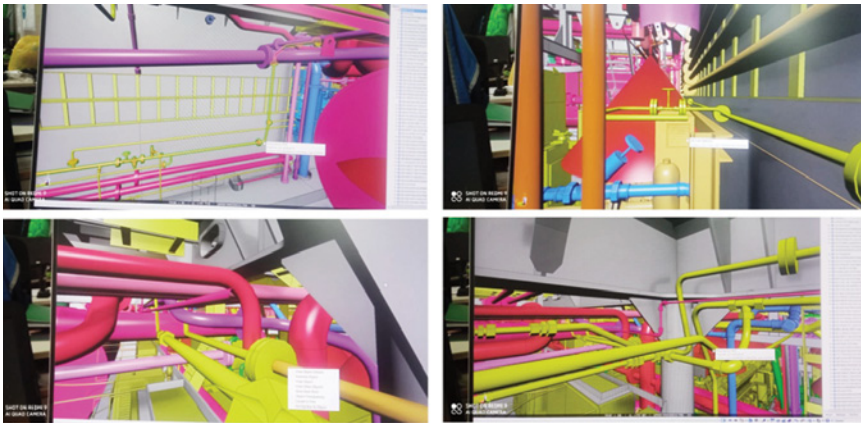


Рис. 3. ***Трехмерные модели судовых систем***

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время все этапы проектирования современных судов, которые выполняются методом трехмерного проектирования, постепенно заменяются трехмерной моделью.

Если учитывать современные тенденции развития компьютерной техники и технологий, в том числе аддитивных, а также технологий цифровых испытаний, можно предположить постройку судов по трехмерным моделям.

Макетирование судовых систем позволяет расширить компетенции инженеров-конструкторов, работающих в различных отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение средств и методов реверс-инжиниринга в судостроении и судоремонте/*Китаев М.В., Суров О.Э., Соловьева Е.Е., Новосельцев И.А.*//Судостроение. – 2023. – № 3 (868). – С. 26–33.
2. *Дектярев А.В.* Нормативно-техническое обеспечение аддитивных технологий в судостроении//Морской вестник. – 2024. – № 81 (17). – С. 35–37.
3. Влияние перепроектирования конструкции корпуса судна под аддитивное производство на характеристики остойчивости/*Дектярев А.В., Зобов П.Г., Муленкова М.В., Морозов В.Н.*//Изв. вузов. – Сер.: Машиностроение. – 2022. – № 6 (747). – С. 26–35.
4. *Дектярев А.В., Зобов П.* Технология изготовления маломерного судна методом аддитивного производства//Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. – 2022. – Т. 14. – № 4. – С. 571–582.
5. *Крюков А.А.* Численное моделирование коэффициента скорости соплового аппарата малорасходной турбины//Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. – 2021. – Т. 13. – № 6. – С. 849–857.
6. *Дьяченко Е.П., Рыбаков А.В., Шурпо А.Н.* Разработка управляющих программ методом ранжирования требований к конструкторско-технологическим элементам на основе различных САПР//Вестник Брянского ГТУ. – 2017. – № 2 (55). – С. 196–203.
7. *Григорьева Е.В.* Компьютерное моделирование и проектирование редуктора с использованием системы трехмерного моделирования//Естественные и технические науки. – 2021. – № 6 (157). – С. 159–161.
8. *Дьяков А., Сахно К.Н.* Современные методы проектирования, изготовления и монтажа трубопроводов судовых систем//Вестник Астраханского ГТУ. – Сер: Морская техника и технология. – 2014. – №. 1. – С. 26–32.
9. Системы автоматизированного проектирования как инструмент решения наукоемких конструкторских задач судостроения/*Абдулин А.Я., Сенюшкин Н.С., Суханов А.В., Ямалиев Р.Р.*//Вестник Воронежского ГТУ. – 2010. – Т. 6. – № 10. – С. 114–117.
10. *Кутенев А.А.* Использование 3D-моделей в проектировании судов//Тр. Крыловского государственного научного центра. – 2020. – № 2 (392). – С. 66–70.

АВТОНОМНОЕ СУДОХОДСТВО В РОССИИ: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ПРЕДЛОЖЕНИЯ

В. В. Ефимов, *канд. техн. наук, доцент, директор по продвижению,*
А. С. Скрыпка, *руководитель блока А-Навигация,*
Е. В. Шишенин, *директор по развитию,*
АО «СИТРОНИКС КТ»,
контакт. тел. +7 (911) 988 4255, viktor.efimov@sitronics-kt.ru

Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. [1] (далее – Стратегия) одной из долгосрочных целей развития транспорта определяет цифровую трансформацию отрасли и ускоренное внедрение новых технологий. Отмечая низкий уровень цифровизации в секторе перевозок внутренним водным и морским транспортом, Стратегия намечает в числе прочих развитие автономного водного транспорта, использование автономных судов в пассажирских и грузовых перевозках (с уровнем автономности 2 и выше).

В приложении № 10 к Стратегии определены шесть уровней автономности водного транспорта (AL – autonomous level):

- AL0 – автоматизация отсутствует, все процессы выполняются с привлечением человека;
- AL1 – все действия выполняются человеком, но также присутствуют системы помощи в принятии решений, основанные на анализе загруженных данных;
- AL2 – все действия выполняются человеком, но также присутствуют системы помощи в принятии решений, основанные на анализе данных с борта или из внешнего источника на суше;
- AL3 – все решения и действия принимаются алгоритмами, основанными на анализе данных, получаемых как с борта судна, так и с суши. Человек контролирует решения и действия алгоритмов;
- AL4 – решения и действия осуществляются автономно под контролем человека. Особо важные решения реализуются таким образом, чтобы дать возможность операторам поменять решение в чрезвычайной ситуации;
- AL5 – редкий контроль человеком, решения полностью принимаются системой;
- AL6 – все решения полностью принимаются и реализуются системой.

Очевидно, что, двигаясь по намеченным Стратегией направлениям развития автономного водного транспорта, необходимо действовать одновременно, с учетом изменения международного правового режима, расширяя отечественное правовое поле и преодолевая возникающие проблемы организационного и технического характера. Каково текущее состояние этих факторов и что следовало бы сделать для достижения целей Стратегии – свое видение ответов на эти вопросы авторы излагают далее в статье.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФАКТОР

Международная морская организация (ИМО) завершила исследование сферы международного регулирования в отношении использования морских автономных надводных судов. Результаты исследования представлены в циркулярном письме MSC.1/Circ.1638 [2]. По результатам исследования ИМО принято решение о разработке Кодекса безопасности для морских автономных надводных судов (Кодекса МАНС).

Комитет по безопасности мореплавания (КБМ ИМО) 13 февраля 2024 г. на 108-й сессии рассмотрел результаты работы группы стран, включая Российскую Федерацию, и опубликовал проект Кодекса МАНС [3]. Одновременно решено принять не имеющий обязательной силы Кодекс МАНС в мае 2025 г. на 110-й сессии КБМ. После этапа накопления опыта будет разработан обязательный Кодекс МАНС, который будет принят самое позднее 1 июля 2030 г. и вступит в силу, как ожидается, 1 января 2032 г. Хотя сфера применения Кодекса МАНС окончательно еще не согласована, ожидается, что первоначально она будет ограничена в применении только к грузовым судам и исключит применение к пассажирским судам. Обсуждение сложностей распространения применения на пассажирские суда состоится на более позднем этапе.

Обязательный Кодекс станет новым международным документом, однако в различные международные конвенции (SOLAS, COLREG, STWC, SAR и др.) необходимо будет внести поправки для обеспечения согласованного применения. Отмечается, что степень автономности, при которой судно не имеет экипажа и не управляется непрерывно из берегового центра, а только в экстренных случаях, представляет собой наиболее перспективную концепцию судоходства и потребует внесения необходимых поправок в Международные правила предупреждения столкновений судов в море (COLREG/МППСС-72), чтобы привести их в соответствие с будущим автономным судоходством.

Последствия решений ИМО таковы: регулирующие органы судоходства должны будут определить применимость требований необязательного и последующего обязательного Кодекса МАНС к разрабатываемым нормативным-правовым документам, а также интерпретировать меры, основанные на этих документах, для подтверждения целостности системы сертификации. Верфи, операторы судов, поставщики услуг по управлению движением судов, порты, производители оборудования, центры подготовки моряков, национальные морские власти и органы сертификации получат представление о требованиях к использованию транспортных автономных судов, поскольку отрасль неуклонно движется к этому новому этапу будущего судоходства.

РОССИЙСКИЙ ФАКТОР

Российский морской регистр судоходства (РС) 1 августа 2020 г. ввел первый в стране документ, содержащий требования к автономным судам: Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (НД № 2–030101–037). А с 1 июля 2024 г. действует новый документ РС: Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII (НД № 2–020101–174) [4], в котором глава 33 определяет требования к морским автономным надводным судам и техническим средствам по управлению автономными судами, включая центры дистанционного управления (ЦДУ). При соответствии требованиям этого документа, в зависимости от категории автономности судну к основному символу класса может быть добавлен один из знаков, приведенных в табл. 1.

Еще одна российская организация – Российское классификационное общество (РКО), сертифицирующая в числе прочих и суда внутреннего плавания, ввело в действие с 1 сентября 2024 г. Правила классификации автономных судов, освидетельствования технических средств, предназначенных для обеспечения управления автономными судами [5]. Если судно, его системы (включая оборудование) были построены (изготовлены) по технической документации, одобренной РКО, под техническим наблюдением РКО и соответствуют положениям этих Правил, в формулу класса добавляется символ уровня автономности судна (табл. 2).

Ведется работа и в области стандартизации терминологии и требований к автономным судам. В частности, разработаны национальные стандарты Российской Федерации: ГОСТ Р 59298–2021 «Суда безэкипажные внутреннего плавания. Термины и определения» и ГОСТ Р 59284–2020 «Суда безэкипажные технического флота. Общие требования».

Таблица 1

Символы категории автономности судна

Знак	Категория автономности	Экипаж	ЦДУ
SAS	Полуавтономное судно	+	–
SAS-RCC	Полуавтономное судно, с возможностью управления из ЦДУ	+	+
FAS-RCC	Полностью автономное судно, с возможностью управления из ЦДУ	–	+
FAS	Полностью автономное судно	–	–

Таблица 2

Символы автономности судна

Символ	Описание
AL1	Полуавтономное судно. Экипаж находится на борту судна для выполнения технического обслуживания и может управлять судном самостоятельно. Судно наблюдается и, при необходимости, дистанционно управляется из ЦДУ
AL2	Полуавтономное судно.Экипаж находится на борту судна для выполнения технического обслуживания. Судно дистанционно управляется из ЦДУ
AL3	Полностью автономное судно. Экипаж на борту судна отсутствует. Судно дистанционно управляется из ЦДУ
AL4	Полностью автономное судно. Экипаж на борту судна отсутствует. Судно при необходимости дистанционно управляется из ЦДУ

Постановлением Правительства РФ от 5 декабря 2020 г. «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации» определено провести в период с 1 ноября 2020 г. до 31 декабря 2025 г. эксперимент по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом РФ, зарегистрированных капитанами морских портов, расположенных в следующих субъектах России: Астраханская область, Калининградская область, Краснодарский край, Ленинградская область, Магаданская область, Мурманская область, Приморский край, Ростовская область, г. Санкт-Петербург, Сахалинская область, Хабаровский край.

29 июня 2023 г. Государственной Думой принят Федеральный закон [6], вносящий изменения в Кодекс торгового мореплавания РФ, связанные с понятиями и практическим применением автономных судов.

В период с 2021 по 2025 г. Минтрансом России совместно с Минпромторгом России реализуется инициатива социально-экономического развития Российской Федерации «Автономное судовождение» в форме федерального проекта, в котором уже разработаны и прошли испытания ряд судовых и береговых систем в обеспечение автономного и дистанционно управляемого судовождения как в открытом море, так и в акваториях портов и на подходах к ним. С декабря 2023 г. находится в эксплуатации паромная линия «Усть-Луга–Балтийск» на базе полуавтономных дистанционно управляемых железнодорожных паромов «Маршал Рокоссовский» и «Генерал Черняховский» пр. CNF19M [7] (рис. 1–3).

Таким образом, реализовав упомянутые нормативно-правовые и технические проекты в области автономного судовождения и приступив к практическому применению автономных судов, Российская Федерация заняла достойное, лидирующее место в движении международного морского сообщества к уже недалекому будущему – автономному судоходству.

ВЫЯВЛЕННЫЕ НЕДОСТАТКИ, ПРОБЛЕМЫ И ПРОТИВОРЕЧИЯ

Несмотря на очевидные положительные результаты, полученные в проекте «Автономное судовождение», их недостаточно для обеспечения судостроительной промышленности технологиями и системами автономного и дистанционного судовождения во всем объеме функциональных требований к МАНС. Далеко не все категории автономности по классификации РС или Российского классификационного общества могут быть реализованы на практике при постройке судов и предложены заинтересованным судовладельцам, так как не обеспечены соответству-

Рис. 1. ***Паром «Генерал Черняховский»***

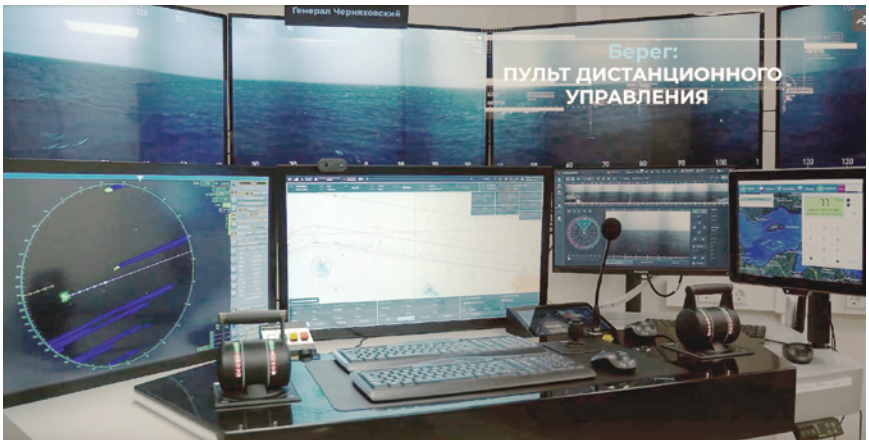


Рис. 2. ***Пульт дистанционного управления***

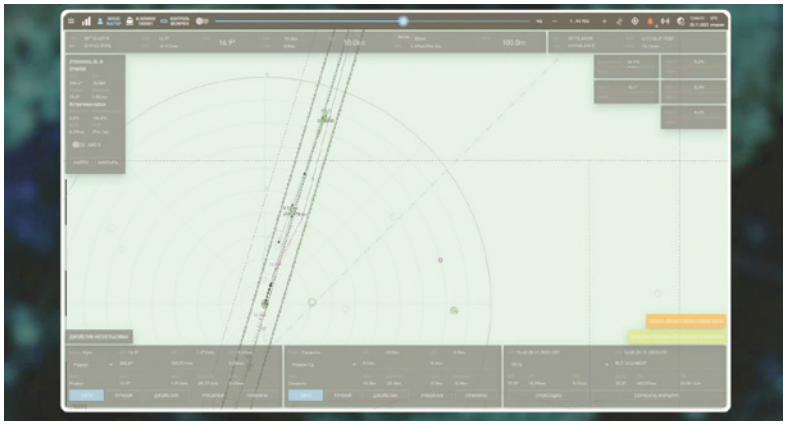


Рис. 3. ***Автономная навигационная система***

ющими отечественными автономными системами. В частности, модернизация существующих и строящихся судов путем установки систем, аналогичных установленным на паромах пр. CNF19M, позволило отнести их лишь к категории судов с ручным управлением человеком на борту и поддержкой принятия решения или с дистанционным управлением и возможностью перехода на ручное. И только для условий открытого моря. Необеспеченными новыми технологиями оказываются проектирование и создание автономных и дистанционно управляемых судов полностью без экипажа на борту при плавании в открытом море и МАНС с экипажем и без для стесненных условий плавания.

Реализованный в проекте «Автономное судовождение» подход, когда автономная система судовождения функционально является полным аналогом судоводителя, позволил достичь потенциального предела безопасности, гарантируемого строгим выполнением требований МППСС–72. Однако обеспечение безопасности так и осталось задачей, решаемой, пусть и автоматически, но каждой системой отдельно, без согласования с другими участниками морского трафика, которые продолжают руководствоваться понятиями и рекомендациями МППСС–72, ориентированными на нечеткое применение человеком, исходя из собственного опыта и уровня подготовки. Это не способствует полному исключению морских происшествий, связанных с неоднозначным пониманием рекомендаций МППСС–72 и, как следствие, неверным исполнением. Налицо противоречие между возможностями технических средств автоматизации судовождения и плохо формализуемыми правилами предупреждения столкновений судов. Неразрешенность этого противоречия не позволит в полной мере достичь ожидаемой безопасности и эффективности от автономного судоходства.

Эффективность применения автономных судов связывалась, в частности, с сокращением или полным отсутствием экипажа на судах и исключением соответствующих затрат. Опыт эксплуатации систем дистанционно управляемых судов показал, что замена вахтенного офицера на ходовом мостике судна оператором в береговом центре управления не обеспечивает привлекательного для судоходных компаний снижения эксплуатационных затрат на внедрение таких систем. Дистанционное управление судном в непрерывном режиме, но не на всем, а только на части маршрута в открытом море, в лучшем случае не приведет к снижению численности экипажа, а на практике увеличит эту численность за счет штата берегового центра управления. Очевидна необходимость изменения существующего подхода к дистанционному управлению для предоставления возможности одному оператору одновременно управлять несколькими судами из берегового центра.

Положительные оценки систем автономного и дистанционного управления капитанами судов не исключили их скептицизма в отношении возможности снижения численности экипажа. По их оценкам, судовождение занимает не более 10% от задач, решаемых экипажами транспортных судов. Поэтому даже при условии полной автоматизации судовождения сокращению численности экипажей будет препятствовать нерешенность замены человека при обеспечении повседневной деятельности судна у причала, при погрузке-разгрузке, бункеровке, подаче различных заявок и уведомлений, работе с многочисленными документами и их правками, подготовками и проведением мероприятий по сертификации и пр. Таким образом, опыт, полученный в рамках проекта «Автономное судовождение», показал что для достижения полноценного эффекта от применения автономных судов необходимо автоматизировать не только судовождение, но и все аспекты морского транспорта, где сейчас требуется участие человека. Иными словами, следует развивать не просто автономное судовождение, а автономное судоходство как единый комплекс мероприятий, как деятельность, связанную с перемещением по водным путям судов для перевозки пассажиров и грузов.

За рамками задач проекта «Автономное судовождение» осталась значительная часть водного транспорта как отрасли отечественной экономики, а именно, автономное судовождение по внутренним водным путям (ВВП). Частично и с необходимыми доработками системы, созданные для автономного морского транспорта, могут быть применены и на речных судах. Однако это не решает таких специфических задач, как безопасность маневрирования и расхождения автономных судов на реках, навигационное и картографическое обеспечение речного автономного судоходства, дистанционное управление судами и обмен информацией в условиях ограниченной видимости из-за извилистости судового хода и близости берегов и др. Некоторые известные попытки решать эти задачи [8–10] являются преимущественно частной инициативой различных российских организаций и не объединены единой государственной программой. При этом такие факторы, как сезонность речного судоходства, невысокий, зачастую, уровень профессиональной подготовки экипажей речных судов технического флота, а также многочисленность и низкая автоматизация этих судов должны, казалось бы, быть вескими аргументами в пользу развития автономного судоходства на ВВП под эгидой государства.

ЧТО ПРЕДЛАГАЕТСЯ

1.Исходя из того, что автономное судоходство – это не фантазия, а реальное будущее морского транспорта, целью государственной политики в сфере автономного судостроения должно стать создание нового конкурентоспособного направления судостроительной промышленности для полного удовлетворения потребностей государства и бизнеса в автономных судах и системах автономного судоходства. Рынок автономных судов и систем для них будет формироваться не столько спросом, сколько предложением, обеспечивающим экономическую выгоду для отрасли. Поэтому первый, кто такой рынок сформирует, тот и будет иметь конкурентное преимущество. И очевидная задача отечественных разработчиков и государственных структур – обеспечить первенство российских технологий, систем и сервисов для автономных судов, как минимум, в акваториях собственных водных путей. Для этого предлагается преобразовать проект (инициативу) «Автономное судовождение» в полноценную государственную программу «Автономное судоходство» – судоходство как отрасль экономики.

В условиях, когда, с одной стороны, существующего правового обеспечения уже достаточно для разработки, создания, тестирования и эксплуатации МАНС, как минимум, в территориальных и внутренних водах России, а с другой стороны, судоходные компании проявляют повышенный интерес к снижению затрат на эксплуатацию таких судов, данная программа должна быть направлена на достижение опережающего научно-технического задела, разработку технологий и систем для автономных судов и самих судов, которые обеспечат лидерство России в этой области.

В этой программе должны быть отдельные разделы для морского и речного судоходства. Каждый раздел должен включать подразделы по проектированию и постройке автономных судов, разработке под эти проекты необходимых систем, включая системы навигации и автономного судовождения, по разработке и оснащению необходимых береговых структур и морских путей, а также подразделы нормативно-правового обеспечения и подготовки кадров, включая разработку технических средств обучения. Эта программа должна иметь конкретные цели, задачи, сроки, показатели выполнения.

2.В качестве первоочередных частных задач этой программы в опережение ее разработки и утверждения предлагается выполнить ряд очевидных мероприятий, которые напрямую вытекают из уже выявленных противоречий и актуальных задач, стоящих перед водным транспортом РФ. В их числе:

– Проектирование и постройка автономного грузопассажирского парома на электрической тяге со статическими источниками энергии – на наиболее простом виде речного судна позволяет отработать несколько ключевых технологий и решить одновременно несколько проблем как для речного, так и для морского транспорта. В частности, проектирование полностью безэкипажного судна, полностью автономное управление по маршруту, автоматическое причаливание, электрическое энергоснабжение, судовое и береговое автоматическое зарядное оборудование и пр.
– Исследование путей и проработка технических решений по созданию комплекса координированного предотвращения столкновений и безопасного расхождения морских судов, включая автономные – разрешает проблему влияния человеческого фактора на расхождение судов, создает технологию автоматического безопасного судовождения автономных и неавтономных судов, внедрение которой должно стать основой для пересмотра действующей Конвенции по предупреждению судов в море (COLREG/МППСС).
– Разработка автоматической системы мониторинга мореходности и определения безопасного курса и скорости при неблагоприятных погодных и морских условиях для морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов – решает проблему безопасного штормования автономного судна.
– Разработка технологической платформы информационного обеспечения управления флотом автономных судов – решает задачу автоматизации повседневной деятельности полностью или полуавтономных судов, не связанной непосредственно с судовождением. Используются технологии цифровых двойников, больших данных, искусственного интеллекта. Вся информация о судне собирается на сайте с автоматическим авторизованным доступом к нему.
– Разработка технологической платформы когнитивной интегрированной навигационной системы автономного судна – открывает новое направление в судовом приборостроении по созданию специальных навигационных систем с элементами когнитивного управления, заменяющего управление человеком. Все существующее конвенционное навигационное оборудование, включая интегрированное, направлено, согласно концепции е-Навигации, на все более полное и централизованное предоставление информации капитану судна для принятия решения. При этом, режимы работы этого оборудования капитан устанавливает, в большинстве случаев, вручную. Переход к а-Навигации требует иного подхода к разработке систем, когда режимы работы навигационного оборудования устанавливаются автоматически, исходя из решаемых задач и внешних условий.
– Проектирование и постройка автономной саморазгружающейся грузоотвозной шаланды – создание полностью автономного безэкипажного судна технического флота, имеющего наибольшие перспективы в экономической целесообразности внедрения технологии дистанционного управления и автономной навигации.
– Проектирование и постройка автономной самоходной речной аппарельной баржи – с учетом развитой системы ВВП РФ чрезвычайно актуальной является необходимость обновления действующего речного флота. Одновременно развитие автономного судовождения по ВВП позволит повысить уровень безопасности судоходства и существенный экономический эффект. Разработка такого судна позволит формировать речные безэкипажные караваны для работы на северных реках для обеспечения деятельности Северного морского пути.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. определяет актуальной задачу развития автономного водного транспорта, внедрение автономных судов в пассажирских и грузовых перевозках с уровнем автономности 2 и выше. В такой постановке она соответствует мировой тенденции в продвижении автономного судоходства и его правовому обеспечению, включая разработку ИМО Кодекса безопасности морских автономных надводных судов (Кодекса МАНС).

2. Несмотря на значительную проработку за последние годы российского нормативно-правового обеспечения автономного судоходства и очевидные положительные результаты, уже полученные в проекте «Автономное судовождение», этих результатов недостаточно для решения поставленной в Транспортной стратегии задачи. Так, далеко не все категории автономности по классификации РС или Российского классификационного общества могут быть реализованы на практике при постройке судов и предложены заинтересованным судовладельцам, так как не обеспечены соответствующими отечественными автономными системами.

3. Требует решения вопрос безопасного расхождения автономных и судов под управление капитана, обеспечивающего полное исключение морских происшествий, связанных с неоднозначным пониманием рекомендаций МППСС–72 и их необязательным исполнением. Очевидна необходимость изменения существующего подхода к дистанционному управлению для предоставления возможности одному оператору одновременно управлять несколькими судами из берегового центра. А для достижения полноценного экономического эффекта от применения автономных судов необходимо автоматизировать не только судовождение, но и все аспекты морского транспорта, где сейчас требуется участие человека.

4. Для решения выявленных недостатков, проблем и противоречий предлагается преобразовать инициативу социально-экономического развития РФ «Автономное судовождение» в полноценную государственную программу «Автономное судоходство» – судоходство как отрасль экономики. В этой программе должны быть отдельные разделы для морского и речного судоходства, определены конкретные цели, задачи, сроки, показатели выполнения. А в качестве первоочередных частных задач этой программы, в опережение ее разработки и утверждения, могут быть предложены работы, актуальность и возможность выполнения которых уже сейчас не вызывает сомнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года.
2. MSC.1/Circ.1638 – Outcome Of The Regulatory Scoping Exercise For The Use Of Maritime Autonomous Surface Ships, 3 June 2021.
3. MSC 108/4 – Development of a goal-based instrument for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS), 13 February 2024.
4. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII. Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна. НД № 2–020101–174. – Российский морской регистр судоходства, 2024.
5. Правила классификации автономных судов, освидетельствования технических средств, предназначенных для обеспечения управления автономными судами. – Российское классификационное общество, 2024.
6. Федеральный закон Российской Федерации «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», 29 июня 2023 г.
7. Интернет ресурс: https://rutube.ru/video/4500f02479a0e9ed9070a6dee6849125/, дата обращения 05.11.2024.
8. Интернет ресурс: https://tv.rbc.ru/archive/industries/6552250a2ae596712b07684c, дата обращения 05.11.2024.
9. Интернет ресурс: https://rutube.ru/video/28f96cae1e66e7cfaff4d311da8f6b88/, дата обращения 05.11.2024.
10. Интернет ресурс: https://portnews.ru/news/369557/, дата обращения 05.11.2024.

ПАМЯТИ А. Ф. ШЛЕМОВА

П.А. Васильев, *сотрудник АО «Северное проектно-конструкторское бюро», контакт. тел. (812) 702 3005*

Анатолий Федорович Шлемов родился 14 октября 1949 г. в Ленинграде в семье военного моряка, видного ученого, специалиста в области прочности и боевой защиты боевых кораблей Федора Степановича Шлемова.

Славный путь служения военно-морскому флоту Анатолий Шлемов начал в Ленинградском нахимовском военно-морском училище, которое закончил с золотой медалью в 1967 г.

В 1972 г. он с отличием закончил кораблестроительный факультет ВВМИОЛУ им. Ф. Э. Дзержинского. Военную службу продолжил на кораблях четвертой эскадры Краснознаменного Северного флота в должности командира электромеханической боевой части транспортного плавучего дока ТПД-12, затем стал младшим военным представителем Военного представительства № 1059 (ВП № 1059) Министерства обороны СССР на Северном машиностроительном предприятии в Северодвинске.

В 1979 г., после окончания кораблестроительного факультета Военно-морской академии им. А. А. Гречко, А. Ф. Шлемов опять проходит военную службу в ВП № 1059, где впоследствии стал заместителем начальника. В период своей службы на Севмаше он как представитель ВП № 1059 принимал активное участие в строительстве, испытаниях и сдаче всех заказов атомных подводных лодок. В июне 1987 г. А. Ф. Шлемова переводят в Главное управление кораблестроения (ГУК) ВМФ, где он и проработал до выхода в запас в 2008 г. в должности начальника ГУК ВМФ, в звании вице-адмирала.

Судьба распорядилась так, что в девяностые годы, работая в ГУК ВМФ РФ на разных должностях, Анатолию Федоровичу пришлось буквально спасать как боевые корабли, так и предприятия промышленности (КБ и отраслевые НИИ), а также НИИ ВМФ, ВП МО и другие структуры.

В сложных условиях, а часто просто сумбурных отечественных реформ, в период выживания промышленности от руководства аппарата кораблестроения ВМФ требовались особые качества – трезвая оценка сложившегося состояния, адекватные и оперативные решения (порой неодобряемые высшим руководством страны), сохранение предприятий судостроительной отрасли, многие из которых были уже приватизированы и находились на грани ликвидации. Руководить подобными процессами мог только человек уважаемый в кораблестроительной среде, обладающий незаурядными инженерными знаниями, неравнодушный и глубоко преданный делу. Таким руководителем был А. Ф. Шлемов.

А.Ф. Шлемов

Благодаря его усилиям ведущие предприятия отрасли были сохранены, что особенно ясно видно сегодня.

На первом этапе реформирования ВМФ и судостроительной отрасли стояла задача сохранения всего того, что было создано предшественниками. Однако реалии потребовали искать новые подходы к комплектованию оптимального корабельного состава ВМФ. Было очевидно, что флот из такого количества кораблей и номенклатуры, как это было во времена СССР, в современных геополитических условиях, существовать не может. В стране нет необходимых ресурсов: финансовых, трудовых, инфраструктурных. Благодаря личному участию А. Ф. Шлемова в обосновании современного облика ВМФ России, было запланировано строительство кораблей четвертого поколения в соответствии с государственной программой.

Переход к новому облику ВМФ, определение стоящих задач, а самое главное – согласование этих задач с Главными штабами ВМФ, ВС РФ и другими государственными органами потребовали от А. Ф. Шлемова не только твердых инженерных знаний, умения доходчиво и убедительно докладывать, но и осознания сложившейся ситуации, чтобы отстаивать новые подходы к проектированию и строительству кораблей. На рубеже 2000 гг. это было далеко не ординарным делом, и требовалось личное мужество руководителя.

После выхода в запас А. Ф. Шлемов до 2016 г. работал в Департаменте государственного оборонного заказа АО «ОСК», которое основано в соответствии с Указом Президента РФ № 394 от 27.03.2007 г. Под его руководством в департаменте сложился коллектив единомышленников. В это время российские корабелы проектировали, строили и модернизировали корабли различных классов. Это происходило под неусыпным вниманием этого департамента и его руководителя. Принимал личное участие в строительстве, испытаниях и передаче флоту атомных подводных лодок 3-го поколения проектов 941 «Акула», 949 и 949А «Антей», 971 «Барс», надводных кораблей «Адмирал Чабаненко» пр. 11551, тральщика «Вице-адмирал Захарьин» пр. 02668.

Возглавлял Управление кораблестроения ВМФ, а с 2004 г. — Управление заказов и поставок кораблей, морского вооружения и военной техники ВМФ, организовал развертывание строительства подводных лодок 4-го поколения пр. 955, пр. 955А «Борей», 885, 885М «Ясень», 677 «Лада», новейших фрегатов пр. 22350, корветов пр. 20380, тральщиков пр. 12700, которые в настоящее время определяют перспективный облик ВМФ.

В память о нем один из кораблей пр. 12700 назван «Анатолий Шлемов».

За безупречную службу в ВМФ награжден орденами «Красной звезды» (1984), «За службу Родине в Вооруженных силах СССР» III степени (1991), «За военные заслуги» (1999), орденом Почета (2008). За создание новейших кораблей и принятие их на вооружение ВМФ ему в 2002 г. присуждена премия Правительства РФ в области науки и техники.

Скончался 16 мая 2018 г. Похоронен на Троекуровском православном кладбище. ■

Минный тральщик «Анатолий Шлемов»

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ УСТРОЙСТВ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ СУДОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Л.В. Гукова, *лаборант,*
Е.А. Логинова, *канд. техн. наук, доцент,*
А.В. Протасов, *магистрант,*
Л.Л. Соколов, *магистрант,*
В.Г. Юрьев, *канд. техн. наук, доцент,*
СПбГМТУ,
контакт. тел. (812) 713 8405

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей машиностроительного производства является обеспечение надежности и качества деталей и узлов машин [1]. Немаловажную роль в этом играет процесс их механической обработки: промышленности необходимы изделия с более высокими физико-механическими свойствами и темпами их изготовления. Этому комплексу требований к качеству и эффективности производства в существенной мере позволяет удовлетворить автоматизированное станочное оборудование.

Следует отметить, что в современном машиностроении ведется активная модернизация производства, методов и средств автоматизации производственных процессов [2]. Основной акцент – обновление станочного парка и повышение квалификации сотрудников. Следствием инноваций в производстве является повышение производительности труда, качества изготавливаемой продукции, увеличение номенклатуры изготавливаемых изделий. Подобные тенденции наблюдаются на протяжении длительного времени и характерны для промышленных предприятий ведущих стран мира. В частности, компания Bosh внедрила концепцию индустрии 4.0, которая подразумевает сочетанное использование искусственного интеллекта, 3D-прототипирования и промышленного Интернета вещей [3].

В Российской Федерации задачи совершенствования производства системно решаются на государственном уровне, в том числе в форме национальных проектов ([4]), что обеспечивает глобальное стратегическое лидерство страны.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В условиях нынешней внешнеполитической обстановки одной из главных задач российской судостроительной отрасли является увеличение темпов производства, что требует неуклонного увеличения доли автоматизированных процессов. Это позволит сократить проектные сроки, повысить эффективность производства, освободить квалифицированных работников от рутинных операций, сосредоточив их внимание на более сложных задачах, что обеспечит общий рост судостроительной промышленности и отрасли в целом [5, 6].

Перечисленные выше направления развития требуют значительных инвестиций в материально-техническую базу, а главное – в инженерно-технические и научные кадры, подготовка которых возлагается на профильные высшие учебные заведения. В связи с этим назрела необходимость инновационной реорганизации образовательного процесса в соответствии с важнейшими трендами развития промышленности – цифровизацией проектирования и роботизацией производства. Нынешние темпы обновления образовательных программ различного уровня и подготовки на их основе инженерных кадров на данный момент все еще не могут в полной мере обеспечить растущие потребности производств.

АСПЕКТЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Для решения перечисленных выше задач ведущими университетами разрабатываются различные программы опережающего характера, направленные на подготовку профессионалов, готовых к постоянно обновляющимся парадигмам современного производства.

Данные программы должны формировать знания, умения и навыки проектирования инженерных объектов от стадии виртуального прототипа до стадии реального физического воплощения – «овеществления идеи», что позволяет рационально организовать как образовательный процесс, так и научно-исследовательскую и конструкторско-технологическую работу. В связи с этим в лабораторных практикумах используют промышленные системы автоматизированного (компьютерного) проектирования.

Следует, однако, отметить, что цифровое проектирование как самих изделий машиностроения, так и оснастки для их механообработки, несмотря на внушительный перечень превосходств над натурным макетированием, имеет существенную затрудненность визуализации динамики процесса механообработки.

Изучение конструкций устройств для выполнения механообработки деталей – важный элемент подготовки конструктора-технолога, и применяемые в образовательном процессе средства САПР позволяют конструировать подобные устройства, однако динамика процесса их взаимодействия с обрабатываемой заготовкой будет скрыта от обучаемого, что снижает наглядность и, следовательно, усвояемость.

Повысить качество виртуальных лабораторных практикумов по конструированию технологической оснастки можно путем внедрения в учебный процесс и применяемые в нем технические средства цифрового двойника [7] этой технологической оснастки.

Авторами предлагается сочетанное применение типовых машиностроительных САПР (в авторском варианте – «Компас-3D») и средств визуализации динамических моделей (в авторском варианте – «Blender» [8]).

САПР «Компас-3D» позволяет спроектировать модель изделия, выполнить анализ ее физико-механических свойств, расчет прочностных характеристик и т.п., в то время как САПР «Blender» – выполнить рендеринг динамики изменения состояний модели через заданные промежутки времени. Обе САПР имеют возможность работы с широко распространенными форматами описания STL, OBJ и FBX, благодаря чему возможен двунаправленный перенос моделей между ними.

Такой подход к организации процесса позволяет конструктору-технологу проектировать различные оснастки и испытывать в действии их цифровой двойник, экономя временные и материальные ресурсы на создание физической модели.

Рассмотрим стадии такого расширенного процесса конструирования технологической оснастки на примере устройства для снятия фасок и притупления острых кромок. На рис. 1 показана схема устройства, на рис. 2 – его 3D-модель в САПР «Компас», а на рис. 3 – кадры визуализации в САПР «Bender» процесса его функционирования: снятия фаски.

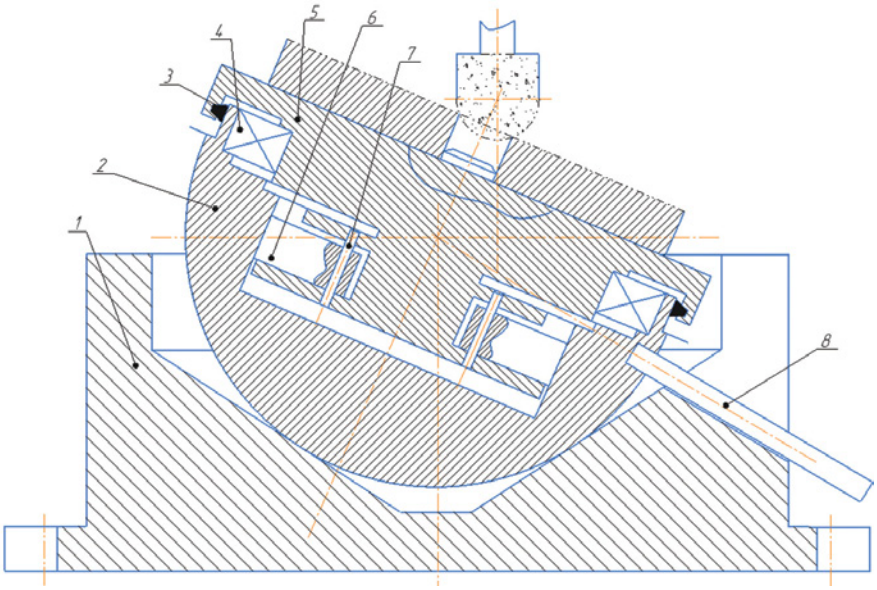


Рис. 1. ***Вариант схемы устройства для установки заготовки и ее вращения при снятии фасок и притуплении острых кромок***
1 – основание, 2 – корпус, 3 – уплотнение, 4 – подшипник качения, 5 – платформа, 6 – колодка тормоза, 7 – ось, 8 – рычаг

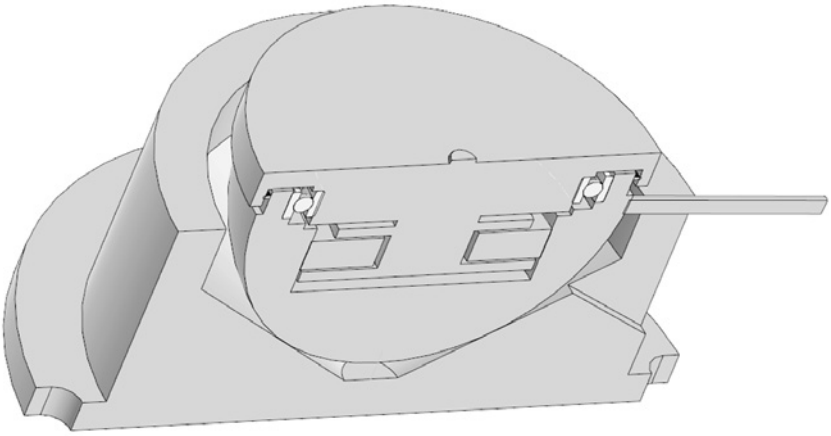


Рис. 2. ***3D-модель устройства в САПР «Компас»***

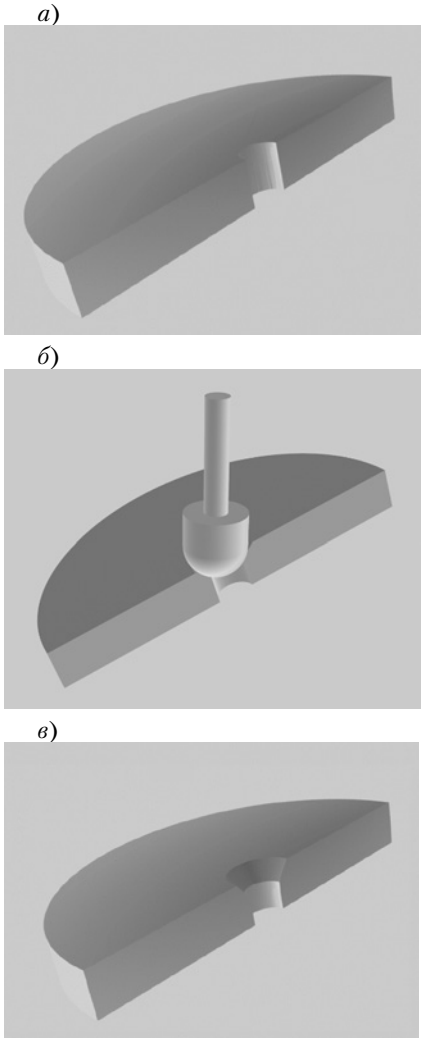


Рис. 3. ***Стадии визуализации процесса механообработки в САПР «Blender»: после сверления (а), в процессе снятия фаски (б), после снятия фаски (в)***

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подходы к организации научно-исследовательского, конструкторско-технологического и образовательного процессов, предполагающие использование цифровых двойников, могут стать действенным дополнением к существующим подходам, что позволяет повысить степень восприятия разработчиком промежуточных результатов разработки, а это обеспечивает ресурсоэффективность достижения конечного результата проектирования – изготовления натурного изделия машиностроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Панов А.Н.* Надежность в машиностроении. Нормирование рисков // Стандарты и качество. – 2021. – № 10.– С.108–109.
2. *Агарков А.П.* Новые подходы к решению современных проблем системного управления в промышленности и машиностроительном производстве // Экономика и управление в машиностроении. – 2021. – № 1.– С.24–27.
3. Официальный сайт фирмы «Bosh». – [Электронный ресурс] URL: https://blog.bosch-digital.com/industry-40-germany-takes-first-steps-toward-next-industrial-revolution/ (дата обращения 22.07.2024)
4. Национальный проект «Производительность труда». Электронный ресурс, URL: https://www.economy.gov.ru/material/directions/nacionalnyy_proekt_proizvoditelnost_truda/ (дата обращения 22.07.2024)
5. К вопросу инновационного развития судостроения Российской Федерации/ *Александров М.В., Габдрафиков Ю.М, Половинкин В.Н., Герасимов Н.И., Горелов В.В., Красильников А.В.* // Судостроение. – 2023. – № 3(868).– С.3–11.
6. *Голосов А.И.* Технологическое проектирование и проблемы развития судостроения в России // Судостроение. – 2021. – № 3(856).– С.34–41.
7. Designing the built-in microcontroller control systems of executive robotic devices using the digital twins technology/ *Васильев А.Е., Самарин В.А., Раскин Д.С., Евсеев Е.П., Верис В.Д., Песчинский И.В., Кабесас Тапиа Д.Ф.* – Proceedings of 2019 International Conference on Information Management and Technology, 2019. Article №8843814.
8. Среда Blender. Школа дизайна «Contented.RU». – [Электронный ресурс] URL: https://media.contented.ru/glossary/blender-3d/

ЦИФРОВИЗАЦИЯ СУДОРЕМОНТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Д. И. Гомонов, *начальник бюро подготовки производства ОГТ АО «Кронштадтский морской завод»,*
Г. Я. Кремлёв, *вед. инженер-конструктор ПАО СЗ «Северная верфь»,*
контакт. тел. +7 (911) 128 2668, +7 (911) 199 4708

На сегодняшний день термин «цифровизация» часто звучит, но многие интерпретируют его по-разному. Внедрение новых цифровых инструментов или платформ в деятельность предприятия поможет вырваться в лидеры отрасли, но процесс должен проходить с абсолютным пониманием конечного результата, чтобы в конечном итоге достичь ожидаемого положительного эффекта.

Главная цель цифровизации – изменение стереотипов мышления, методов работы и принципов управления предприятием. В статье рассмотрено внедрение цифровых технологий на судоремонтном предприятии, которые значительно повысят эффективность использования его производственных мощностей, материальных и человеческих ресурсов с целью увеличения пакета заказов ремонтируемых объектов.

Цифровизация – это результат развития общества в области формирования, хранения, обмена и поиска информации, что вносит решающий вклад в развитие культуры, технологий и технического прогресса. Использование цифровизации позволит внести значительные изменения в развитие и управление такими сферами, как наука, промышленность, экономика, образование, здравоохранение, торговля и многие другие.

Появление огромного количества информации выявило потребности систематизации данных и установления логических связей между блоками информации. С помощью цифровизации сегодня совершается четвертая промышленная революция.

Цифровизация – процесс перевода фактических данных и рабочих процессов в цифровой формат. Ее яркие примеры:

– замена наличных денег на банковские приложения;
– появление маркетплейсов для покупки товаров из любой точки в любое время;
– компьютерные стратегии, которые моделируют различную деятельность.

Одним из самых перспективных направлений цифровизации является создание цифровых платформ для управления производственной деятельностью предприятия или комплексом предприятий. При этом для реального предприятия особо важной задачей становится равномерное распределение имеющихся ресурсов для получения необходимого результата в заданные временные сроки. Внедрение цифровизации в производственные процессы позволит это сделать.

Рис. 1. ***Доковый ремонт судна в сухом доке***

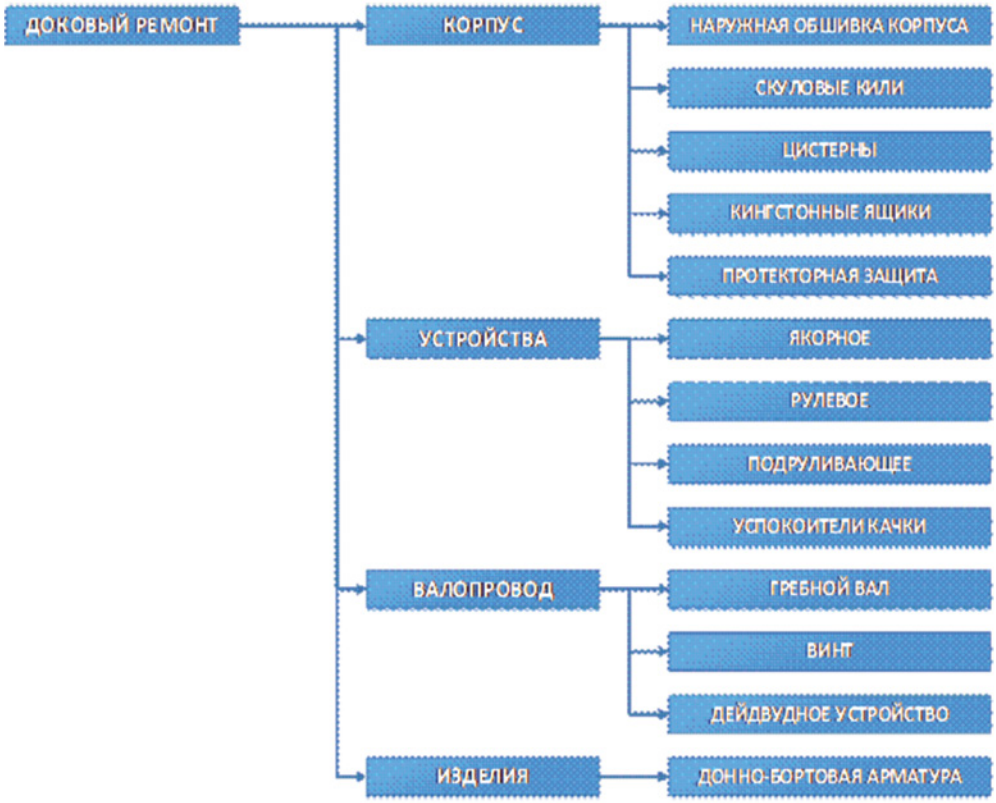


Рис. 2. ***Основные элементы докового ремонта***

Ведущие мировые технологические компании все шире используют цифровые технологии, но чтобы увеличить отдачу от инвестиций в новые технологии, сначала нужно убедиться в наличии у компании тщательно продуманной цифровой стратегии, осознания предстоящих изменений и возникновения проблем в ходе внедрения изменений.

Каждая проблема, вызванная изменением технологии, приводит к появлению решения с применением цифровизации, которое вызовет еще большее изменение, и в результате мы столкнемся с новой реальностью и с новым набором проблем или возможностей.

Существуют разные виды ремонтов судов и кораблей для обеспечения и продления их жизненного цикла. Одним из обязательных является доковый, для выполнения которого имеется стандартный перечень механизмов и устройств, необходимых для обеспечения их работоспособности в процессе жизненного цикла.

Доковый ремонт – плановый ремонт подводной части судна и механизмов, который выполняется в специальном гидротехническом сооружении (рис. 1).

При доковом ремонте осмотру и ремонту (при необходимости) подвергаются составные части и механизмы, перечисленные на рис. 2.

Подготовка производства к доковому ремонту судна состоит из следующих видов: конструкторская, технологическая, материально-техническая, организационно-плановая. При этом она должна отвечать на следующие вопросы: что ремонтируем (конструкторская), как ремонтируем (технологическая), чем ремонтируем (материально-техническая), сколько по времени ремонтируем и стоимости (организационно-плановая).

Конструкторская подготовка производства – это проверка наличия конструкторской документации и организация ее получения в случае отсутствия, а также обеспечение конструкторской документацией подразделений предприятия для непосредственного исполнения в установленные сроки производственными подразделениями.

Сегодня процесс проверки конструкторской документации (КД) на предприятиях (в большинстве) концептуально ничем не отличается от данного процесса 40–50 лет назад. Для прогресса требуется внесение конструкторской информации (технические и габаритные характеристики, детальный состав изделий, устройств и механизмов, марки материалов для изготовления) о кораблях и изделиях в цифровом формате в цифровые платформы.

В качестве примера рассмотрим изделие судового машиностроения, состоящее из сборочных единиц, деталей, стандартных изделий и материалов. Для формирования массива данных КД необходимо создать цифровую платформу со строго определенной структурой (каталогом) и наполнять требуемой информацией согласно определенному алгоритму, затем к каждой позиции присоединить гиперссылки на электронный чертеж из виртуального хранилища конструкторской документации. При наличии чертежа происходит индикация ячейки зеленым цветом, в случае отсутствия – красным. Главная задача конструкторской подготовки производства – сортировать и обозначить имеющиеся или отсутствующие чертежи, а также выполнить привязку электронных версий документов к реальным изделиям.

Технологическая подготовка производства – обеспечение готовности предприятия к ремонту заказов в установленные сроки с требуемыми качеством и технико-экономическими показателями.

Процесс технологической подготовки производства можно условно разделить на несколько этапов: выявление и описание сопутствующих операций для выполнения ремонта заданного изделия; последовательное описание операций для изделия в комплекте; описание операций для ремонта каждой детали в случае обнаружения дефектов.

Ремонт каждого изделия идет по установленному стандартному сценарию (набору операций), но возможны и отклонения от него. Данный сценарий можно внести в цифровую платформу и привязать к определенному изделию с возможностью выбора необ-

ходимых операций. Каждая операция выполняется определенным специалистом и соответствует определенному уровню продвижения. На этапе ремонта комплектующих деталей возможны три сценария: ремонт, изготовление и закупка. При изготовлении новых деталей и ремонте можно задать профессии рабочих, участвующих в процессе, а также движение детали по участкам и зафиксировать технологическую трудоемкость.

Материально-техническая подготовка производства – организация поставок материалов, комплектующих изделий и оборудования в сроки, обеспечивающее выполнение ремонтных работ на заказе, а также создание складских запасов с последующей комплектацией и выдачей на производство.

В рамках выполнения операции ремонта или изготовления новых деталей используется определенное количество материалов, которые можно внести в цифровую платформу.

Сценарий закупки комплектующих изделий или деталей необходимо предусмотреть в цифровой платформе. Решение о привязке материалов к операциям ремонта, изготовления деталей, а также использования сценария закупки позволит формировать лимитные карты в автоматическом режиме.

Организационно-плановая подготовка производства – это комплексная подготовка производства для создания планово-учетных единиц.

При выполнении мероприятий конструкторской, технологической, материально-технической и организационно-плановой подготовки производства в цифровой платформе планы и графики выполнения работ, сменно-суточные задания по этапам работ, требования-накладные на материалы и комплектующие изделия, отчеты о поступлении товаров, перечень контрагентских работ, итоговые отчетные калькуляционные материалы будут формироваться в автоматическом режиме.

Для успешного внедрения цифровизации в производственный процесс необходимо внимательно и досконально, до мелких деталей, изучить всю производственную цепочку и выявить повторяющиеся закономерности или цикличность, а также объединяющие факторы.

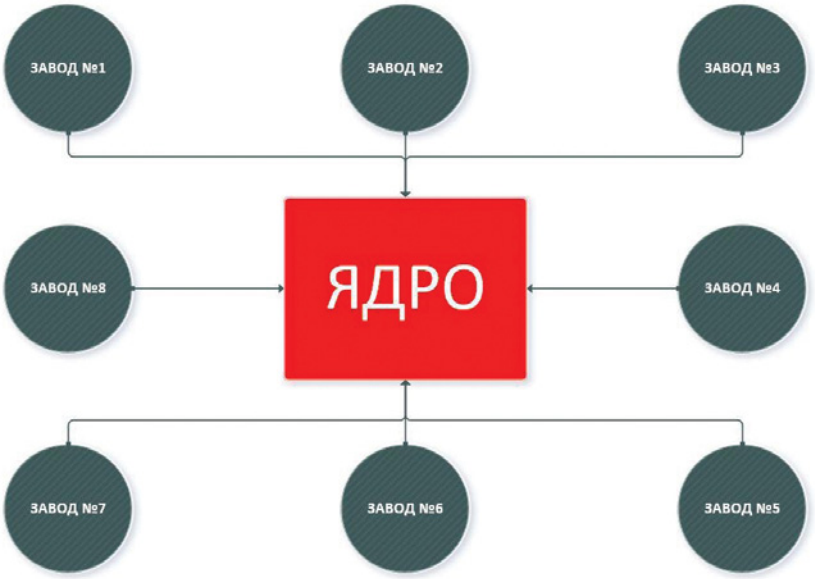


Рис. 3. ***Принципиальная схема обмена информацией***

Судовая арматура определенного вида и типа на судах разных проектов могут различаться, но алгоритм ремонта одинаковый, соответственно все временные и материальные затраты, как и маршрут движения изделия по производственным участкам.

Для более быстрого формирования массива информации в цифровой платформе данную методику необходимо распространить на все судоремонтные предприятия. Предприятия смогут вносить в данную платформу технические характеристики, геометрические параметры, состав изделий и перечень технологических операций (процессов), а также использовать имеющиеся в ней данные для ремонта судов, изделий и механизмов. Принципиальная схема представлена на рис. 3.

При создании платформы по ремонтируемым заказам можно будет фиксировать историю ремонта заказа, частоту дефектов по группам изделий, расход материалов и необходимых комплектующих изделий, вести учет аналогов иностранного оборудования или снятого с производства.

Цифровая трансформация судоремонтного предприятия позволит осуществлять:

- обмен цифровыми данными и информацией между судоремонтными предприятиями;
- электронное планирование (декадное, месячное, квартальное, годовое) из любой точки страны для любого судоремонтного предприятия с учетом производственных возможностей;
- хранение и увеличение базы информации;
- автоматическое формирование лимитных карт на материалы и комплектующие изделия;
- выпуск сменно-суточных заданий и отчетов;
- минимизацию ошибок при закупке материалов и комплектующих изделий;
- анализ данных для введения улучшений в бизнес-процессы;
- управление запасами складов;
- расчет загрузки оборудования предприятия;
- оптимизацию персонала инженерно-технических работников, задействованных в процессе подготовки производства. ■

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОТСЕКА С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО АППАРАТА БОЛЬШОЙ ДАЛЬНОСТИ

А.Н. Дядик, *д-р техн. наук, проф., СПбГМТУ,*
В.А. Дядик, *канд. техн. наук, главный специалист ФАУ РМРС,*
Д.С. Маловик, *аспирант, СПбГМТУ,*
контакт. тел. 8 981 968 1357

ВВЕДЕНИЕ

В докладе [1] о разработке большого необитаемого подводного аппарата (АНПА) в АО «ЦКБ «Лазурит» проанализированы работы в этом направлении зарубежных (в основном американских) фирм, АНПА которых, как оказалось, имеют водоизмещение от 30 до 50 т (рис. 1). На основании проведенных исследований делается вывод о необходимости разработки в России больших АНПА большой дальности (БД) подводного хода на базе высокоемких источников электроэнергии.

Одним из вариантов энергетической установки АНПА БД является электрохимический генератор (ЭХГ) с криогенным хранением кислорода и выработкой водорода на борту аппарата, например, путем риформинга дизельного топлива [2]. С целью получения возможных характеристик ЭУ с ЭХГ для АНПА БД таких же габаритов, как и у АНПА БД, был реализован алгоритм расчета.

ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ АНПА БД

Для исследования характеристик энергетического отсека АНПА БД с ЭХГ был реализован алгоритм расчета и составлена программа на языке Mathcad-15 [3]. В качестве батареи топливных элементов можно принять отработанную в филиале «ЦНИИ СЭТ» батарею БТЭ-50К, где буква К означает, что в качестве окислителя используется кислород [4]. Эта батарея набирается из топливных элементов с твердополимерным электролитом и может работать на водороде с менее высокими показателями степени очистки по сравнению со щелочными топливными элементами (рис. 2). Особенностью

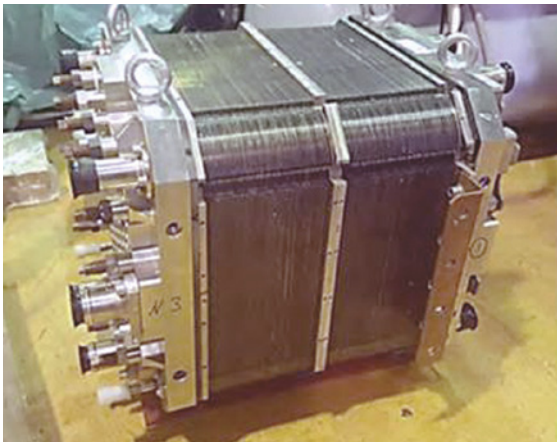


Рис. 2. ***БТЭ-50К электрической мощностью 50 кВт с твердополимерным электролитом, разработанная специалистами филиала КГНЦ «ЦНИИ СЭТ» под руководством И.К. Ландграфа***

Рис. 1. ***Компоновочная схема АНПА БД***

Исходные данные для расчета гибридной энергоустановки АНПА БД

Габаритные размеры АНПА БД

Длина *La*, м 15
Наружный диаметр корпуса *Dn* = 1,5 при отношении *La*/*Dn* 10
Толщина корпуса δ*ka*, м 0,04
Коэффициент сопротивления движению АНПА БД *Cx* 0,18
Внутренний диаметр энергетического отсека АНПА БД $Dv = Dn - 2 \cdot \delta ka$, м 1,42
Число батарей топливных элементов в энергоотсеке АНПА БД, *m* 1,0
Коэффициент гидродинамического сопротивления движению аппарата в морской воде [6] *Cx* 0,18

Параметры забортной воды и другие необходимые для расчета величины

Диапазон изменения температура, °С ..... от 0 до +40
Соленость морской воды Ksw, ‰ 35
Плотность забортной (морской) воды с учетом ее солености

$$\rho zv = \frac{1009 + 0{,}733 \cdot (Ksw - 10)}{1 - 3 \times 10^{-4} \cdot (tzv - 10)}, \text{ кг/м}^3 \quad (1)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) насоса забортной воды η*nzv*, ... 0,6
Температура забортной воды в теплообменнике системы термостатирования Δ*tzv*, °С 20
Коэффициент полезного действия (КПД):
валопровода η*val* 0,9
винта ηvint, ... 0,75
Степень гибридизации энергетической установки в составе ЭХГ и литий-ионной аккумуляторной батареи [7] *Kg* 0,5

Рис. 3. ***Схематичный разрез отсека АНПА БД с БТЭ***

рассматриваемой энергетической установки для АНПА БД является то, что она представляет собой гибридную энергоустановку и кроме батареи топливных элементов включает в свой состав литий-ионную аккумуляторную батарею [5]. В подобной гибридной энергетической установке существенно возрастает подводная автономность аппарата, поскольку на форсажных режимах нагрузку принимает аккумуляторная батарея, а на длительных автономных режимах – батарея топливных элементов (БТЭ) ЭХГ (рис. 2 и рис. 3).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ АНПА БД

Начальная скорость АНПА БД задается любой и в процессе расчета получается максимально возможной для аппарата данных габаритов и его энергетического отсека.

Буксировочная мощность, необходимая для движения аппарата,

$$Nb = Cx\frac{\rho zv\left(0{,}514\cdot Va\right)^3\left(0{,}785\cdot Dn^2\cdot La\cdot 0{,}8\right)^{\frac{2}{3}}}{2}, \qquad (2)$$

где Cx – коэффициент гидродинамического сопротивления АНПА; Va – скорость подводного хода аппарата, уз; Dn – наружный диаметр аппарата, м; La – длина аппарата, м; 0,8 – коэффициент полноты формы.

Приближение проводилось по диаметру топливных элементов (ТЭ) ЭХГ, которые можно было разместить в энергетическом отсеке диаметром Dv – 0,2. Отступы от внутреннего диаметра аппарата по 0,1 м с каждого борта необходимы для технологических целей, связанных с прокладкой силовых и прочих кабелей и установкой креплений БТЭ. Если это условие не выполнялось, то скорость аппарата уменьшалась на 0,1 уз. И так происходило до тех пор, пока условие по диаметру ТЭ не было соблюдено. При задании подводной скорости ниже максимально возможной приближение выполнялось также по величине габарита БТЭ, с той лишь разницей, что скорость движения аппарата увеличивалась на 0,1 уз. Для реализации этих приближений проводится расчет по формулам, приведенным ниже.

После определения величины буксировочной мощности АНПА БД находим электрическую мощность гребного электродвигателя – основного потребителя в энергетической установке:

$$Wgd = \frac{Nb}{\eta val\cdot\eta vint}, \text{ кВт}, \qquad (3)$$

где ηval и $\eta vint$ – КПД валопровода и винта соответственно.

Затем в первом приближении определяем электрическую мощность БТХ энергетической установки

$$Nehg = 1{,}5\cdot Wgd, \text{ кВт}, \qquad (4)$$

где множитель 1,5 в первом приближении оценивает потребление агрегатами АНПА БД электрической мощности помимо движительно-рулевого комплекса (ДРК), включая подруливающие устройства, т.е. примерно в 50%. Данная величина принята на основании анализа зарубежных литературных источников.

По величине выходного напряжения БТЭ определяем максимальный электрический ток, выдаваемый в сеть. С учетом полученной величины вычисляем необходимый массовый расход водорода, кислорода и воды, которая является результатом электрохимической реакции в топливных элементах (в виде водяного пара).

Находим суммарный тепловой эффект реакции

$$Q = q\cdot G_{H_2O}\cdot 10^3 / M_{H_2O}, \text{ кВт}, \qquad (5)$$

где $q = 286$ кДж/моль; H_2O – тепловой эффект реакции; $M_{H_2O} = 18{,}015$ г/моль – молекулярная масса воды.

Зная суммарный тепловой эффект реакции, можно определить количество теплоты, которое следует отвести от БТЭ:

$$Q_{отв} = Q - Nehg, \text{ кВт}. \qquad (6)$$

Количество теплоты, определяемое зависимостью (6), включает как теплоту, отводимую в энергетический отсек, где расположена БТЭ, так и теплоту, отводимую с пароводородной смесью в теплообменник-конденсатор системы термостатирования (СТС).

Количество теплоты, выходящее в энергетический отсек БТЭ,

$$Q_{от} = I_1U_1\left(\frac{1}{\eta_{БТЭ}} - 1\right), \text{ кВт}, \qquad (7)$$

где $\eta_{БТЭ}$ – коэффициент полезного действия БТЭ по верхней теплотворной способности водорода (принимается по данным разработчика БТЭ).

В инженерных расчетах для определения суммарного коэффициента теплоотдачи используют эмпирические уравнения. Для расчета тепловых потерь оборудования, находящегося в закрытых помещениях, при температуре поверхности аппарата ниже 150 °С можно воспользоваться уравнением

$$\alpha_{к\text{-}л} = 9{,}74 + 0{,}07\cdot T, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}, \qquad (8)$$

где $\alpha_{к\text{-}л}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием, Вт/(м²·К); $\Delta T = T_{БТЭ} - T_{от}$ – разность температур между поверхностью БТЭ и воздухом отсека, К.

Уравнение (8) учитывает перенос теплоты от горячей поверхности БТЭ к холодной поверхности прочного корпуса АНПА БД в двух процессах: конвекции и теплового излучения. Формула (8) верна для теплопередачи в ограниченных объемах, заполненных воздухом (см. рис. 3).

Далее в первом приближении определяем суммарную поверхность БТЭ:

$$F^1_{БТЭ} = \frac{Q_{от}}{\alpha_{к\text{-}л}\Delta T}, \text{ м}^2, \qquad (9)$$

где ΔT – разность температур между температурой воздуха в отсеке с БТЭ и корпусом АНПА БД. В первом приближении ΔT^1 = 10 °С.

Далее сравниваем полученную в первом приближении суммарную поверхность БТЭ с реальной величиной ее поверхности и, если погрешность в определении поверхности БТЭ превышает 5%, уточняем температуру в отсеке ΔT^2 = 10 ± 0,1 °С и расчет повторяем, пока не будет соблюдена необходимая погрешность. Величина коэффициента теплоотдачи от воздуха отсека БТЭ к корпусу АНПА в первом приближении может быть определена на основании многочисленных опытов, обобщенных, например, в [8], согласно которым при свободной конвекции воздуха в замкнутом объеме коэффициент теплоотдачи находится в пределах $5 \le \alpha_1 \le 30$ Вт/(м²·К). Отметим, что коэффициент теплоотдачи моделирует сложные процессы обмена теплотой между средой и стенкой. Величина коэффициента теплоотдачи зависит от многих факторов: состава газа и его температуры, температуры стенки, давления газа [9], скорости потока, направления действия массовых сил, характера течения, формы поверхности, направления теплового потока и др.

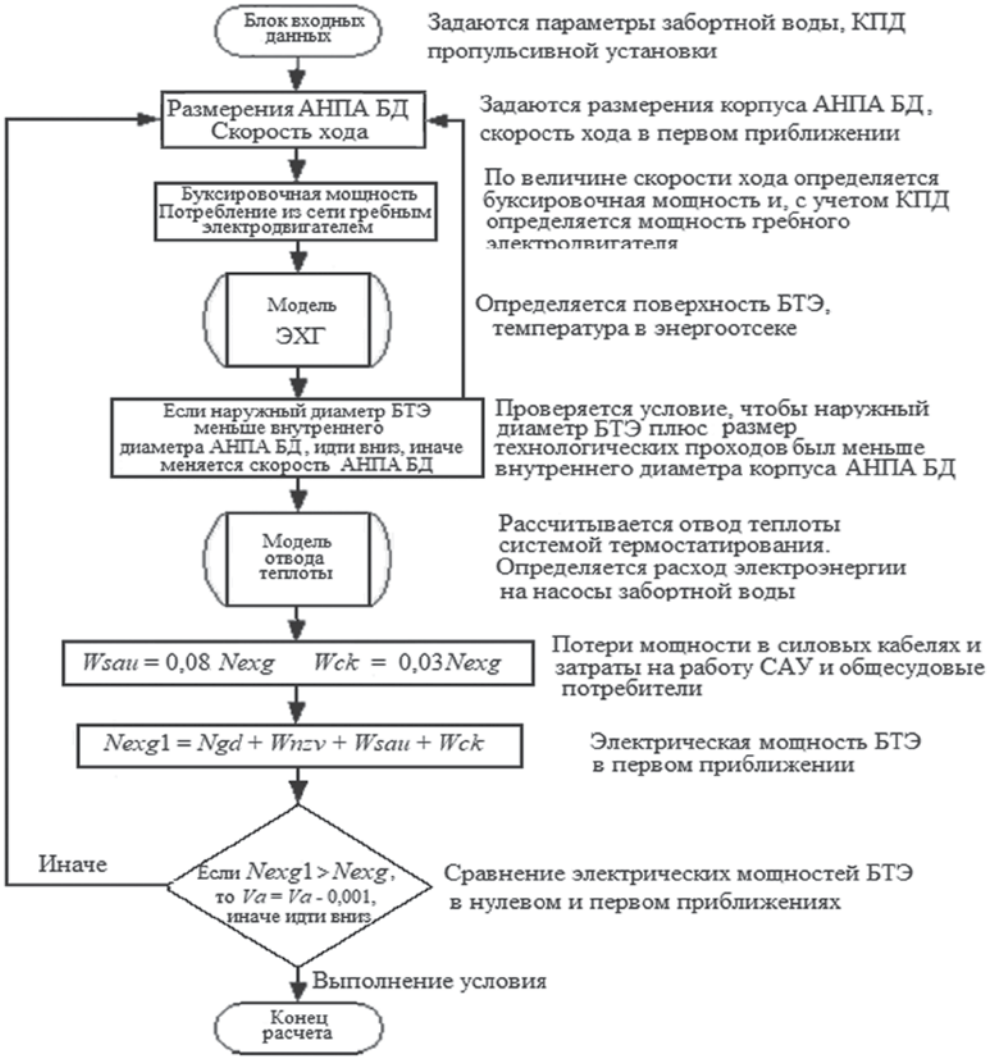


Рис. 4. ***Упрощенная структурная схема расчета гибридной энергетической установки АНПА БД***

Дальнейший расчет потребной поверхности для отвода теплоты через корпус АНПА БД изложен, например, в [10].

Далее производится расчет системы термостатирования, изложенный в статье [11]. По результатам расчета системы термостатирования определяется расход электрической энергии на прокачку забортного теплообменника насосом *Wnzv*.

Расход электроэнергии на работу системы управления АНПА БД и другие системы выбираем из расчета 20% мощности БТЭ, а на сетевые потери – 1% мощности БТЭ.

Затем суммируем все расходы электроэнергии на АНПА БД:

$$Nehg1 = Wgd + Wnzv + Wsau + Wck. \qquad (10)$$

Величину мощности БТЭ сравниваем с мощностью, полученной по уравнению (4). При расхождении этих величин более чем на 1% уточняем электрическую мощность БТЭ АНПА БД. По результатам этих приближений определяем скорость, которую может развить АНПА БД заданных габаритов. Упрощенная структурная схема расчета гибридной энергетической установки типа ЭХГ + ЛИАБ представлена на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Приведем результаты расчетов по математической модели, в ходе которых определялись:

- буксировочная мощность, Вт;
- электрическая мощность ЭХГ, Вт;
- тепловой эффект электрохимической реакции, Вт;
- отводимая теплота реакции, Вт;
- теплота, выделяемая в энергетический отсек с ЭХГ, Вт;
- теплота, отводимая системой термостатирования, Вт;
- массовый расход забортной воды для охлаждения ЭХГ, кг/с;
- площадь батареи ТЭ, м^2;
- температура в энергетическом отсеке с ЭХГ, °С;
- электрическая мощность, потребляемая из сети насосом системы термостатирования, Вт;
- электрическая мощность, потребляемая системой автоматики и другими приборами аппарата, Вт;
- электрическая мощность, теряемая в электросетях энергоустановки, Вт;
- диаметр БТЭ, м;
- скорость аппарата, уз;
- длина энергетического отсека аппарата, м;
- точность приближения поверхности топливных элементов, %.

Результаты одного из вариантов расчета по математической модели приведены на рис. 5.

В табл. 1 приведены результаты расчетов по математической модели для разных скоростей движения АНПА БД.

Z =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	$1{,}436\cdot10^4$	$3{,}191\cdot10^4$	$1{,}22\cdot10^5$	$9{,}009\cdot10^4$	$1{,}241\cdot10^4$	$7{,}769\cdot10^4$	3,896	7,047	32,5	$3{,}191\cdot10^4$	150	319,092	0,575	5,3	2,983	0,082

Рис. 5. ***Результаты расчетов по математической модели на экране монитора***

Таблица 1

Характеристики энергоустановки АНПА БД в функции подводной скорости при постоянной температуре забортной воды +35°С

Скорость АНПА, уз	Буксировочная мощность, Вт	Электрическая мощность ЭХГ, Вт	Теплота, выделяющаяся в энергоотсек, Вт	Температура в энергоотсеке, °С
0,1	0,097	0,194	0,049	75
1	96,89	193,4	49,5	72
2	775	$1{,}359\times10^3$	395,75	56,5
3	$2{,}616\times10^3$	$5{,}813\times10^3$	$1{,}336\times10^3$	52,5
4	$6{,}2\times10^3$	$1{,}378\times10^4$	$3{,}166\times10^3$	51,5
5	$1{,}21\times10^4$	$2{,}7\times10^4$	$6{,}18\times10^3$	51

Как следует из рассмотрения данных, приведенных в табл. 1, с ростом скорости аппарата буксировочная мощность увеличивается в кубической степени. Поскольку от темпа ее увеличения зависит электрическая мощность батареи ЭХГ, то ее рост также происходит вслед за увеличением буксировочной мощности. По этой же причине растет и тепловая мощность системы термостатирования. Что касается значений температур в энергетическом отсеке, то с ростом скорости аппарата они уменьшаются. Это связано с ростом коэффициента теплоотдачи от корпуса АНПА БД к забортной воде.

Несмотря на рост мощности БТЭ с увеличением подводной скорости движения аппарата, превалирует увеличение коэффициента теплоотдачи к забортной воде, что ведет к росту коэффициента теплопередачи от воздуха энергоотсека к воде и, в конечном счете к снижению температуры воздуха в энергоотсеке на 24°С.

Также интересно было рассмотреть изменения температуры в энергоотсеке и его теплопередающей поверхности в функции температуры забортной воды при постоянной скорости подводного хода АНПА БД (табл. 2).

Графики изменения параметров энергетического отсека представлены на рис. 6.

Таблица 2

Характеристики энергоустановки АНПА в функции температуры забортной воды при постоянной подводной скорости аппарата, равной 3 уз

Температура морской воды, °С	Длина теплопередающей части энергоотсека, м	Температура в энергоотсеке, °С
0	1,02	16
10	1,085	25,5
20	1,137	35,5
30	1,163	46,5
40	1,249	59

Как следует из анализа результатов расчета по математической модели АНПА, приведенных в табл. 2, увеличение температуры забортной воды слабо сказывается на основных показателях работы энергетической установки с ЭХГ при постоянной скорости 3 уз. По-видимому, это связано с малыми изменениями коэффициента теплоотдачи от корпуса аппарата к забортной воде. На рис. 7 представлены графики изменения температуры в энергоотсеке АНПА БД и его теплопередающей длины при разных температурах морской воды и постоянной скорости движения аппарата в 3 уз.

Блок расчета длины теплопередающей части энергетического отсека АНПА БД включает следующие зависимости.

Так, критерий Рейнольдса забортной воды при движении аппарата рассчитывался по формуле

$$Rezv = \frac{Va \cdot 0{,}514 \cdot Lots \cdot \rho zv}{\mu zv}, \qquad (10)$$

где Va – скорость АНПА, равная 3 уз; 0,514 – коэффициент перевода узлов в м/с; $Lots$ – длина энергетического отсека АНПА, задействованная в передаче теплоты через борт, м; ρzv – плотность забортной воды, определяемая по формуле (1), кг/м^3; μzv – динамический коэффициент вязкости забортной воды, Па·с, определяемый по формуле

$$\mu zv = 0{,}00178\left(1 + 0{,}0337 tzv + 0{,}000221 tzv^2\right)^{-1}. \qquad (11)$$

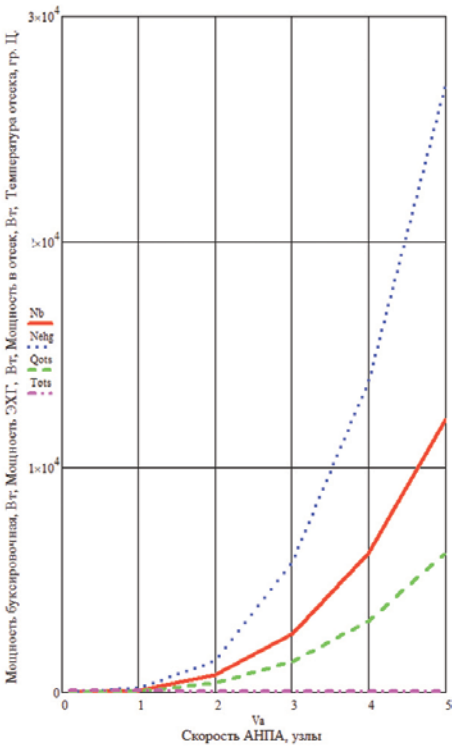


Рис. 6. ***Изменение параметров энергетического отсека в функции скорости АНПА БД при постоянной температуре забортной воды +35°С***

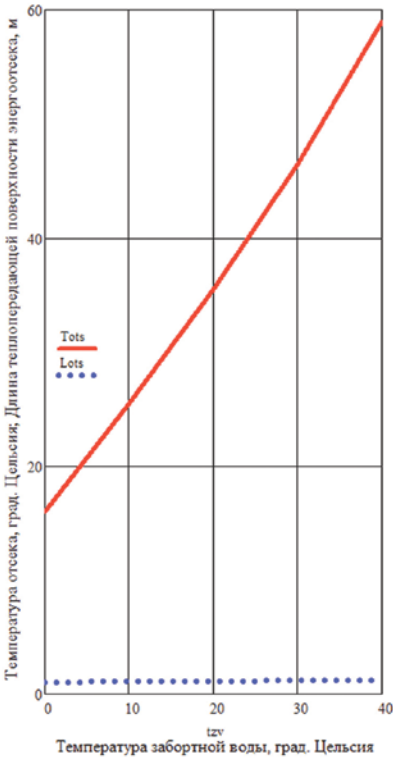


Рис. 7. ***Изменение параметров энергетического отсека и его теплопередающей длины при разных температурах***

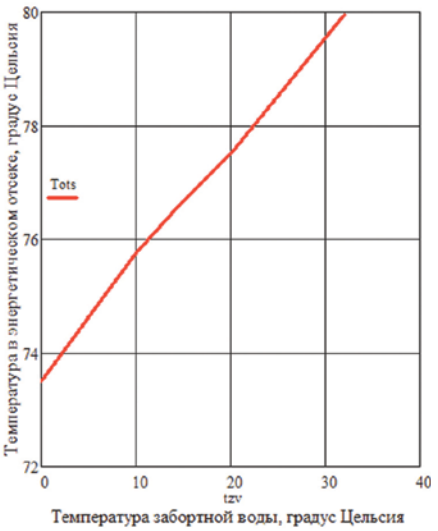


Рис. 8. ***Зависимость температуры в энергетическом отсеке от температуры забортной воды в режиме «зависания» АНПА БД***

Критерий Нуссельта при теплоотдаче от корпуса АНПА забортной воде рассчитывался с использованием зависимости

$$Nuzv=0{,}037\cdot Rezv^{0,8}\cdot Przv^{0,43}\cdot\left(\frac{Przv}{0{,}86}\right)^{0,25}. \quad (12)$$

В формуле (12) критерий Прандтля забортной воды определялся так:

$$Przv=\frac{\mu zv\cdot Cp\cdot 10^3}{\lambda zv}, \quad (13)$$

где Cp – удельная теплоемкость забортной воды, равная 4,3 кДж/(кг·К); λzv – коэффициент теплопроводности забортной воды, Вт/(м·К).

Коэффициент теплопроводности забортной воды

$$\lambda zv=1{,}15\cdot\left\{0{,}45+0{,}148\cdot\cos\left[0{,}896\cdot\left(\frac{tzv-135}{100}\right)\right]\right\}. \quad (14)$$

Коэффициент теплоотдачи от корпуса АНПА к забортной воде

$$\alpha zv=\mathrm{Nu}zv\frac{\lambda zv}{Dn}. \quad (15)$$

Коэффициент теплопередачи от воздуха энергетического отсека к забортной воде

$$kots=\frac{1}{\frac{1}{\alpha 1}+\frac{Dn}{2\cdot\lambda k}\cdot\ln\left(\frac{Dn}{Dv}\right)+\frac{Dn}{\alpha zv}}, \quad (16)$$

где λk – коэффициент теплопроводности корпуса АНПА [в нашем случае принято, что корпус выполнен из титанового сплава с коэффициентом теплопроводности 20 Вт/(м·К)].

Затем определялась теплопередающая площадь энергетического отсека по формуле

$$Fots=\frac{Qots}{kots\cdot\Delta Tozv}, \quad (17)$$

где $Qots$ – количество теплоты, выделяющейся в энергетический отсек от БТЭ, Вт; $\Delta Tozv$ – температурный напор между воздухом энергетического отсека и забортной водой.

Наконец, вычислялась необходимая длина энергетического отсека для реализации режима теплопередачи

$$Lots=\frac{Fots}{3{,}14\cdot Dn}. \quad (18)$$

Получаемая в результате вычисления длина отсека сравнивалась с задаваемой в исходных данных длиной, и если расхождение превышало 10%, то вычисления повторяли.

Интересным представляется исследование изменения температуры в энергетическом отсеке в режиме «зависания» АНПА. С этой целью в программу расчета вводится условие, когда скорость аппарата равна нулю. При этом электрическая мощность электрохимического генератора расходуется на обслуживание приборного отсека и подруливающих устройств вертикальных винтов. Основной движительно-рулевой комплекс, обеспечивающий горизонтальное движение АНПА, не работает. Графически результаты расчета температуры в энергетическом отсеке в режиме «зависания» в зависимости от температуры забортной воды представлены на рис. 8.

Из рассмотрения представленного графика следует, что при температуре забортной воды +32 °С температура воздуха в энергетическом отсеке составила +80 °С. Эта величина температуры воздуха отсека приближается к температуре рабочей поверхности батареи топливных элементов, составляющей +85 °С, что ухудшает режим ее охлаждения. По этой причине длительное нахождение аппарата в забортной воде со столь высокой температурой в режиме «зависания» может привести к перегреву БТЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований можно сделать вывод о создании достаточно точной математической модели определения параметров ЭХГ в составе энергоустановки АНПА. Расчетная программа позволяет для любой задаваемой скорости движения аппарата методом последовательных приближений определять реальную скорость АНПА БД с заданными габаритами энергетического отсека. Проведенный расчет АНПА в режиме «зависания» позволил определить температуру воздуха в энергетическом отсеке, где размещена БТЭ. Значение этой температуры даже при нулевой температуре забортной воды составило +73,5 °С, а при температуре забортной воды +32 °С, соответственно+80 °С. Поскольку температура поверхности БТЭ не должна превышать +85 °С, теплоотвод от ее поверхности будет слабым, что может привести к перегреву батареи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Апполонов Е. М., Бачурин А. А., Горохов А. И., Пономарев Л. О.* О возможности и необходимости создания сверхбольшого необитаемого подводного аппарата. Перспективные системы и задачи управления // Мат-лы XIII Всеросс. науч.-практ. конфер., Ростов-на-Дону, 2018, с. 34 – 41.
2. *Ченцов М. С., Соколов В. С., Прохоров Н. С.* Концепция установки получения водорода риформингом дизельного топлива в составе атмосферонезависимой энергетической установки с электрохимическими генераторами для неатомной подводной лодки. – Водородная энергетика и транспорт, 2006, с. 39 – 46.
3. Системный анализ и принятия решений. Технология вычислений в системе компьютерной математики Mathcad: Учеб. пособие/ *Холоднов В. А. ,Дьяконов В. П., Фонарь В. В., Кулишенко Р. Ю. , Ананченко И. В.* – СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2013. – 154 с.
4. *Сайданов В. О., Ландграф И. К., Савченко О. В.* Опыт разработок отечественных электрохимических энергетических установок и перспективы их применения на объектах Вооруженных сил Российской Федерации – СПб.: Изд-во КГНЦ, 2022. – 379 с.
5. *Дядик А. Н., Богданов Д.С., Ларионов М.В., Сурин С.Н.* Теоретические основы расчета энергетического баланса отсека с БТЭ энергоустановки АНПА-ПА/ Системы управления иобработки информации: науч.-техн. сб. / АО «Концерн «НПО «Аврора». СПб, 2022. Вып. 1 (56). С. 5 – 21.
6. *Войткунский Я. И.* Справочник по теории корабля. – Л.: Судостроение. 1985. – Т. 1.–764 с.
7. *Бакуменко Л. Г.,* Дядик *А. Н., Ларионов М. В., Сурин С. Н.* Интегрированный подход к энергообеспечению автономных необитаемых подводных аппаратов / Морской вестник. – 2020. – № 3 (75). – С. 91 – 94.
8. *Бухмиров В. В.* Расчет коэффициента теплоотдачи: Справ. – Т.6: Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения). Иваново: Ивановский ГЭУ, 2007. – 39 с.
9. *Кича М. А., Михайленко В. С., Маловик Д. С.* Зависимость концентрации насыщенных паров турбинного масла в воздухе корабельного помещения от температуры //Тр. Крыловского ГНЦ. – 2023. – № 1(403). – С. 107-115.
10. *Богданов Д.С., Дядик А.Н., Ларионов М.В., Сурин С.Н.* Теоретические основы расчета энергетического баланса отсека с БТЭ энергоустановки АНПА-ПА//Системы управления и обработки информации: Научн.-техн. сб. – СПб.: АО «Концерн «НПО «Аврора».– 2022. – Вып. 1 (56). – С. 15 – 21.
11. *Бакуменко Л.Г., Дядик А.Н., Сурин С.Н.* Отвод теплоты от батарей с топливными элементами в автономных необитаемых подводных аппаратах// Системы управления и обработки информации: Науч.-техн. сб. / АО «Концерн «НПО «Аврора».–2019.– Вып. 2(45).– С. 36–45. ■

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ КОРАБЛЕЙ БУДУЩЕГО

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

К. Г. Голубев, *д-р техн. наук, ген. директор,*
В. В. Барановский, *д-р техн. наук, проф., зам. ген. директора по энергетическим установкам, судовым системам и устройствам, АО «ЦМКБ «Алмаз»,*
К. А. Ефремов, *канд. техн. наук, преподаватель ВУНЦ ВМФ ВМА им. Н.Г. Кузнецова,*
контакт. тел. (812) 373 2899, office@almaz-kb.ru

Анализ опыта ведущих морских держав в области корабельного энергомашиностроения [1–3] свидетельствует о том, что, вопреки расхожему мнению о превосходстве корабельных газотурбинных двигателей (ГТД) по сравнению с тепловыми двигателями остальных типов, вот уже более чем два десятилетия наблюдается устойчивая тенденция минимизации ГТД в схемном исполнении энергетических установок (ЭУ) перспективных надводных кораблей. Второй тенденцией в развитии корабельной энергетики зарубежных многоцелевых кораблей является безальтернативность использования системы электродвижения, в особенности частичного, на поисковых режимах подводных лодок.

В облике корабельной энергетической установки (КЭУ) серийно строящихся зарубежных кораблей класса фрегат и других классов окончательно утвердилось схемное исполнение с одним ГТД большой мощности, работающим через межредукторную перекидку на обе линии вала, и двумя гребными электродвигателями, которые обеспечиваются электропитанием от двух или четырех дизель-генераторов. Подобное схемное исполнение КЭУ многоцелевых кораблей на сегодняшний день является «пиком» инновационного развития корабельной энергетики и используется за рубежом на серийно строящихся фрегатах, таких как фрегаты серии FREMM для ВМС Франции и Италии, пр. 26 для британских ВМС, серии F125 для ВМС Германии и серии PPA для ВМС Италии.

При обосновании облик ЭУ перспективных многоцелевых кораблей безальтернативность использования частичного электродвижения на поисковых режимах объясняется малошумностью и плавностью изменения хода корабля. Но минимизацию состава ГТД в структуре КЭУ объяснить гораздо сложнее в связи с различного рода сомнениями конструкторов по поводу структурной надежности и живучести КЭУ.

По поводу минимизации ГТД в составе КЭУ специалисты АО «ЦМКБ «Алмаз» исходят из следующих соображений: во-первых, значительная загроможденность пространства корабельных помещений воздухоприемными и газовыхлопными патрубками при использовании ГТД мешает размещению полезной нагрузки, в особенности на кораблях ограниченного водоизмещения. Загроможденность указанными патрубками в разы превышает объемы, занимаемые патрубками при использовании дизельных двигателей и даже паротурбинных установок.

Во-вторых, значительное ухудшение экономичности ГТД при работе на малых нагрузках. Так, например, на нагрузках менее 50% от номинальной экономичность ГТД стремительно снижается, а на нагрузке около 10% удельный расход топлива ГТД (г/(кВт·ч)) в пять раз превышает значение при работе двигателя на номинальной нагрузке.

В-третьих, нельзя не учитывать ресурсные ограничения ГТД при работе на больших нагрузках, т. е. на нагрузках с приемлемой экономичностью. Дело в том, что нагрузки, на которых ГТД работают с относительно высокой экономичностью, значительно ограничены ускоренным исчерпанием ресурса последних (рис. 1).

Так, например, при работе ГТД М90ФР на нагрузках в диапазоне от 80 до 100% от номинальной (16,0–20,0 МВт) при заявленном производителем ресурсе двигателя до капитального ремонта в 20 000 ч полное исчерпание ресурса произойдет всего через 350 ч (см. рис. 1) [4]. При работе ГТД на нагрузке в диапазоне от 70 до 80% от номинальной (14,0–16,0 МВт) ресурс полностью исчерпается через 1000 ч, а при работе с нагрузкой в диапазоне от 60 до 70% от номинальной (12,0–14,0 МВт) – через 10 000 ч [4].

Таким образом, заявленный ресурс до капитального ремонта в 20 000 ч обеспечивается на нагрузках менее 60% от номинальной, т. е. ≤ 12,0 МВт [4]. С учетом ограничений по ресурсу зона относительно благоприятной экономичности ГТД получается очень узкой – в диапазоне нагрузок 50–60% от номинальной (10,0–12,0 МВт) (на рис. 1 выделено желтым). Указанное обстоятельство делает практически невозможным обеспечить высокую дальность плавания корабля при использовании только лишь ГТД. Это также одна из основных причин принятия конструкторами решения по использованию дизель-электрической схемы передачи крутящего момента на винт на скоростях экономического хода.

Поэтому в соответствии с основными мировыми тенденциями в области корабельного энергомашиностроения, а также с учетом ограничений при использовании в составе КЭУ ГТД, указанных выше, в АО «ЦМКБ «Алмаз» при проектировании перспективного корвета морской зоны впервые в ВМФ России было внедрено схемное решение CODLOG (англ. COmbined Diesel-eLectric Or Gas turbine) с частичным электродвижением (рис. 2).

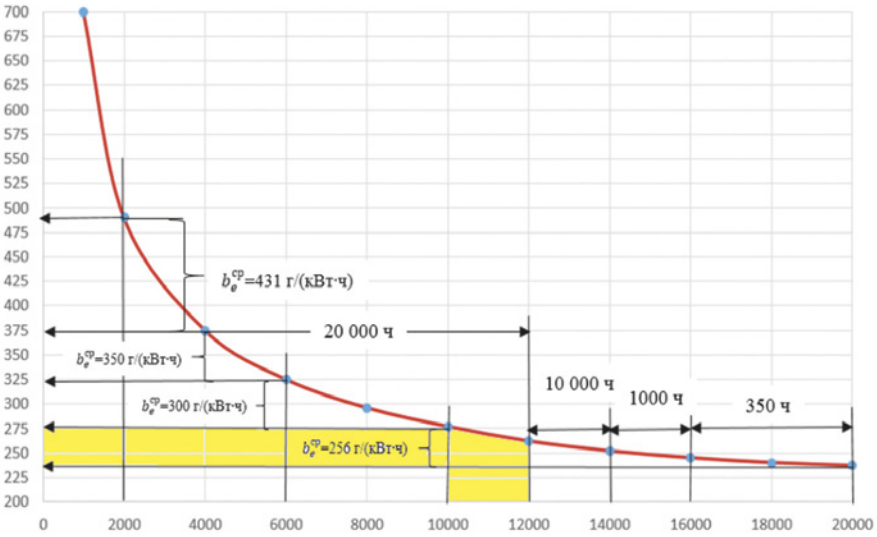


Рис. 1. ***Изменение удельного расхода топлива ГТД М90ФР в зависимости от нагрузки***

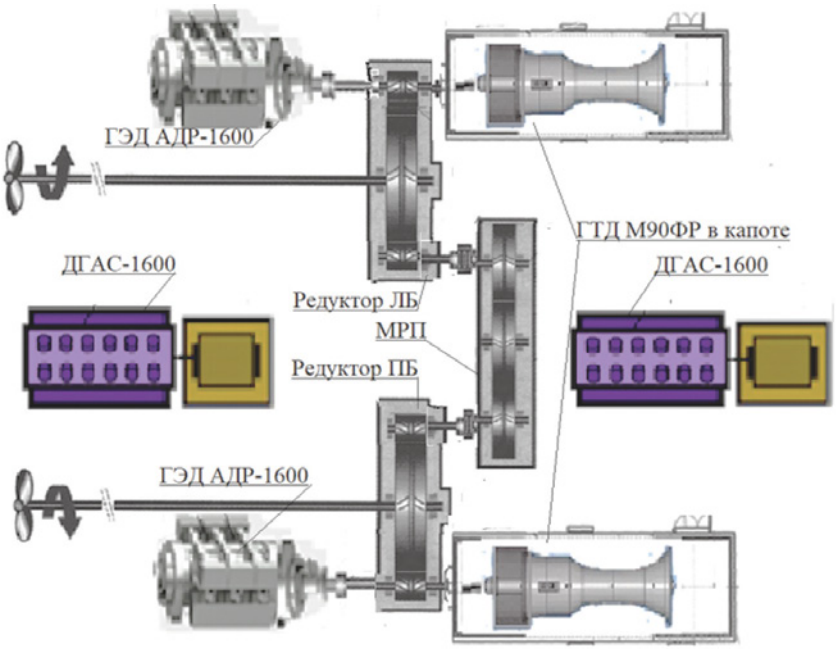


Рис. 2. ***Структурная схема энергетической установки корвета «Меркурий»***

Энергетическая установка включает (см. рис. 2) газотурбинный агрегат МАЗ с двумя ГТД М90ФР в капоте, работающими каждый на свой редуктор, и межредукторную перекидку, обеспечивающую работу любого одного ГТД на обе линии вала. К редукторам левого и правого бортов подключены гребные электродвигатели АДР-1600, обеспечивающие кораблю движение маршевыми ходами на скоростях хода до 14 уз. Электропитание ГЭД обеспечивается от двух дизель-генераторов ДГАС-1600, разработанных с использованием перспективного дизеля V16 ДМ185 производства Уральского дизель-моторного завода. В схеме ЭУ также предусмотрена возможность работы любого одного ГЭД на обе линии вала. Такое схемное решение КЭУ отличают высокая надежность и живучесть.

Применить схему с одним ГТД, работающим через МРП на обе линии вала, по аналогии с западными образцами, конструкторам не позволило отсутствие высокоэффективного ГТД большой мощности, аналогичного ГТД RR MT30 (мощностью 36 МВт) или GE LM2500 G4 (мощностью 35 МВт).

Полученные при разработке и создании ЭУ для головного корвета морской зоны компетенции и опыт, соответствующие передовым мировым аналогам в области корабельного энергомашиностроения, послужили специалистам АО «ЦМКБ «Алмаз» отправной точкой для проведения исследований по распространению передовых инновационных технологий присоздании ЭУ перспективных надводных кораблей основных классов.

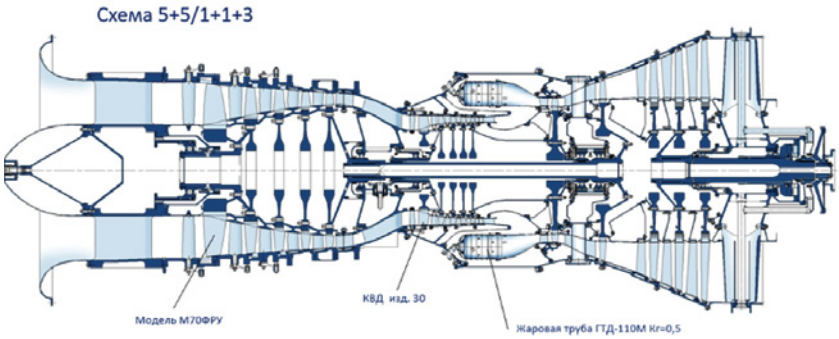


Рис. 3. ***Разрез перспективного корабельного ГТД 5-го поколения МГТД-35 (пр. ПАО «ОДК-Сатурн»)***

Таблица

Сравнительные характеристики корабельных ГТД

Характеристика	LM2500+	LM2500+G4	MT30	МГТД-35
Мощность, МВт	29,0	35,32	36,0	25...35
КПД на валу СТ (ISO),%	39	39,5	39,7	≥40
$\pi_к \pi_к \sum$	25...30	–	–	–
Температура газа перед 1-м сопловым аппаратом турбины, К	1500...1580	–	–	–

Так, в соответствии с поручением заместителя министра промышленности и торговли РФ О. Н. Рязанцева от 24.03.2021 г. №РО-45 в АО «ЦМКБ «Алмаз» были разработаны предложения с перечнем базовых и критических промышленных технологий для их внедрения в корабельную энергетику. Они переданы в Крыловский ГНЦ для внесения в федеральную целевую программу (ФЦП) на 2018–2027 гг., которая корректируется в рамках программы на 2024–2033 гг.

Суть инновационных предложений состоит в глубокой унификации основного оборудования ЭУ перспективных боевых кораблей, которые можно выразить следующей фразой: «Один газотурбинный двигатель и один агрегат для боевых надводных кораблей основных классов – от корвета до легкого авианосца».

Для реализации указанной концепции, во-первых, необходимо в рамках ФЦП запланировать мероприятия по разработке перспективного корабельного ГТД 5-го поколения большой мощности ($Ne \geq 35$ МВт), о готовности создания которого неоднократно заявляет ПАО «ОДК-Сатурн» (рис. 3) [5 –7].

Характеристики перспективного двигателя МГТД-35 представлены в таблице.

Из анализа характеристик следует, что МГТД-35 не будет уступать разработанным зарубежным аналогам по агрегатной мощности и по КПД. Масса перспективного двигателя без рамы и газоотвода должна составить ~ 6,4 т, что практически в два раза меньше массы базового ГТД М90ФР (~ 11,6 т).

Существенное снижение массы перспективного ГТД происходит за счет уменьшения числа ступеней КНД и КВД практически в два раза по сравнению с базовым двигателем М90ФР, а также числа ступеней силовой турбины (схема двигателя 5+5/1+1+3) при улучшении его теплофизических характеристик.

Габариты двигателя по сравнению с ГТД М90ФР также уменьшены: $L = 4040$ мм, $D_{вх} = 1054$ мм, $D_{кс} = 1947$ мм, $D_{ст} = 1676$ мм.

В рамках действующей ФЦП на 2018–2027 гг. на основе базового двигателя М90 ФР уже предусмотрена разработка форсированного по мощности на 25% ГТД М90ФРМ (мощностью 25 МВт), что, по мнению специалистов АО «ЦМКБ «Алмаз», также востребовано ВМФ. Наличие ГТД

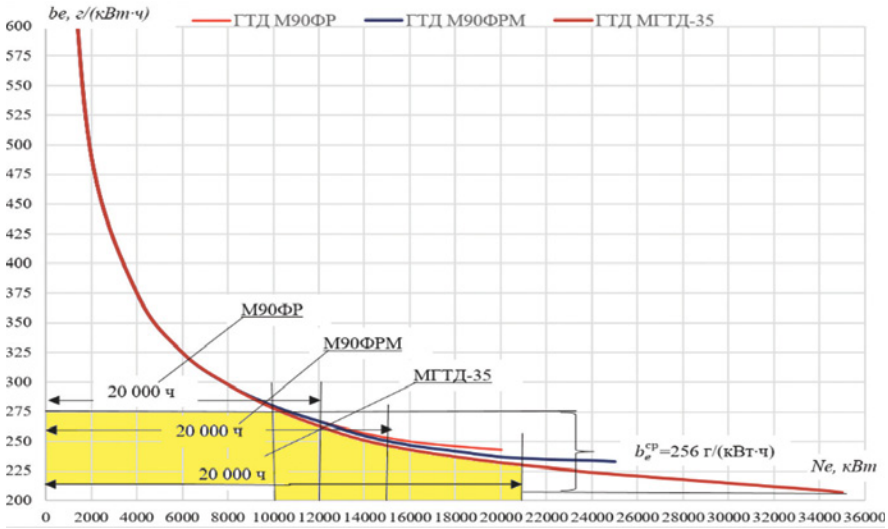


Рис. 4. ***Изменение удельного расхода топлива ГТД М90ФР, М90ФРМ и МГТД-35 в зависимости от нагрузки***

большой мощности позволит расширить диапазон работы ГТД с относительно высокой экономичностью без дальнейшего ускорения исчерпания ресурса (рис. 4).

Так, например, диапазон нагрузок относительно экономичной работы ГТД без ущерба для ускоренного исчерпания ресурса двигателя М90ФРМ составит 10,0–15,0 МВт, а у перспективного двигателя 5-го поколения МГТД-35–10,0–20,0 МВт. Это связано с тем, что диапазон нагрузок с ускоренным исчерпанием ресурса у ГТД большой агрегатной мощности М90ФРМ и МГТД-35 совпадает с диапазоном нагрузок ГТД М90ФР, т. е. ускоренное исчерпание ресурса начинается после набора мощности более 60% от номинальной [4–6].

Другой особенностью ГТД указанных типов является то, что удельный расход топлива на малых нагрузках у них практически совпадает, т. е., например, на нагрузке 10,0 МВт или меньшей все три двигателя будут работать практически с одинаковым удельным расходом топлива (см. рис. 4). Минимальный удельный расход топлива у каждого двигателя наблюдается на номинальной нагрузке, ограниченной ускоренным исчерпанием ресурса, соответственно у ГТД М90ФР – 0,236 г/(кВт·ч), у ГТД М90ФРМ ~ 0,227 г/(кВт·ч), а у ГТД МГТД-35 ~ 0,211 г/(кВт·ч) [5, 6].

Подобный способ расширения диапазона экономичной работы ГТД без ускоренного исчерпания ресурса реализуется на эсминцах ВМС США типа «Arleigh Burke» 3-й серии, где устанавливаются форсированные ГТД GE LM2500+ мощностью 29 МВт, с ограничением номинальной мощности до 24 МВт, которой достаточно для развития скорости полного хода кораблем.

Во-вторых, в рамках ФЦП на 2024–2033 гг. необходимо разработать унифицированный редукторный агрегат с дизель-электрической приставкой, сообразно последним тенденциям развития КЭУ, который без существенных изменений позволит использовать его в пропульсивных комплексах кораблей основных классов, таких как, например, корвет водоизмещением более 3000 т, фрегат водоизмещением до 8000 т, эскадренный миноносец водоизмещением 10 000–12 000 т и легкий авианосец водоизмещением до 70 000 т.

Для реализации указанной цели за основу может быть взят редуктор агрегата МАЗ перспективного корвета (см. рис. 2), колесо 2-й ступени которого диаметром немногим более 2,5 м, что позволяет размещать его в корпусе кораблей относительно небольшого водоизмещения (от 3000 т), передает крутящий момент от ГТД М90ФР с частотой вращения 3000–3500 об/мин и мощностью 20 МВт на винт. При этом частота вращения винта на полной скорости хода удовлетворяет условиям высокого КПД винта и условиям акустической скрытности корабля. Это означает, что редуктор перспективного корвета без существенных доработок можно унифицировать для использования в пропульсивных комплексах надводных кораблей широкого спектра классов с перспективными ГТД М90ФРМ и МГТД-35.

Так, например, наличие ГТД высокой агрегатной мощности и унифицированного редуктора с межредукторной перекидкой позволит их использовать в составе агрегата схемного исполнения CODLOG с одним ГТД МГТД-35, работающим на обе линии вала и двумя ГЭД (рис. 5).

Подобную схему можно применять на корветах водоизмещением более 3000 т и фрегатах водоизмещением до 7000 т. При этом скорость полного хода корвета составит порядка 30 уз, а фрегата – порядка 28–29 уз. Для обеспечения маршевых тихоходных режимов со скоростью до 16 уз включительно для корвета понадобится использовать два ГЭД мощностью ~ 2 × × 2,0 МВт, а для фрегата – два ГЭД мощностью ~ 2 × 4,0 МВт.

Аналогичное схемное решение пропульсивных установок используется на серийно строящихся европейских фрегатах типов: FREMM (Fregates Europeenne Multi-Mission) ВМС Франции и Италии, пр. 26 британских ВМС, F125 ВМС Германии и многоцелевого сторожевого корабля ближней морской зоны PPA (*Pattugliatori Polivalenti d'Altura*) ВМС Италии, сим-

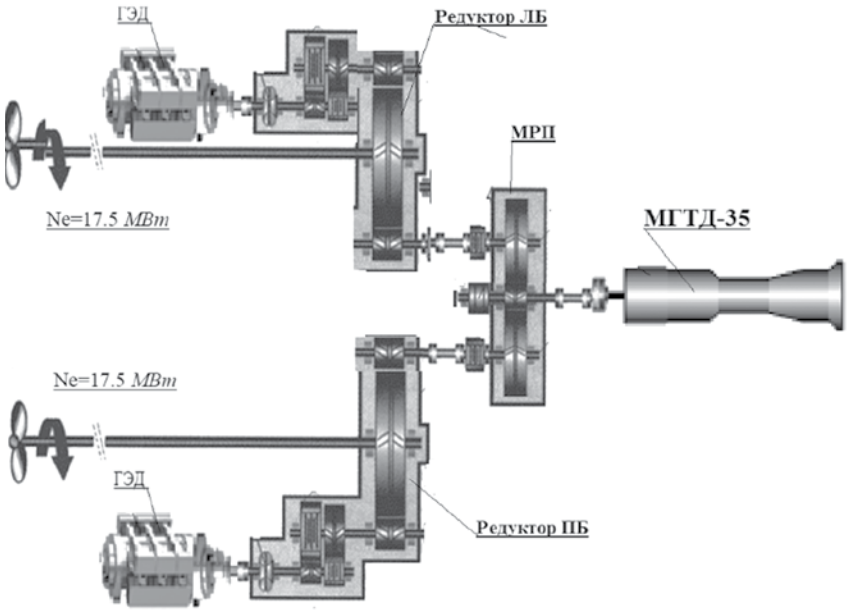


Рис. 5. ***Принципиальная схема агрегата с одним ГТД МГТД-35, работающим на обе линии вала и двумя ГЭД***

волизирующие собой пик эволюционного развития корабельной энергетики.

Для кораблей более крупного водоизмещения, таких как, например, фрегаты водоизмещением 8000–10 000 т или эскадренных миноносцев водоизмещением 10 000–12 000 т, может быть предложена схема с использованием унифицированного редуктора и МГТД-35, с одним ГЭД работающих на одну линию вала (рис. 6).

Использование двух таких агрегатов в составе пропульсивных комплексов кораблей позволит получить суммарную мощность на обеих линиях вала около 70,0 МВт, что обеспечит скорость полного хода фрегатам не менее 30 уз, а эсминцам – 28–29 уз.

С учетом того, что на колесо 2-й ступени редуктора передается большой крутящий момент, эквивалентный мощности 35,0 МВт, во избежание превышения предельной прочности зубчатого зацепления, возможно, придется незначительно доработать редуктор, разделив по мощности крутящий момент, передаваемый от МГТД-35, т. е. сделав две точки соприкосновения шестерен от ГТД с колесом 2-й ступени редуктора. Такая практика с раздвоением мощности, передаваемой от главного двигателя к редуктору, широко используется в отечественном корабельном машиностроении.

Для обеспечения тихоходных режимов экономической скоростью до 16 уз включительно для фрегата понадобится использовать два ГЭД мощностью ~2 × 4,0 ÷ 5,0 МВт, а для эсминца два ГЭД – мощностью ~ 2 × × 5,0 ÷ 6,0 МВт.

Для тяжелых надводных кораблей, таких как, например, эскадренный миноносец водоизмещением более 14 000 т или легкий авианосец водоизмещением до 70 000 т, может быть предложена схема с использованием унифицированного редуктора и двух МГТД-35, с одним ГЭД работающих на одну линию вала (рис. 7).

Использование двух таких агрегатов в составе пропульсивных комплексов кораблей позволит иметь суммарную мощность на обеих линиях вала порядка 140,0 МВт, что для авианосца обеспечит скорость полного хода не менее 28 уз, а для тяжелого эсминца такая мощность будет явно избыточной. Поэтому для такого корабля, по аналогии с эсминцами типа «Arleigh Burke» ВМС США, верхняя планка мощности МГТД-35 может быть ограничена до 25,0–30,0 МВт, что позволит кораблю развивать скорость полного хода более 30 уз, либо возможно использование в составе ЭУ форсированных ГТД М90ФРМ, создание которых заложено в действующей ФЦП на 2018 –2027 гг.

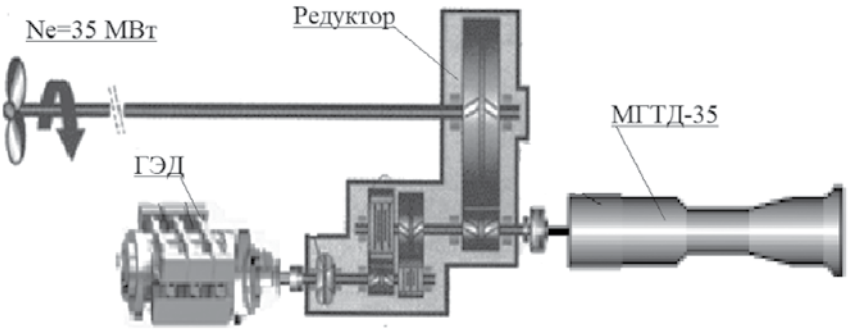


Рис. 6. ***Принципиальная схема агрегата с одним ГТД МГТД-35 и одним ГЭД, работающими на одну линию вала***

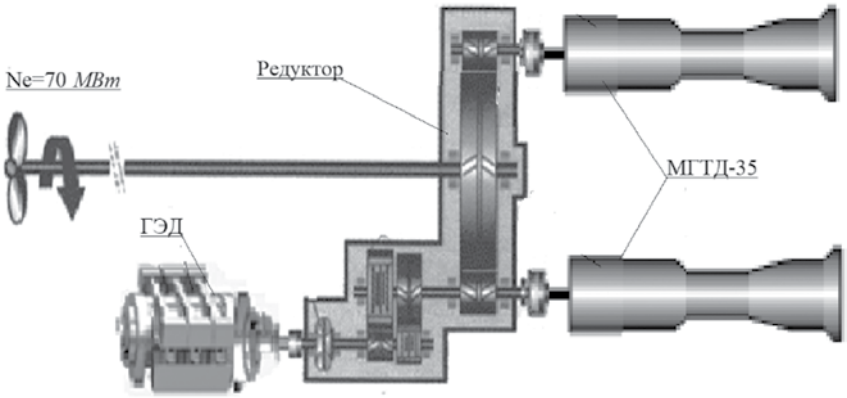


Рис. 7. ***Принципиальная схема агрегата с двумя ГТД МГТД-35 и одним ГЭД, работающими на одну линию вала***

Для обеспечения тихоходных режимов экономической скоростью до 16 уз включительно для тяжелого эсминца понадобится использовать два ГЭД мощностью ~ 2 × 6,0–7,0 МВт, а для легкого авианосца – два ГЭД мощностью ~ 2 × 8,0 МВт.

Применение указанных технологий позволит конструкторам переосмыслить взгляды, которые до недавнего времени можно было сформулировать, как «эксклюзивная (индивидуальная) КЭУ для кораблей каждого разного класса», и перейти к концепции «использование унифицированной ЭУ с одним типом ГТД и унифицированным редуктором для всех кораблей основных классов». Практическая реализация указанной концепции будет способствовать существенно, на длительное время уменьшить число проблемных вопросов, сократить материальные ресурсы и финансовые издержки, связанные с разработкой и созданием ЭУ перспективных кораблей основных классов.

Реализация концепции «один тип унифицированного ГТД и один унифицированный редуктор для кораблей основных классов» позволит приступить к глубокой унификации основного оборудования корабельных ЭУ боевых кораблей, что давно осуществлено в ВМС США, но на более глубоком и современном уровне – оснастив газотурбнный унифицированный агрегат дизель-электрической приставкой для передачи крутящего момента на винт на маршевых ходах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Захаров И. Г., Арефьев Я. Д., Воронович Н. А.* Научные проблемы корабельной энергетики. РАН. – Российская наука Военно-Морскому Флоту. – М., 1997, с. 210–254.
2. *Шинкоренко Д.* Перспективы развития энергетических установок надводных кораблей ВМС зарубежных стран//Зарубежное военное обозрение, 2007. – № 1. – С. 54–61; № 3. – С. 58–61.
3. *Шинкоренко Д.* Разработка новых энергетических установок за рубежом – шаг к кораблям нового поколения//Зарубежное военное обозрение. – 2010. – № 11. – С. 62–70.
4. Газотурбинный двигатель М90ФР. Технические условия. А91108201 ТУ.
5. *Чупин П. В.* Российский газотурбинный двигатель М90ФР. – Доклад на секции НТО им. А. Н. Крылова 21.03.2018 г. – СПб., 2018.
6. *Чупин П. В.* Результаты работы по импортозамещению украинских морских ГТД. – Докл. на межотраслевой науч.-практич. конфер. «ВОКОР–2018». – СПб., ВУНЦ ВМФ «НИИ КиВ», 2018.
7. ОДК формирует научно-технический задел для создания морских двигателей 5-го поколения. – Интернет ресурс: https://www.aviaport.ru/digest/2018/03/01/529125.html. ■

КИНГСТОНЫ ЦИСТЕРН ГЛАВНОГО БАЛЛАСТА СО ВСТРОЕННЫМ ПНЕВМОПРУЖИННЫМ ПРИВОДОМ

Д.Л. Аверьянов, *гл. конструктор специализации,*
А.В. Сихимбаев, *руководитель группы,*
АО «СПМБМ «Малахит»,
контакт. тел. +7 (921) 863 5504, +7 (905) 270 1515

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проекты подводных лодок (ПЛ), как правило, оборудованы системой погружения и всплытия (системой П и В) с пневмоуправляемой запорной арматурой цистерн главного балласта (ЦГБ) моноблочной конструкции [1].

Система погружения и всплытия в общем случае состоит:

- из клапанов вентиляции [2] – запорных, нормально закрытых, со встроенным приводом пневмомеханическим на открывание и пружинным на закрывание (рис. 1);
- кингстонов – трехпозиционных (открыто, закрыто и упор) или двухпозиционных (открыто и закрыто), нормально закрытых, со встроенным приводом пневмомеханическим на открывание (и постановки на упор), пружинным или пневмопружинным на закрывание (рис. 2);
- трубопроводов и арматуры пневмоуправления.

Кингстоны имеют разветвленные трубопроводы пневмоуправления большой протяженности вне основного корпуса. При эксплуатационных повреждениях и скрытых дефектах, приводящих к потере герметичности и разрыву трубопроводов, этот фактор может привести к обводнению трубопроводов, рабочих полостей пневмоприводов кингстонов и поступлению воды в помещение ПЛ (рис. 3).

В результате основным направлением совершенствования системы П и В является сокращение номенклатуры элементов системы и протяженности трубопроводов пневмоуправления арматурой цистерн главного балласта за счет упрощения конструкции кингстона.

Учитывая надежную работу клапанов вентиляции и кингстонов, целесообразно эксплуатировать цистерны главного балласта в подводном положении с закрытыми клапанами вентиляции и кингстонами, принимая во внимание, что уравнивание давления в цистернах главного балласта с забортным в допустимых пределах будет происходить за счет самооткрывания клапанов вентиляции или кингстонов. Это позволяет исключить трубопроводы и привод постановки на упор кингстона. Исключение трубопроводов закрывания кингстонов может быть выполнено за счет усиления пружинного привода закрывания.

При выборе конструкции кингстона двухпозиционного были рассмотрены конструкции в моноблочном исполнении, применяемые на ПЛ. Из эксплуатируемых в настоящее время кингстонов рассмотрена конструкция кингстона в моноблочном исполнении с гидроприводом на открывание и закрывание и гидропневматической пружиной, обеспечивающей самооткрывание (разгерметизацию) кингстона при превышении избыточного давления в цистерне (рис. 4).

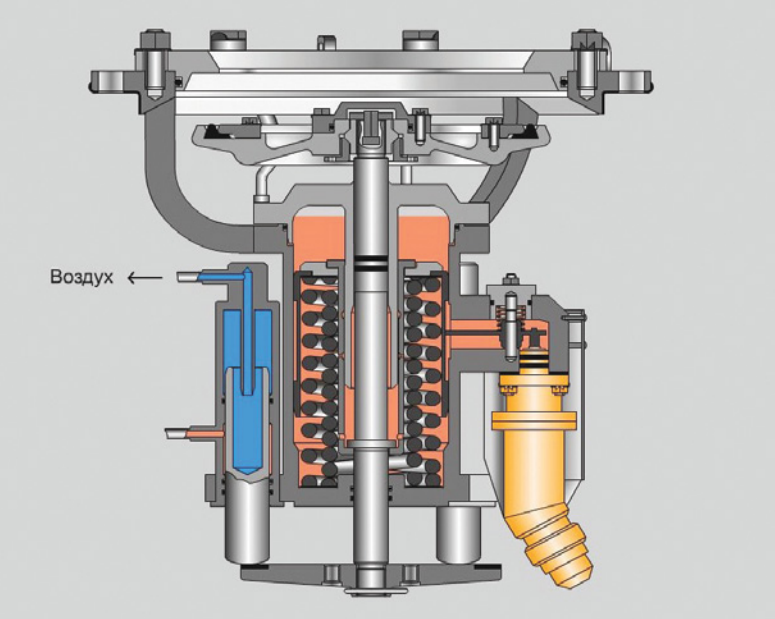


Рис. 1. ***Клапан вентиляции Ду300***

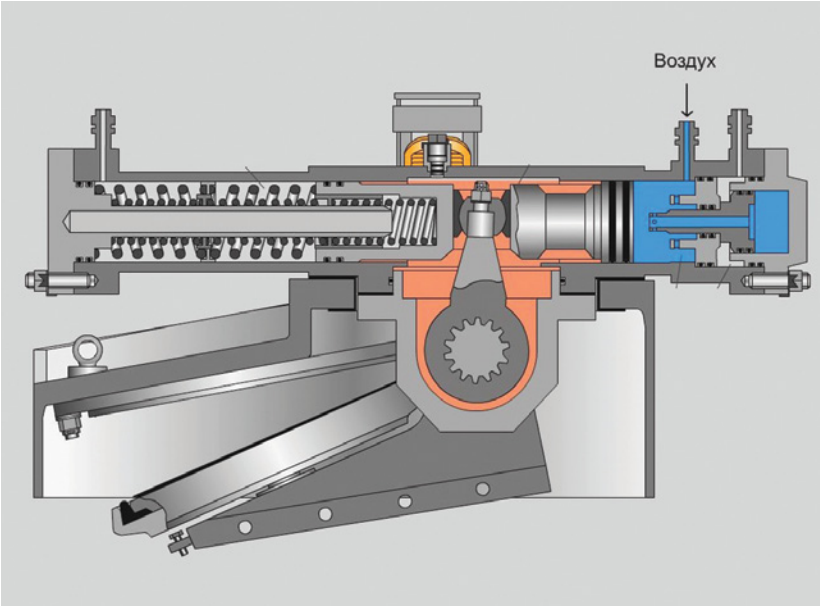


Рис. 2. ***Кингстон трехпозиционный ЦГБ Ду500***

В эксплуатационном режиме гидропружина удерживает захлопку кингстона в закрытом положении с определенным усилием поджима. Функцию гидропружины выполняет пневмогидроаккумулятор, в воздушной полости которого поддерживается постоянное расчетное давление воздуха. Открывание и закрывание кингстона производится посредством переключения гидроэлектроманипулятора (ГЭМ) и подачей рабочей среды (гидравлики) в соответствующие полости гидравлического цилиндра.

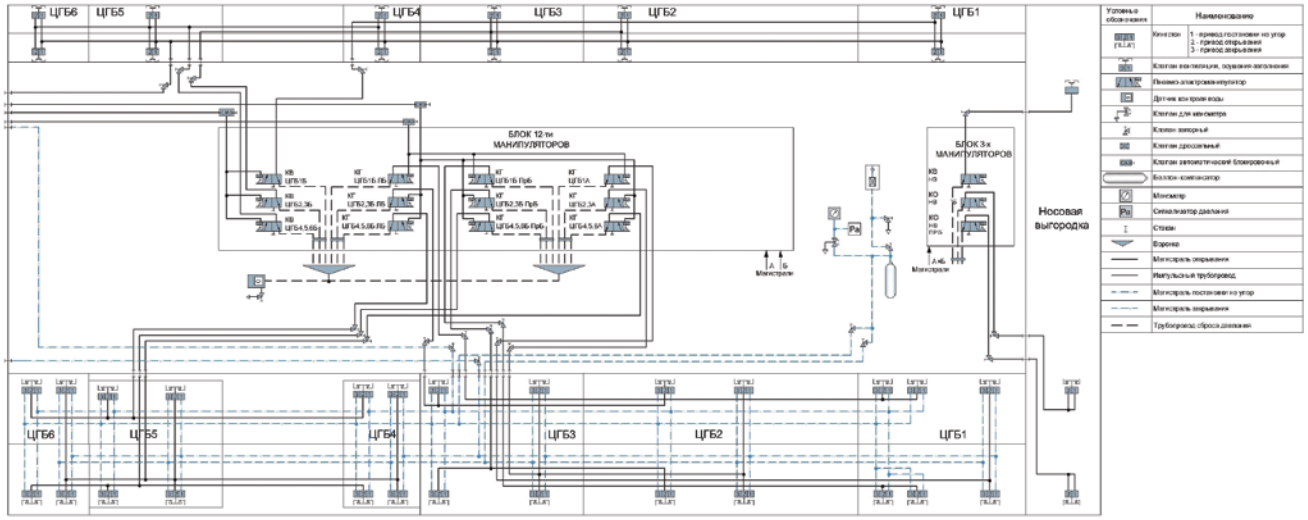


Рис. 3. ***Принципиальная схема трубопроводов системы П и В 1-го помещения ПЛ и смежные ЦГБ с применением кингстонов трехпозиционных***

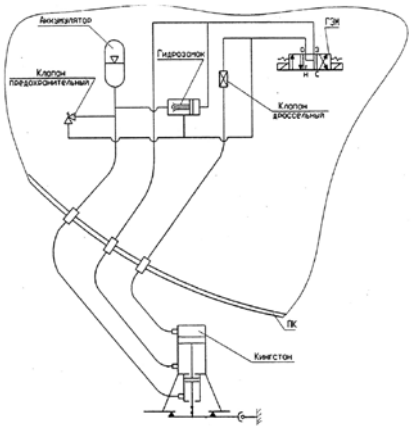


Рис. 4. ***Принципиальная схема гидроуправления кингстоном ЦГБ***

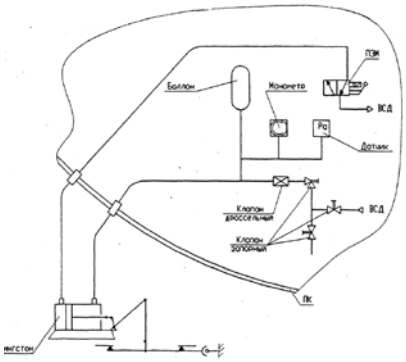


Рис. 5. ***Принципиальная схема пневмоуправления кингстоном ЦГБ***

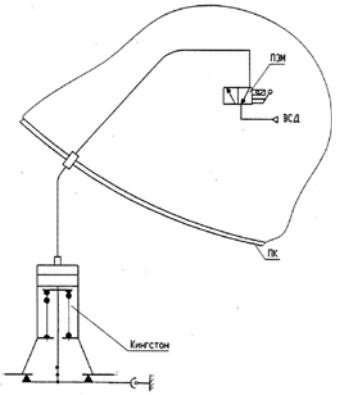


Рис. 7. ***Принципиальная схема пневмоуправления вновь разработанным кингстоном двухпозиционным ЦГБ***

Подобные конструкции предусматривают достаточно сложную систему управления и использование двух управляющих сред – воздуха и гидравлики.

Рассмотрена также конструкция пневмоуправлемого кингстона с двухполостным приводом. Управление кингстоном осуществляется от пневмоэлектроманипулятора (ПЭМ), подключенного к системе воздуха среднего давления (ВСД). Одна полость пневмопривода служит для открывания захлопки кингстона, другая – для закрывания и удержания ее в закрытом положении с определенным усилием поджатия. Для поддержания оптимального давления в полости пневмопривода на закрывание использован баллон со сжатым воздухом (рис. 5).

Системы управления кингстонов данной конструкции требуют разветвленных трубопроводов с большим количеством арматуры и контрольно-измерительных приборов (КИП), а также постоянного контроля со стороны личного состава.

Во вновь разработанном двухпозиционном кингстоне учтен опыт проектирования и эксплуатации однополостных пневмоприводов в двухпозиционных клапанах вентиляции проектов ПЛ третьего поколения [3], длительный опыт эксплуатации которых подтвердил правильность принятых конструктивных решений. Основным элементом в конструкции кингстона является однополостной пневмопружинный привод, который обеспечивает заданные технические и ресурсные показатели (рис. 6 и рис. 7).

При создании ПЛ четвертого поколения создан кингстон двухпозиционный новой конструкции, позволяющей существенно упростить и повысить надежность системы П и В за счет исключения трубопроводов пневмоуправления кингстонами на закрытие и упор и упрощения их конструкции, резкого уменьшения протяженности забортных трубопроводов пневмоуправления и сокращения количества забортных соеди-

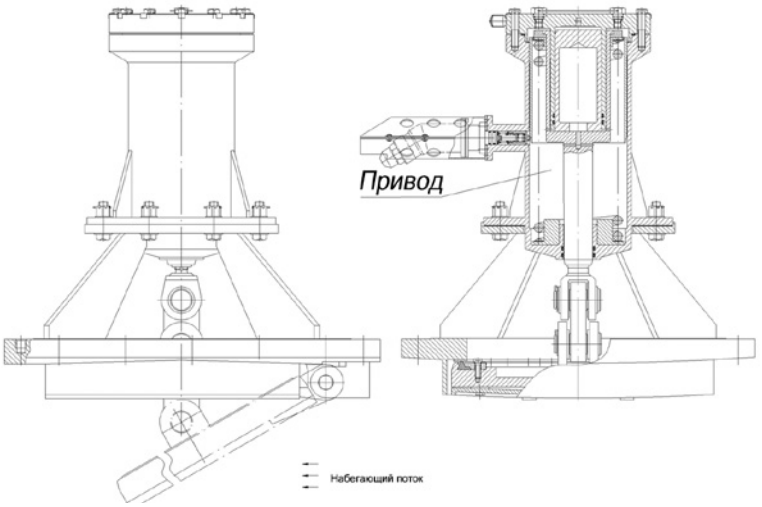


Рис. 6. ***Кингстон двухпозиционный Ду500, Ру0,17 МПа***

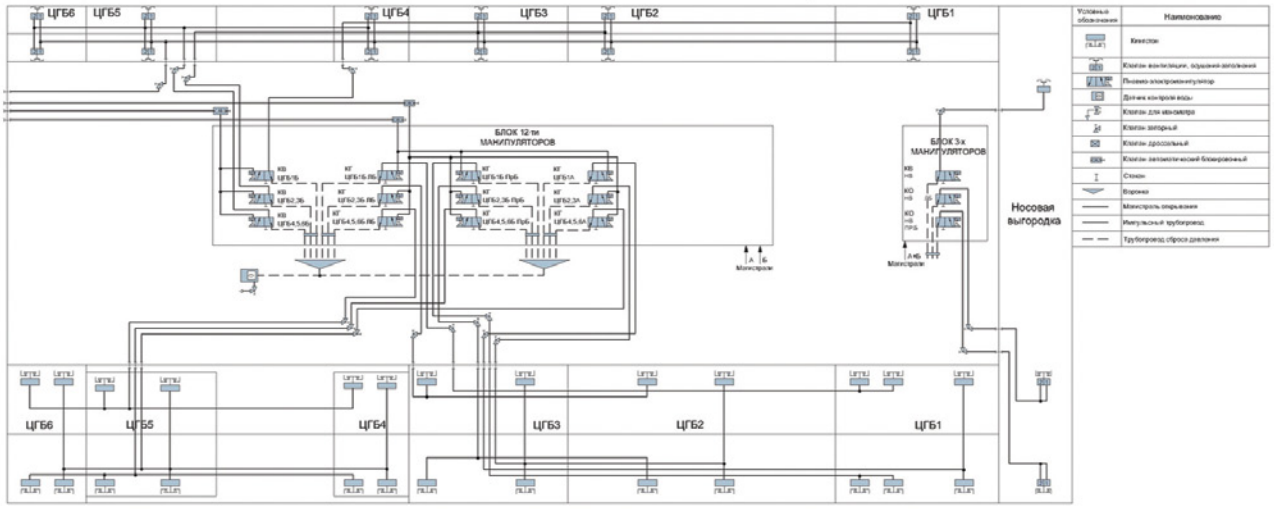


Рис. 8. ***Схема системы П и В 1-го помещения ПЛ и смежные ЦГБ с применением кингстонов двухпозиционных***

нений и стаканов на конструкциях прочного корпуса.

Применение такого кингстона позволяет сократить протяженность трубопроводов пневмоуправления примерно в три раза (рис. 8).

В состав кингстона двухпозиционного входят:

- запорный орган в виде тарелки с уплотнительным кольцом;
- силовой пневмомеханический привод, обеспечивающий принудительное открытие запорного органа от сжатого воздуха;
- пружинный привод, обеспечивающий закрытие запорного органа;
- сигнализатор положения запорного органа.

Все подвижные детали привода и сигнализатора, кроме выходного конца штока, для исключения воздействия на них внешней среды и смазки узлов трения помещены в герметичный корпус, внутренняя полость которого заполнена специальной смазывающей жидкостью.

К недостаткам прямошточных приводов следует отнести изменяемость нагрузки на шток привода в зависимости от давления окружающей среды, что, в свою очередь, сказывается на величине избыточного давления в ЦГБ, при котором происходит самооткрывание (разгерметизация) кингстона. В данной конструкции кингстона двухпозиционного величина самооткрывания колеблется от 0,02 МПа (0,2 кгс/см^2) при верхнем положении заказа до 0,12 МПа (1,2 кгс/см^2) при максимальном давлении окружающей среды.

Если принять во внимание простоту конструкции привода и системы управления, а также расчетную прочность ЦГБ, этот недостаток не является определяющим.

Предложенная конструкция также обеспечивает минимальные массогабаритные характеристики и использование покрытия такого же типа, какое имеется на наружном корпусе ПЛ.

Кингстон двухпозиционный разработан для строящихся заказов, успешно прошел все виды испытаний. АО «ПО «Севмаш» поставил их на производство и кингстон двухпозиционный включен в номенклатуру производства предприятия (рис. 9).

Рис. 9. ***Кингстон двухпозиционный ЦГБ***

В настоящее время АО «ПО «Севмаш» серийно изготавливает указанные кингстоны для строящихся заказов АО «СПМБМ «Малахит».

ВЫВОДЫ

Применение кингстона двухпозиционного Ду500 Ру0,17 МПа позволяет сокращать протяженность забортных участков трубопроводов пневмоуправления кингстонами цистерн главного балласта примерно на 60%, количество путевых соединений – примерно на 65%, сварных соединений – примерно на 50%, количество стаканов прочного корпуса – примерно на 10%.

Следует отметить, что при этом исключаются участки трубопроводов, которые обычно прокладывают в труднодоступных местах (цистерны главного балласта, забортные выгородки, проницаемые части межбортного пространства) в районе остаточной воды.

Кроме того, исключаются и узлы компенсационных объемов привода кингстона на закрывание (баллоны с управляющей арматурой и КИП), блок управляющих клапанов постановки кингстонов на упор.

ЛИТЕРАТУРА

1. РД5 Р.5175–83 Система погружения и всплытия. Правила и нормы проектирования.
2. ОСТ В5.5570–86 Клапан вентиляции со встроенным пневмоприводом. Технические условия.
3. Патент РФ 2248486 от 11.08.2003 г. Запорно-регулирующее устройство балластной цистерны/Бюлл. № 8, опубликовано 20.03.2005 г./*Однолетков Ю.Л., Захаров Ю.А., Аверьянов Д.Л., Булин С.Л., Бузаков А.С.*

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ УСТРОЙСТВА РОБАСТНОГО ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

***Р.Р. Хотский**, зам начальника 808 ВП МО РФ,*
***А.В. Бураков**, начальник ЦКБ АО «Компрессор»,*
контакт. тел. (812) 295 5090

ВВЕДЕНИЕ

АО «Компрессор» – единственный в стране разработчик и изготовитель специализированного компрессорного и газового оборудования для кораблей и судов всех типов и назначений, а также для многих других отраслей, в том числе:

- специальных компрессорных станций для нужд ВМФ;
- установок для очистки и глубокой осушки сжатого воздуха;
- холодильных установок;
- компрессоров пускового и рабочего воздуха для гражданских судов;
- специальной компрессорной техники для ракетных комплексов войск стратегического назначения и ПВО;
- комплексов компрессорного оборудования и систем для хранения, распределения газов для космодромов, обеспечивающих запуск ракет-носителей;
- компрессоров и компрессорного оборудования для энергетического комплекса и атомной энергетики;
- винтовых компрессорных установок для РЖД;
- компрессоров буферного газа для газовой промышленности;
- установок подготовки топливного, пускового и импульсного газа;
- приборов автоматического управления с приемкой ВП МО РФ;
- приборов измерения и контроля параметров сжатого воздуха.

География поставок: Россия, страны СНГ, Германия, Финляндия, Норвегия, Индия, Иран, КНР, Корея, Алжир, Ливия, ОАЭ, Куба и др.

В состав предприятия входят конструкторское бюро и производственная база для создания современного наукоемкого оборудования, а также развитая сеть представительств службы сервисного и гарантийного обслуживания для обеспечения полного жизненного цикла изделий.

В соответствии с Морской доктриной Российской Федерации [1] для судостроения приоритетными задачами являются внедрение передовых цифровых технологий, цифровых платформ на всех этапах жизненного цикла кораблей, судов и морской техники, формирование, разработка и внедрение комплекса приоритетных технологий, позволяющих создавать перспективные системы и образцы вооружения, военной и специальной техники, в том числе морские роботизированные комплексы различного назначения на базе искусственного интеллекта, нацеленные на опережающее развитие ВМФ и обеспечение конкурентоспособности отечественной военно-морской продукции.

Повышение уровня автоматизации судового оборудования (дизельные двигатели, компрессоры, холодильные установки и т.д.) приводит к необходимости широкого внедрения диагностических устройств в автоматизированном оборудования, данные диагностические комплексы необходимо разрабатывать и применять с учетом требований заказчиков, технической и экономической целесообразности.

Перед отечественной промышленностью стоят современные задачи, требующие разработки нового оборудования, однако на финансирование ОКР по модернизации судовых компрессоров для гражданского судостроения государством средства не выделяются, что вынуждает АО «Компрессор» внедрять новые технологии в рамках инициативных ОКР, за счет собственных средств разрабатывать, осваивать и модернизировать существующее оборудование.

Новые диагностические технологии целесообразно внедрять с учетом имеющегося научно-технического задела и с применением освоенных в серийном производстве изделий.

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИКИ

В 2017 г. в рамках выполнения ОКР (шифр «СКА») по государственному контракту № 16411.4432017.09.07 от 16 декабря 2016 г. с Минпромторгом России АО «Компрессор» была разработана станция компрессорная автоматизированная СКА60/200 (рис 1), отвечающая всем требованиям проектировщиков современных кораблей и судов как гражданского назначения, так и военных кораблей. Данная ОКР проводилась под контролем ВП Министерства обороны РФ по ГОСТ РВ 15.203–2001 [2] с целью модернизации элементов системы сжатого воздуха (ССВ) надводных кораблей различного класса. В рамках поставки для универсального десантного корабля-вертолетоносца (УДК) пр. 23900 по ГОСТ РВ 0015-301–2020 [3] проведены квалификационные испытания и постановка на производство. Широкий диапазон рабочих параметров давления и производительности, хорошие массогабаритные характеристики, позволяющие размещать все элементы на единой раме, обеспечение требований к ударостойкости позволяют рассматривать станцию как годную для применения в составе ССВ на перспективных подводных лодках.

Рис. 1. ***Станция компрессорная автоматизированная СКА 60/200***

Одна из приоритетных целей, которая стоит перед ВМФ, – это увеличение надежности эксплуатации кораблей и их технических устройств. Основными требованиями, предъявляемыми к системе сжатого воздуха (ССВ) как к общекорабельной системе (ОКС), является соответствие показателям надежности, а именно: ремонтопригодность, безотказность, долговечность, сохраняемость. Одним из способов увеличения надежности оборудования является разработка и внедрение инновационных методов и средств технического диагностирования (ТД). Согласно [4], внедрение систем диагностиро-

вания в различных отраслях народного хозяйства (морской флот, авиация, автомобилестроение, сельское хозяйство) приводит к значительному (на 20–40%) снижению расходов на текущий ремонт и техническое обслуживание и существенно повышает надежность техники при эксплуатации.

Вместе с тем анализ аварий и поломок элементов ССВ и потери работоспособности (журналы учета полученных рекламаций) предприятий АО «НПО «Компрессор» и АО «Компрессор» за период с 2017 по 2024 г., а также опыта проведения работ по государственным контрактам между АО «Компрессор» и Министерством обороны РФ по сервисному обслуживанию (агрегатной замене), техническому сопровождению эксплуатации, продлению назначенных показателей эксплуатации компрессоров подводных лодок, кораблей и судов ВМФ показывают, что вероятность возникновения отказа, потери работоспособности или неправильного функционирования очень велика.

Существенный недостаток известных методов диагностирования корабельных технических средств – отсутствие достоверных алгоритмов прогнозирования изменения их состояния. Принципиальная сложность в решении данной задачи заключается в том, что параметры, по которым оценивают состояние ССВ, являются случайными величинами. При попытке решить задачу аналитического прогнозирования характера их изменения проявляется проблема статистической неопределенности, возникающей из-за отсутствия информации о законе распределения этих параметров. Поэтому нужны новые подходы, основанные на соответствующих методах обработки и анализа измерительной информации, лишенных этого недостатка. Применительно к ССВ их нет.

УСТРОЙСТВО, РЕАЛИЗУЮЩЕЕ АЛГОРИТМ РОБАСТНОГО ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРИБОРАХ И СИСТЕМАХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

АО «Компрессор» разработаны и серийно выпускаются приборы автоматического управления, описанные в статье [5]. Наиболее подходящим с функциональный точки зрения прибором, в котором можно реализовать решение алгоритма робастного экспоненциального прогнозирования, является прибор управления станции компрессорной автоматизированной ПУ СКА60/200. Этот прибор размещается непосредственно на компрессорной станции (рис. 2), а также может устанавливаться в отдельном помещении.

Рис. 2. ***Прибор управления ПУ СКА60/200 на компрессорной станции***

Прибор управления ПУ СКА60/200 построен на базе программируемого логического контроллера (ПЛК), являющегося ядром системы автоматического управления, укомплектованным необходимым набором модулей ввода-вывода. ПЛК и представляет собой устройство, предназначенное для сбора, преобразования, алгоритмической обработки, хранения информации и формирования сигналов управления посредством выходных модулей. ПУ обеспечивает автоматическую работу компрессорной станции в различных режимах управления, постоянное наблюдение за контрольными точками по давлению (до 8 точек) [6], температуре в режиме реального времени, автоматическую остановку компрессора по сигналу «Стоп» на любом режиме управления, автоматическую разгрузку и продувку, остановку компрессорной станции, при выходе контролируемых параметров за допустимые пределы с индикацией вида неисправности и текстового сообщения.

Для вывода информации о работе компрессорной станции используется сенсорный панельный контроллер с цветным графическим дисплеем, либо сенсорный графический дисплей (рис. 3). Обмен сигналами с верхним уровнем осуществляется по высокоскоростному и помехоустойчивому последовательному интерфейсу передачи данных RS-485 в режиме реального времени.

Рис. 3. ***Дисплей прибора управления ПУ СКА60/200***

В основе устройства, реализующего алгоритм робастного экспоненциального прогнозирования, лежит применение робастного экспоненциального фильтра, имеющего устойчивость к аномальным сбоям, вывод которого описан в [5], а именно:

$$\hat{X}(t_k) = \hat{X}(t_{k-1}) + (1-\alpha)\psi\left[x(t_k) - X(t_{k-1})\right]. \quad (1)$$

Процедуры экспоненциального сглаживания в фильтре приводят к смещенным значениям прогноза в тех случаях, когда временной ряд имеет тенденцию к линейному изменению. Для этого случая требуются адаптивные модели на основе алгоритмов экспоненциального сглаживания. В основу таких прогнозирующих моделей закладывается уравнение

$$\overline{X}^{(\tau)}(t_k) = \hat{X}(t_k) + \tau\hat{b}(t_k), \quad (2)$$

где $\hat{X}(t_k)$, $\hat{b}(t_k)$ – текущие оценки коэффициентов адаптивного полинома первого порядка; $\overline{X}^{(\tau)}(t_k)$ – прогноз, рассчитанный на τ шагов.

В этом случае рекомендуется использовать модель Брауна–Хольта. Для них так же, как и для моделей экспоненциального сглаживания, актуальна робастификация алгоритмов фильтра.

Выражение для оптимальной робастной оценки прогноза получается при минимизации

$$\sum_{j=0}^{\infty} \rho\left[x(t_{k-j}) - \hat{X} - \tau\hat{b}j\right]\alpha^j = \min. \quad (3)$$

После дифференцирования по $\overline{X}$

$$\sum_{j=0}^{\infty} \psi\left[x(t_{k-j}) - \hat{X} - \tau\hat{b}j\right]\alpha^j = 1. \quad (4)$$

Система (4) – нелинейная. Ее решение требует выделения линейных по $\hat{X}$ и $\hat{b}$ компонент. Линеаризация осуществляется разложением левой части в окрестностях на-

чального приближения $\hat{X}_0$ при фиксированном значении $\hat{b}$ и разложением в окрестности начального приближения $\hat{b}_0$ при фиксированном значении $\hat{X}$ в соответствующие ряды Тейлора.

Для первых двух членов разложения в окрестности точки уравнение имеет вид

$$\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-\hat{X}-\tau\hat{b}j\right]\alpha^j=\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-x_0-\tau\hat{b}j\right]\alpha^j-$$
$$-\sum_{j=0}^{\infty}\psi'\left[x\left(t_{k-j}\right)-\hat{X}-\tau\hat{b}j\right]\alpha^j\left(\hat{X}-x_0\right). \quad (5)$$

Тогда оценка $\hat{X}$ будет иметь вид

$$\hat{X}=x_0+\frac{\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-x_0-\tau\hat{b}j\right]\alpha^j}{\sum_{j=0}^{\infty}\psi'\left[x\left(t_{k-j}\right)-x_0-\tau\hat{b}j\right]\alpha^j}. \quad (6)$$

Напомним, что выражение тренда (детерминированного либо гладкого случайного процесса) для одношаговой итерационной процедуры из [5] имело вид

$$\bar{X}=x_0+\frac{\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-\bar{X}_0-\tau\hat{b}j\right]\alpha^K}{\sum_{j=0}^{\infty}\psi'\left[x\left(t_{k-j}\right)-\bar{X}_0-\tau\hat{b}j\right]\alpha^K}. \quad (7)$$

Знаменатель второго слагаемого в выражении (6) аналогичен (7). Отличие заключается в том, что центрирование проводится не к постоянному уровню $\hat{X}$, а к линейноизменяющемуся значению $\hat{X}+\tau\hat{b}$. Таким образом, ряд $\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-x_0-\tau\hat{b}j\right]\alpha^j$ сводится к аналогичному пределу $j: j\in\left(0,\ \frac{1}{1-\alpha}\right)$.

Тогда уравнение для рекурентного прогноза запишется в виде

$$\hat{X}\left(t_k\right)=\hat{X}\left(t_{k-1}\right)+j\left(\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-\hat{X}_{k-1}-\tau\hat{b}j\right]\alpha^j\right)=$$
$$=\hat{X}\left(t_{k-1}\right)+j\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-\hat{X}_{k-1}\right]. \quad (8)$$

Для определения коэффициента $\hat{b}$ необходимо разложить выражение (4) в окрестностях начального приближения b_0 при фиксированном $\hat{X}$. Линейная часть разложения в ряд Тейлора имеет вид

$$\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-\hat{X}-\tau\hat{b}j\right]\alpha^j=\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-\hat{X}-\tau\hat{b}_0j\right]\alpha^j-$$
$$-\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-\hat{X}-\tau\hat{b}_0j\right]\alpha^j\tau j\left(\hat{b}-\hat{b}_0\right). \quad (9)$$

Соответствующее выражение для оценки $\hat{b}$ запишем как

$$\hat{b}=\hat{b}_0+\frac{\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-x_0-\tau\hat{b}_0j\right]\alpha^j}{\sum_{j=0}^{\infty}\psi'\left[x\left(t_{k-j}\right)-x_0-\tau\hat{b}_0j\right]\alpha^j\tau}. \quad (10)$$

Поскольку в знаменателе второго слагаемого выражения (10) функция

$$\psi'[x]=\begin{cases}0, & \text{если}\,|X|>c;\\ \text{const}, & \text{если}\,|X|\le c,\end{cases} \quad (11)$$

ряд $\sum_{j=0}^{\infty}\psi'[x]j\alpha^j\tau$ сходится к пределу ν. Верхняя граница для коэффициента ν равна

$$\tau\sum j\alpha^j=\frac{\tau-\alpha}{(1-\alpha)^2}.$$

Таким образом,

$$\nu\in\left(0,\ \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha\tau}\right).$$

Следовательно, рекурентная процедура для определения коэффициента $\hat{b}$ имеет вид

$$\hat{b}\left(t_k\right)=\hat{b}\left(t_{k-1}\right)+\nu\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-\hat{X}-\tau\hat{b}\left(t_{k-1}\right)j\right]\alpha^j. \quad (12)$$

Выделяя первый член суммы, можно записать

$$\hat{b}\left(t_k\right)=\hat{b}\left(t_{k-1}\right)+\nu\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-\hat{X}-\tau\hat{b}\left(t_{k-1}\right)j\right]+$$
$$+\nu\sum_{j=0}^{\infty}\psi\left[x\left(t_{k-j}\right)-\hat{X}-\tau\hat{b}\left(t_{k-1}\right)j\right]\alpha^j= \quad (13)$$
$$=\hat{b}\left(t_{k-1}\right)+\nu\psi\left[x\left(t_k\right)-\hat{X}\right].$$

Так как истинное значение $\hat{X}$ неизвестно, то при ее определении величина $\bar{X}$ заменяется оценкой $\hat{X}$ (6). Тогда рекурентное выражение для оценки одношагового прогноза $\bar{X}^{(1)}\left(t_k\right)$ будет иметь вид

$$\bar{X}^1\left(t_k\right)=\hat{X}\left(t_k\right)+\hat{b}\left(t_k\right)\tau=\hat{X}\left(t_k\right)+j\psi\left[x\left(t_k\right)-\hat{X}\left(t_k\right)\right]+$$
$$+\hat{b}\left(t_k\right)+\frac{\nu}{\tau\psi\left[x\left(t_k\right)-\hat{X}\left(t_k\right)\right]}=\hat{X}\left(t_k\right)+j\psi\left[x\left(t_k\right)-\hat{X}\left(t_k\right)\right]+ \quad (14)$$
$$+\hat{b}\left(t_k\right)+\frac{\nu}{\tau\beta\psi\left[x\left(t_k\right)-\hat{X}\left(t_k\right)\right]},\ \tau=1.$$

Поскольку робастный аналог ошибки прогнозирования на один шаг вперед

$$1\left(t_k\right)=\psi\left[x\left(t_k\right)-\hat{X}\left(t_k\right)-\hat{b}\left(t_k\right)\right], \quad (15)$$

окончательные соотношения для робастного варианта экстраполяционного фильтра Брауна – Хольта примут вид

$$\hat{X}\left(t_k\right)=\bar{X}^{(1)}\left(t_{k-1}\right)+b_l\left(t_k\right)=$$
$$=\bar{X}^{(1)}\left(t_{k-1}\right)+\beta\left[x\left(t_k\right)-x^{(1)}\left(t_k\right)\right], \quad (16)$$

где $\beta\in(0,1)$; $\bar{X}^{(1)}\left(t_k\right)$ – прогноз, сделанный в момент t_k на один шаг вперед.

Упрощенный вариант фильтра (16), в котором прогноз имеет вид

$$\bar{X}^{(1)}\left(t_k\right)=\hat{X}\left(t_k\right)-\alpha\hat{b}\left(t_k\right), \quad (17)$$

а коэффициент роста $\hat{b}\left(t_k\right)$ определяется как разность между оценками процесса на двух последних шагах

$$\hat{b}\left(t_k\right)=\frac{1}{\tau\left[\hat{X}\left(t_k\right)-\hat{X}\left(t_{k-\tau}\right)\right]},\ \tau-1. \quad (18)$$

При реализации алгоритмов построения прогноза необходимо придание описанным процедурам свойства адаптации параметра адаптации, т.е. изменения значения коэффициентов передачи α, β и j в зависимости от текущих свойств процесса (временного ряда).

Мерой неадекватности модели и реального процесса является эмпирическое выражение

$$AK\left(t_k\right)=\frac{\hat{E}\left(t_k\right)}{\tilde{E}\left(t_k\right)}=\frac{(1-\eta)\hat{E}\left(t_{k-1}\right)+\eta E\left(t_k\right)}{(1-E)\hat{E}\left(t_{k-1}\right)+\eta\left|E\left(t_k\right)\right|}, \quad (19)$$

где $\hat{E}\left(t_k\right)$ – сглаженное значение текущей ошибки; $\tilde{E}\left(t_k\right)$ – сглаженное значение модуля текущей ошибки; η – коэффициент дисконтирования.

Робастная конструкция этой процедуры получается заменой значения текущей ошибки $E\left(t_k\right)$ на ее робастный аналог $1\left(t_k\right)=\psi\left[E\left(t_k\right)\right]$. Тогда неадекватность спрогнозированного и реального процессов определяется робастной оценкой

$$AK^*\left(t_k\right)=\frac{\hat{l}\left(t_k\right)}{\tilde{l}\left(t_k\right)}. \quad (20)$$

Чтобы алгоритмы реагировали на расхождение прогнозов и фактических (без учета импульсных помех) данных временного ряда, необходимо изменять коэффициент передачи для придания большего веса последним данным и более быстрой адаптации модели к новым условиям функционирования объекта контроля. По мере адаптации необходимо уменьшение величины коэффициента передачи $\alpha\left(t_k\right)$ для более эффективной фильтрации шума. В этом случае при экспоненциальном сглаживании коэффициент передачи равен

$$\alpha\left(t_k\right)=\left|AK^*\left(t_k\right)\right|, \quad (21)$$

а для робастной модели Брауна – Хольта

$$\beta\left(t_k\right)=1-\left|AK^*\left(t_k\right)\right|. \quad (22)$$

Структурная схема устройства, реализующего алгоритм робастного экспоненциального прогнозирования (1), приведена на рис. 4.

Оно состоит из входного устройства (ВУ) 1, реализующего аналого-цифровое преобразование сигнала, регистра хранения оценки процесса (Pr1) 2, блока определения разности (БВ) 3, коммутатора и цифрового компаратора, которые реализуют блок ограничения (БОГР) 5, блока умножения (БУ) 6, сумматора (СУМ) 7, блока определения среднего отклонения

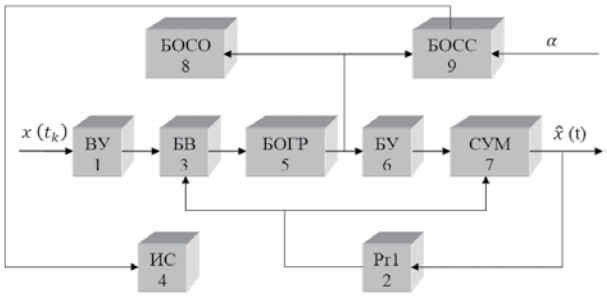


Рис. 4. ***Структурная схема устройства, реализующего алгоритм робастного экспоненциального прогнозирования***

(БОСО) 8, блока адаптивного определения степени сглаживания (БОСС) 9 и источника синхросигналов (ИС) 4. Блоки БОСО, БОСС представляют собой отдельные устройства, структурные схемы и процесс функционирования которых приведены ниже.

Процесс функционирования устройства состоит из одного цикла и начинается с приема и аналого-цифрового преобразования нового отсчета процесса $x(t_k)$ в блоке ВУ. Преобразованное в цифровую форму значение $x(t_k)$ поступает в блок вычисления разности БВ, где определяется разность между ним и сглаженным значениями процесса $\hat{x}(t_{k-1})$, полученным в предыдущем цикле работы. Значение $\hat{x}(t_{k-1})$ хранится в регистре Рг1. С выхода блока определения разности БВ рассчитанная здесь невязка (ошибка прогноза) $E(t_k)=x(t_k)-\hat{x}(t_{k-1})$ поступает в блок БОГР, который осуществляет преобразование в соответствии с функцией минимального контраста ψ [x].

Заменой блока, осуществляющего преобразование $\psi_н$[x] Хубера, на блоки, реализующие преобразование ψ_A[x] Эндрюса или усечение $\psi_т$[x], можно придать устройству различные свойства устойчивости (рис. 5).

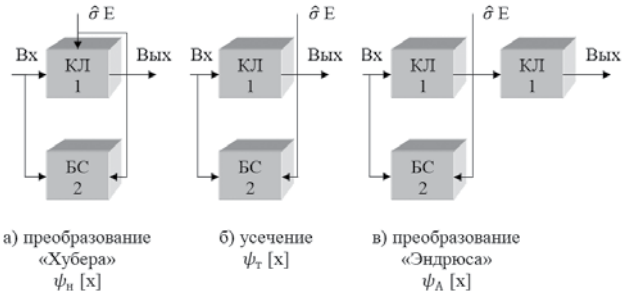


Рис. 5. ***Блоки преобразования***

Преобразованная разность $1(t_k)=\psi[E(t_k)]$ поступает одновременно на блок определения среднего отклонения БОСО, устройство определения степени сглаживания БОСС и блок умножения БУ. В БОСС определяется значение коэффициента передачи α_{ag}, которое перемножается с невязкой $l(t_k)$ в БУ, т.е. определяется та доля нового отсчета, которая необходима для формирования новой оценки процесса $\hat{x}(t_k)$. В сумматоре СУМ происходит сложение значения произведения $\alpha_{ag}\, l(t_k)$ со значением процесса, полученным на предыдущем шаге.

Оценка процесса $\hat{x}(t_k)$ поступает на выход устройства и Рг1, где запоминается по сигналу от ИС.

Если имеется априорная информация о дисперсии процесса и его динамике, то вместо устройств БОСО, БОСС с целью упрощения устройства можно подавать заданные априорные значения в блок БОГР и значение α_{ag} – на блок умножения. Структурная схема блока БОСО приведена на рис. 6.

Блок БОСО состоит из блока определения модуля невязки (БОМ), блоков (БВ1 и БВ2), счетчика (СТ), делителя (Дел) и регистра хранения оценки параметра масштаба (Рг1).

Процесс определения среднего отклонения $\hat{\sigma}_E$ начинается с определения модуля ошибки прогноза в блоке БОМ, с выхода которого сигнал поступает на вход блока вычитания

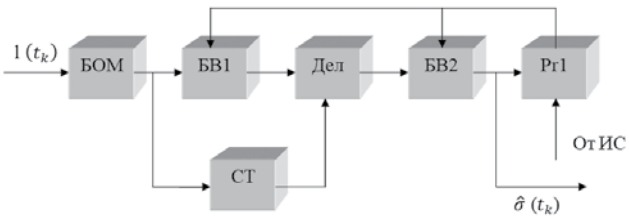


Рис. 6. ***Структурная схема блока определения среднего отклонения ошибок прогноза БОСО***

БВ1 и вход счетчика СТ. В блоке БВ1 происходит определение разности между модулем вновь полученной ошибки и оценкой среднего отклонения на предыдущем шаге $\hat{\sigma}(t_{k-1})-|E(t_k)|$ Эта разность поступает на делитель Дел., где происходит деление на порядковый номер невязки, определяемый счетчиком СТ. После переполнения счетчика осуществляются его перезапуск и повторный расчет среднего отклонения. Полученное значение $\dfrac{\hat{\sigma}(t_{k-1})-|E(t_k)|}{N}$ в блоке вычитания БВ2 корректирует значение среднего отклонения и поступает одновременно на выход блока БОСО и вход ячейки памяти куда записывается по переднему фронту импульса от ИС [7]. По заднему фронту этого же импульса вновь рассчитанное значение среднего отклонения $\hat{\sigma}(t_k)$ поступает на входы блоков БВ1 и БВ2, и процесс оценивания параметра $\hat{\sigma}_E$ начинается сначала.

Структурная схема блока определения степени сглаживания БОСС (блок адаптивного определения коэффициента передачи) в соответствии с выражением (19) приведена на рис. 7.

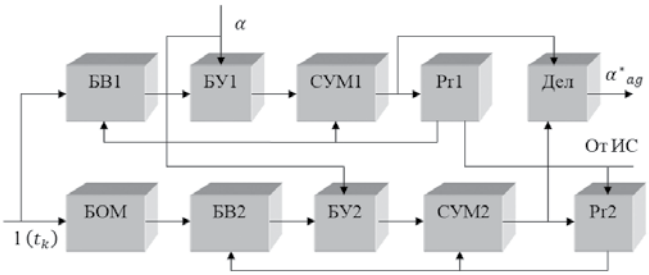


Рис. 7. ***Структурная схема блока определения степени сглаживания БОСС***

Применение данного блока уменьшает неопределенность в выборе коэффициента передачи, так как значение η имеет меньший разброс, чем значение α∈ [0,1]; а также улучшает адаптивные свойства устройства.

Блок состоит из следующих элементов: сумматоров СУМ1 и СУМ2, блоков вычисления разности БВ1, БВ2, блоков умножения БУ1, БУ2, блока определения модуля БОМ, регистров памяти Рг1, Рг2 и делителя Дел.

Цикл определения коэффициента передачи α^*_{ag} начинается с подачи на входы БВ1 и блока определения модуля БОМ, преобразованного в соответствии с функцией минимального контраста ψ[x] значения ошибки прогноза $l(t_k)$. Процессы прохождения сигнала по верхней и нижней цепи аналогичны, за исключением того, что в верхней цепи рассчитывается функция от самого значения ошибки, а в нижней цепи – от модуля этой ошибки.

Процесс функционирования нижней цепи следующий: сигнал с блока БОМ поступает на блок вычитания БВ2, где определяется разность между вновь поступившим значением невязки и сглаженным значением полученным ранее. Результат $\Delta(t_k)=1(t_k)-\tilde{l}(t_k)$ поступает с выхода блока вычитания на блок умножения БУ2. Здесь происходит умножение на коэффициент сглаживания ошибок η, и произведение подается на вход сумматора СУМ2. В сумматоре происходит сложение полученного произведения $\eta\Delta(t_k)$ со сглаженным значением невязки $\tilde{l}(t_k)$ хранящимся в регистре памяти Рг2. По перед-

нему фронту синхросигнала от ИС регистр Pr2 выдает хранимую информацию, а по заднему фронту записывает новую оценку ошибки прогноза.

Сигналы с выходов регистров памяти Pr2 и Pr1 поступают на делитель Дел., где определяется адаптивное значение коэффициента передачи α^*_{ag}. На этом цикл заканчивается.

Структурная схема устройства, реализующего экстраполяционное прогнозирование процесса, разработанного на основе робастифицированного фильтра (15), приведена на рис. 8.

Устройство состоит из входного устройства (ВУ) 1, регистров хранения оценок процесса (Pr1, Pr2, Pr3) 7, 9, 10, блока ограничения (БОГР) 4, реализованного по одной из схем, представленных на рис. 4.4, сумматоров (СУМ1 и СУМ2) 6, 12, блоков определения разности (БВ1, БВ2) 3, 8, блоков умножения (БУ1, БУ2) 5, 11, блока определения среднего отклонения (БОСО) 13, блока определения степени сглаживания (БОСС) 14, источника синхросигналов (ИС) 2.

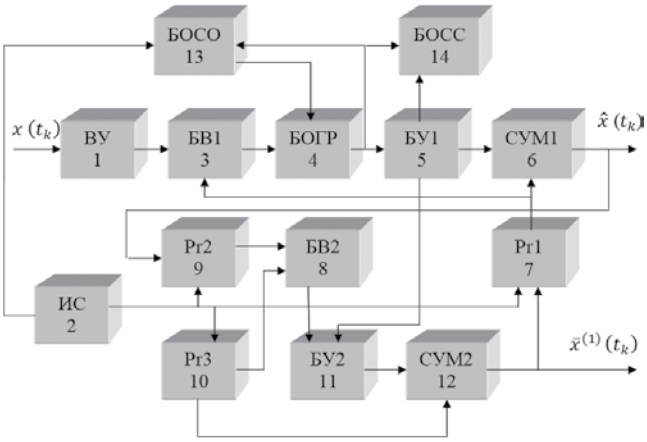


Рис. 8. ***Структурная схема устройства, реализующего экстраполяционное прогнозирование процесса***

Цикл работы начинается с получения от входного устройства ВУ текущего значения процесса в цифровой форме $x(t_k)$, которое поступает на блок определения разности БВ1. В блоке БВ1 происходит определение разности между вновь поступившим отсчетом и прогнозом по формуле (15) на предыдущем шаге: $E(t_k) = x(t_k) - \bar{x}^{(1)}(t_k)$ далее это значение поступает на блок преобразования сигнала БОГР в соответствии с выбранной функцией минимального контраста. С выхода блока БОГР преобразованное значение разности $1(t_k) = \psi[E(t_k)]$ поступает в блок адаптивного определения коэффициента передачи j_{ag} БОСС и блок умножения БУ1, где они перемножаются. Полученное произведение $j_{ag}1(t_k)$ поступает в сумматор СУМ1. Здесь происходит сложение прогноза $\bar{x}^{(1)}(t_{k-1})$, рассчитанного ранее, и значения $j_{ag}ag1(t_k)$. В результате выполнения этих операций на выходе сумматора СУМ1 получается сглаженное значение процесса $\hat{x}(t_k)$ в момент времени t_k.

На втором этапе цикла вычисления определяется прогноз процесс $\bar{x}^{(1)}(t_k)$ на шаг вперед. Для этого оценка процесса с выхода СУМ1 поступает на линейку регистров памяти Pr2 и Pr3, организованную по принципу стека. Выходы из этих регистров подключены ко входам блока вычитания БВ2, где вычисляется разность между оценками процесса, полученными на двух последних шагах $\Delta\hat{x}(t_k) = \hat{x}(t_k) - \hat{x}(t_{k-1})$. Эта разность поступает в блок умножения БУ2, где умножается на коэффициент сглаживания $j = 1 - \alpha$. С выхода блока умножения БУ2 и регистра памяти Pr2, данные передаются в сумматор СУМ2, где вычисляется значение прогноза на один шаг вперед $\bar{x}^{(1)}(t_k)$. Это значение по переднему фронту синхросигнала записывается в регистре Pr1, а по заднему фронту – выдается на входы сумматора СУМ1 и блока определения разности БВ1.

Таким образом в результате цикла работы устройства рассчитывается сглаженная оценка процесса на текущий момент времени $\hat{x}(t_k)$, которая хранится в регистре Pr2, и экстраполяционная оценка на один шаг вперед $\bar{x}^{(1)}(t_k)$, хранящаяся в регистре памяти Pr1.

Данные структурные схемы, их устройство и принцип действия также описаны в работе [8].

Выводы. Применение робастного экспоненциального прогнозирования позволяет получить прогноз состояния судового оборудования на несколько шагов вперед и расширить функционал систем управления путем широкого внедрения диагностических комплексов судовых поршневых компрессоров, обеспечивающих возможность планирования технического обслуживания и предупредительного ремонта до возникновения аварийных ситуаций и выхода из строя оборудования. Благодаря этому можно с применением цифровых технологий поддерживать исправное техническое состояние компрессорных установок на всех этапах жизненного цикла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение устройств для диагностических комплексов с применением робастных методов для компрессоров может быть реализован с применением отечественных существующих аппаратных средств (контроллеров, датчиков, исполнительных устройств), используемых в современных системах автоматизированного управления компрессорного оборудования, путем наращивания дополнительных модулей и разработки специализированного программного обеспечения. Это технически реализуемо и перспективно при условии поддержки отечественного производителя и закупки российского модернизированного компрессорного оборудования, оснащенного системами диагностики, при строительстве новых кораблей и судов, что соответствует целям и решение стратегических задач в области судостроения [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента Российской Федерации от 31.07.2022 г. № 512 «Об утверждении Морской доктрины Российской Федерации» – http://www.kremlin.ru/acts/bank/48215
2. ГОСТ РВ 15.203–2001. Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей.
3. ГОСТ РВ 0015–301–2020 Система разработки и постановки на производство военной техники. Постановка на производство изделий. Основные положения.
4. *Равин А. А.* Диагностическое обеспечение судового энергетического оборудования: проблемы и решения: специальность 05.08.05 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)». – Дисс. на соискание уч. степени доктора технических наук, 2016. – 436 с. – EDN CFMONC.
5. *Бураков А. В., Хотский Р. Р., Зуев П. Ю., Абрамов А. И.* Разработка систем управления, обеспечивающих диагностику с применением робастного метода для перспективных судовых поршневых компрессоров // Морской вестник. – 2024. – № 3(91). – С. 33–37.
6. Патент на полезную модель РФ № 182693, МПК F04B 27/00. Устройство для контроля давления в узлах поршневого многоступенчатого компрессора № 2018114499 / *Кузнецов Л.Г., Кузнецов Ю.Л., Бураков А.В., Гугнин Н.С., Ефремов А.А., Ксенафонтов Д.А., Абрамов А.И.* Заявл. 19.04.2018.Опубл. 28.08.2018 – EDN GRPRYW.
7. *Лукашин Ю.П.* Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования. –М.: Финансы и статистика, 1978, 215 с.
8. *Солонько В.А., Колесник В.А.,Третьяков А.В.* Аппаратурная реализация прогноза изменения состояния контролируемой системы на основе статистически устойчивых методов обработки информации, поступающей от контрольно-измерительного комплекса // Морской вестник. – 2012. – № 3(43). – С. 81–83. – EDN PBVNXL. ■

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОНДЕНСАТОРЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ CAE-ПАКЕТОВ

А. Е. Усов, *руководитель бюро расчетов,*
Г. С. Коленько, *канд. техн. наук,*
инженер-разработчик конструктивных решений,
ООО «Винета»,
контакт. тел. + 7 (906) 909 5936, + 7 (981) 746 3049

ВВЕДЕНИЕ

Водоохлаждаемые конденсаторы водяного пара – важнейшая и неотъемлемая часть любых стационарных и судовых энергетических паротурбинных установок. Конденсационная установка обеспечивает конденсацию пара, поступающего из последней ступени турбины, при давлениях, как правило, ниже барометрического, за счет чего достигается высокая термодинамическая эффективность цикла. Второй важной задачей конденсационной установки является отделение воздуха и неконденсируемых газов, которые снижают эффективность конденсации.

Проектирование конденсатора начинается с теплового расчета – по известной тепловой нагрузке и параметрам пара. Основная задача теплового расчета конденсатора – определение требуемой площади теплообменной поверхности.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Из-за большого числа влияющих факторов точный *аналитический расчет коэффициента теплоотдачи со стороны конденсирующегося пара имеет большую погрешность*. Это приводит к увеличению металлоемкости, габаритов и себестоимости изготавливаемых конденсаторов, к *переразмеренности теплообменного оборудования*. Если по стороне охлаждаемой воды определение коэффициентов теплоотдачи, а, соответственно, требуемой площади внутренней поверхности трубок, не составляет проблемы, существующие аналитические методики расчета имеют небольшую погрешность, порядка 5% [1, С. 26], то по стороне конденсирующегося пара аналитические методики расчета коэффициентов теплоотдачи имеют относительно большую погрешность, около 25% [1, С. 166].

Цель настоящей работы – верификация и дополнение аналитических методов путем создания расчетной сеточной модели и моделирование численными методами конденсации пара на теплообменных трубках технологического конденсатора ТК производства ООО «Винета».

На рис. 1 представлена геометрическая модель конденсатора ТК в разрезе.

МЕТОДЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Для расчета конденсаторов энергетических установок рекомендуются и используются отечественные отраслевые документы РТМ 24.031.05–72 [2] и РБ-040–09 [1].

Расчет коэффициента теплоотдачи по стороне пара и общего коэффициента теплопередачи ведется согласно РБ-040–09 [1].

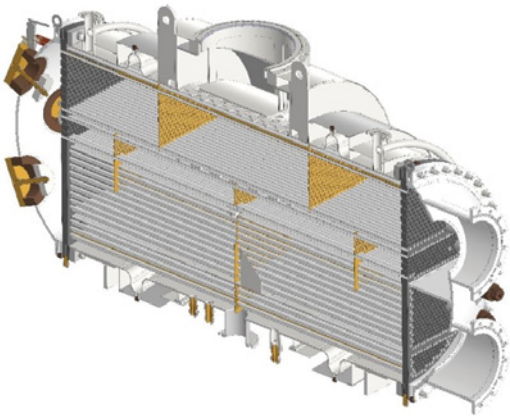


Рис. 1. ***Геометрическая модель конденсатора ТК производства ООО «Винета»***

Коэффициент теплоотдачи со стороны пара определится следующим образом:

– среднее по длине число Нуссельта при пленочной конденсации пара на первом ряду шахматных и коридорных поперечно обтекаемых пучков горизонтальных труб:

$$\mathrm{Nu}_1 = 25{,}7\left(\mathrm{Nu}_{\text{ПО}}\frac{d_{\text{Н}}}{L_{\text{v}}}\right)^{0,5} \times \left(\frac{\rho``_1 w``_1}{g\rho`_1 d_{\text{Н}}}\right)^{0,08} = 382{,}97;$$

– средний по длине и по высоте коэффициент теплоотдачи всего пучка при пленочной конденсации в поперечно-обтекаемом пучке горизонтальных труб, рис. 2.

$$\mathrm{Nu}_{\text{пл}} = \frac{\int_1^{m_{\text{ряд}}} \mathrm{Nu}_1 \frac{0{,}84\times(1-x_i)}{(1-x_i)\times n^{0,7}}dn}{m_{\text{ряд}}-1} = 91{,}4;$$

– коэффициент теплоотдачи по стороне конденсирующего пара:

$$\alpha_1 = \mathrm{Nu}_1\frac{\lambda`_1}{d_{\text{Н}}} = 3879\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}};$$

– коэффициент теплопередачи:

$$k_{\text{РБ конд}} = \frac{1}{\frac{d_{\text{Н}}}{\alpha_2 d_{\text{ВН}}} + \frac{d_{\text{Н}}}{2\lambda_{\text{СТ}}}\ln\left(\frac{d_{\text{Н}}}{d_{\text{ВН}}}\right) + r_1 + r_2 + \frac{1}{\alpha_1}} = 1819\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}};$$

– требуемая поверхность теплообмена для процесса конденсации пара:

$$F_{\text{треб1}} = \frac{Q_{\text{к}}}{k_{\text{конд}}\Delta t\text{к}_{\text{ср1}}} = 174{,}3\ \text{м}^2.$$

Можем отметить, что, несмотря на существенную погрешность аналитических методов, в данном конкретном расчете требуемой теплообменной поверхности конденсатора, различие между результатами аналитических расчетов по трем методикам, не превысило 5% (см. таблицу).

МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА

С целью косвенной верификации результатов аналитических расче-

Таблица 1

Результаты аналитического расчета требуемой поверхности теплообмена ТК

Методика	РТМ 24.031.05-72	РБ-040-09	HTRI
Требуемая площадь поверхности, м²	170,5	174,3	169,0

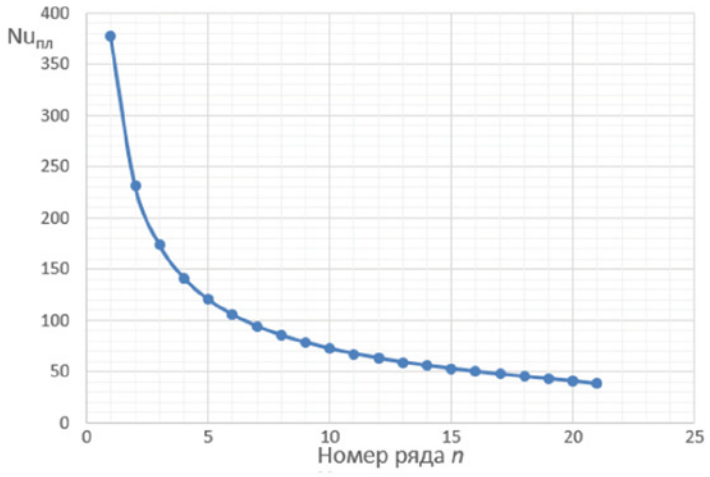


Рис. 2. ***Распределение числа Нуссельта по высоте пучка (по стороне пара)***

тов было решено выполнить численное моделирование конденсации пара на поверхности горизонтальных труб. Моделирование выполнялось при помощи CFD-пакета Ansys Fluent. При моделировании конденсации интересует геометрическое местонахождение границы фаз, поэтому был выбран метод Volume of Fluid в сочетании с моделью Lee и с применением пользовательских функций UDF для задания параметров конденсации [3].

При расчете конденсации пара на входной границе расчетной области была задана скорость $\omega_{\text{п}} = 1$ м/с и температура пара $T_{inlet} = 102$ °C, а на наружной стенке трубы – условие Дирихле – постоянная температура стенки T=25 °C.

В качестве расчетной области условно был взят прямоугольный элемент трубного пучка шириною $5s_1$, где s_1 = 21 мм – поперечный шаг трубок трубной решетки конденсатора. Диаметр трубок – 16 мм. Вид расчетной области представлен на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 4 представлена картина формирования конденсата на поверхности горизонтального трубного пучка. На входной границе расчетной области был задан сухой насыщенный водяной пар со степенью сухости $x = 1{,}0$.

Из представленного на рис. 5 векторного поля скорости потока через пучок можно видеть, что скорость сухого пара постепенно снижается по мере его конденсации. Однако плотность паровой фазы, температура насыщения сохраняются постоянными. То есть изменение скорости происходит за счет уменьшения массовой доли паровой фазы. Это косвенное подтверждение факта конденсации пара в численном расчете. Как и ожидалось, в объеме капель, формирующихся на нижней части трубок, скорость потока близка к нулю.

Величина коэффициента теплоотдачи от пара к стенке для первого ряда труб в пучке меняется незначительно в ходе нестационарного расчета, и составляет $\bar{\alpha}_1 = 1600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, в то время как величина коэффициента α_1, полученная для той же скорости потока по методике [1], составила около $2000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$. Различие численного и аналитического расчетов составило

$$\Delta\alpha_1 = \frac{\alpha_1 - \bar{\alpha}_1}{\alpha_1} \times 100\% = \frac{2000 - 1600}{2000} \times 100\% = 20\% .$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различие величин коэффициентов теплоотдачи от пара к трубкам при его конденсации на горизонтальном шахматном пучке труб при относительно низких скоростях пара (Re = 950, ω_1 = 1 м/с), полученных численным и аналитическим методом, составляет 20%.

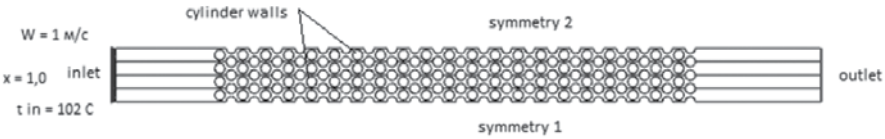


Рис. 3. ***Вид расчетной области – прямоугольного элемента пучка труб (моделирование в Ansys Fluent, повернуто на 90°)***

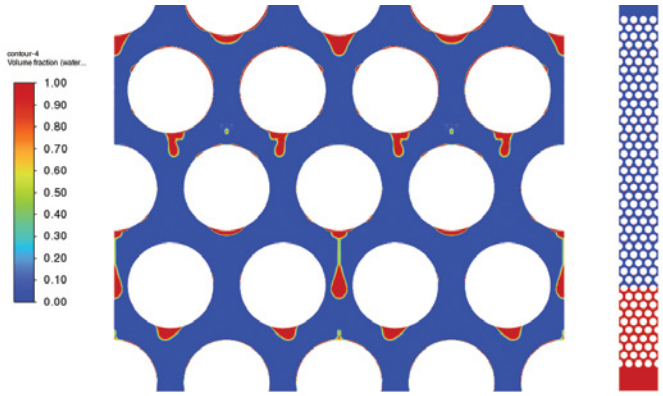


Рис. 4. ***Формирование и стекание пленки конденсата на поверхности трубок горизонтального шахматного трубного пучка (пакет Ansys Fluent, метод VOF)***

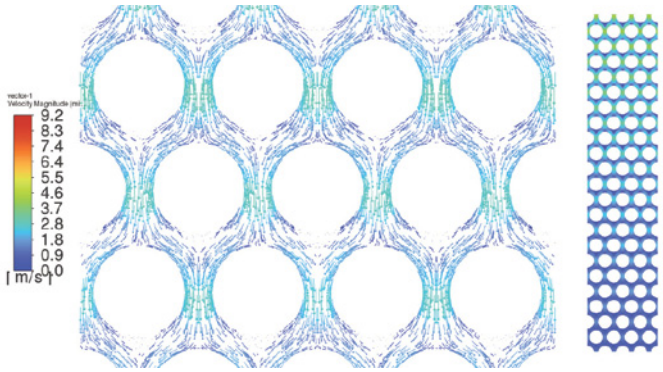


Рис. 5. ***Векторное поле скорости при конденсации на пучке труб (Fluent)***

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов водоохлаждаемых ядерных энергетических установок РБ-040–09.
2. Методика и зависимости для теоретического расчета теплообмена и гидравлического сопротивления теплообменного оборудования АЭС РТМ 24.031.05–72.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА СКРУЧИВАНИЯ СМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА ПОДЪЕМА

Н.А. Грибенюк, *инженер-конструктор 1-й категории,*
А.Н. Осин, *инженер-конструктор 1-й категории, ЗАО «ЦНИИ СМ»,*
контакт. тел. (812) 640 1051, sudmash@sudmash.ru

В том случае, когда необходимо опустить груз без его отклонения от исходного положения, стоит задача выбора такого сменного элемента спуска-подъема груза, который позволит выполнить это требование.

В рамках научно-исследовательской работы при помощи практического эксперимента определен такой тип сменного элемента подъема (далее – СЭП), который обеспечивает спуск и подъем груза без изменения его исходного положения.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ПРАКТИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью проведения практического эксперимента является разработка метода определения угла скручивания СЭП. Достижение поставленной цели предполагает:

- выполнение анализа вариантов, подходящих по техническим характеристикам сменных элементов подъема.
- разработку практической методики определения угла скручивания сменных элементов подъема.
- проведение эксперимента по определению угла скручивания различных вариантов сменного элемента подъема.

Личный вклад авторов в проведение практического эксперимента:

- выбор сменных элементов подъема для проведения испытаний;
- разработка методики проведения испытаний (эскиз схем испытательного стенда, ход проведения испытаний);
- участие в проведении испытаний, авторский надзор за соблюдением методики проведения испытаний;
- анализ результатов испытаний.

Выбор сменных элементов подъема

Основными критериями выбора типа СЭП являются:

- разрывное усилие;
- материал СЭП, обеспечивающий его заявленные технические характеристики при работе в воде;
- конструктивно СЭП должен быть выполнен так, чтобы его скручивание при травлении/выбирании груза было минимальным.

Исходя из вышеуказанных критериев, были выбраны три различных по конструктивному исполнению типа СЭП:

- канат синтетический;
- лента текстильная грузоподъемная;
- цепь грузовая пластинчатая.

В результате рассмотрения возможных вариантов СЭП были приобретены и испытаны на скручивание восемь макетных образцов СЭП (см. таблицу):

Описание практической методики определения угла скручивания сменных элементов подъема

Для проведения испытаний макетных образцов СЭП на скручивание была разработана рекомендуемая схема испытаний макетных образцов СЭП (рис. 1), в соответствии с которой был изготовлен испытательный стенд. Написаны программа и методика испытаний, следуя которой был испытан каждый макетный образец СЭП на скручиваемость и склонность к удлинению под нагрузкой, получаемой от нескольких испытательных грузов.

Таблица

Перечень испытанных макетных образцов СЭП

Наименование макета СЭП	Габаритные размеры СЭП	Обозначение материала СЭП
Ветвь канатная ВК	Диаметр ветви канатной–16 мм Длина ветви канатной–25 м	Канат полиэтиленовый высокопрочный пропитанный Ø16 мм ТУ 8121-071-00461221–2009
Ветвь канатная ВК	Диаметр ветви канатной–36 мм Длина ветви канатной–25 м	Канат полистиловый тросовой свивки трехпрядный (ПСТ) Ø 36 мм ТУ 8121-023- 00461221–2004
Ветвь канатная ВК	Диаметр ветви канатной–36 мм Длина ветви канатной–25 м	Канат полистиловый плетеный восьмипрядный (ПСПл 8) Ø 36 мм ТУ 8121-023- 00461221–2004
Строп текстильный ленточный СТП	Строп шириной 120 мм, длиной 25 м	Лента для строп шириной 120 мм ТУ 8151-072-00323691–2009
Строп текстильный ленточный СТП	Строп шириной 180 мм, длиной 25 м	Лента для строп шириной 180 мм ТУ 8151-072-00323691–2009
Строп текстильный ленточный СТП	Строп шириной 240 мм, длиной 25 м	Лента для строп шириной 240 мм ТУ 8151-072-00323691–2009
Цепь грузовая пластинчатая G250-6-60 ГОСТ 191–82	Цепь длиной 25 м	Материал звеньев цепи – по ГОСТ 1050–2013 Конструктивные требования к цепи – по ГОСТ 191-82

В соответствии с программой и методикой испытаний до начала их проведения был выполнен ряд подготовительных операций:

- наружный осмотр испытываемых СЭП на наличие видимых дефектов с проверкой паспортов (сертификатов) на них;
- наружный осмотр технологического оборудования, предназначенного для проведения испытаний, рассмотрение документов, подтверждающих готовность технологического оборудования к испытаниям;
- измерена длина каждого СЭП;
- каждый из макетных образцов СЭП был предварительно обтянут нагрузкой;
- измерена длина каждого СЭП после предварительной обтяжки;
- каждый СЭП (кроме цепи грузовой пластинчатой) выдерживался в воде не менее суток;

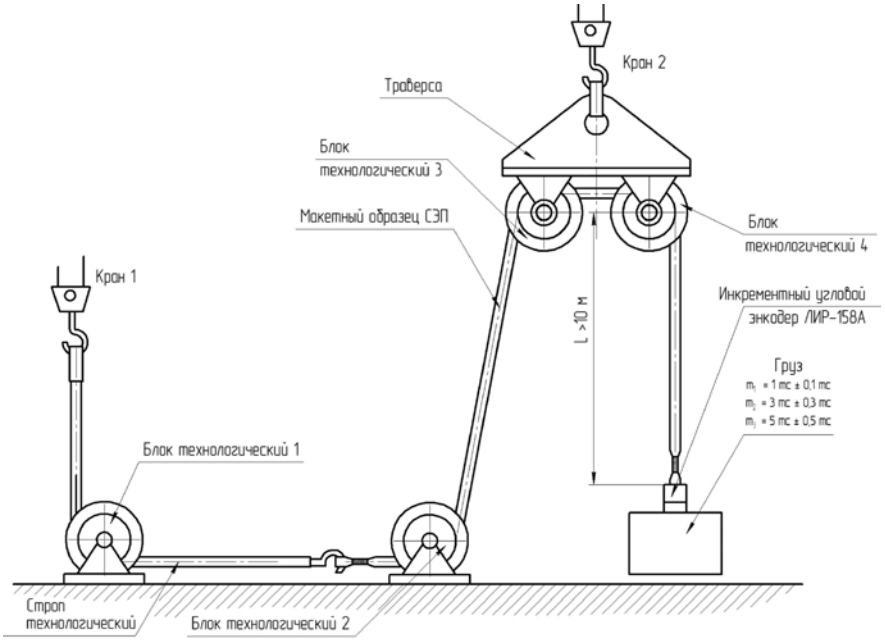


Рис. 1. ***Испытательный стенд. Эскиз***

– после выдерживания в воде измерена длина каждого СЭП.

В процессе испытаний были выполнены следующие операции:

– однократный замер длин макетных образцов СЭП до начала проведения испытаний грузами;
– испытания макетных образцов СЭП на скручиваемость с грузом весом (1±0,1) тс при выбирании груза;
– испытания макетных образцов СЭП на скручиваемость с грузом весом (1±0,1) тс при травлении груза;
– испытания макетных образцов СЭП на скручиваемость с грузом весом (3±0,3) тс при выбирании груза;
– испытания макетных образцов СЭП на скручиваемость с грузом весом (3±0,3) тс при травлении груза;
– испытания макетных образцов СЭП на скручиваемость с грузом весом (5 ±0,5) тс при выбирании груза;
– испытания макетных образцов СЭП на скручиваемость с грузом весом (5 ±0,5) тс при травлении груза;
– однократный замер длин макетных образцов СЭП после проведения испытаний всеми грузами.

Результаты испытаний на скручивание макетных образцов СЭП

Каждый макетный образец СЭП был испытан прилагаемой нагрузкой пять раз. Определение угла скручивания выполнялось с помощью датчика ЛИР-158А. Измерение угла скручивания осуществлялось в контрольных точках.

Скорость подъема/опускания макетных образцов СЭП была обеспечена скоростью крана мостового электрического (кран 2, рис. 1).

В результате проведения испытаний макетных образцов СЭП по вышеописанной методике были получены следующие результаты:

1) Ветвь канатная из материала «Канат полиэтиленовый высокопрочный пропитанный ∅ 16 мм ТУ 8121-071-00461221–2009» имела наибольшую склонность к скручиванию при нагрузке 1 т:

– до 426 град. при подъеме груза;
– до 74 град. при спуске груза.

Наименьшая склонность к скручиванию была достигнута при нагрузке на канат 5 тс:

– 0 град. при подъеме груза;
– 9 град. при спуске груза.

После вытяжки предварительной нагрузкой канат вытянулся на 1072 мм.

По окончании проведения испытаний канат, вымоченный в воде не менее суток, вытянулся на 390 мм.

2) Ветвь канатная из материала «Канат полистиловый тросовой свивки трехпрядный (ПСТ) ∅ 36 мм ТУ 8121-023-00461221–2004» показала нестабильные результаты определения угла скручивания, что говорит о непредсказуемом поведении такого типа СЭП при спуске/подъеме груза.

Значения углов скручивания как достигали нескольких оборотов груза вокруг оси каната, так и были околонулевые.

После вытяжки предварительной нагрузкой канат вытянулся на 1176 мм.

По окончании проведения испытаний под нагрузкой канат, вымоченный в воде не менее суток, вытянулся на 584 мм.

3) Ветвь канатная из материала «Канат полистиловый плетеный восьмипрядный (ПСПл 8) ∅ 36 мм ТУ 8121-023-00461221–2004» показала наибольшую склонность к скручиванию:

– 248 град. при подъеме груза под нагрузкой 5 тс;
– 95 град. при спуске груза под нагрузкой 1 тс.

Наименьшая склонность к скручиванию:

– 9 град. при подъеме груза под нагрузкой 3 тс;
– 0 град. при спуске груза под нагрузкой 5 тс;

После вытяжки предварительной нагрузкой канат вытянулся на 2176 мм.

По окончании проведения испытаний канат, вымоченный в воде не менее суток, вытянулся на 834 мм.

4) Строп текстильный ленточный СТП из материала «Лента для строп шириной 120 мм ТУ 8151-072-00323691–2009» показал наибольшую склонность к скручиванию:

– 15 град. при подъеме груза под нагрузкой 5 тс;
– 46 град. при спуске груза под нагрузкой 3 тс.

Наименьшая склонность к скручиванию:

– 0 град. при подъеме груза под нагрузкой 1 тс;
– 0 град. при спуске груза под нагрузкой 5 тс.

После вытяжки предварительной нагрузкой строп вытянулся на 386 мм.

По окончании проведения испытаний строп, вымоченный в воде не менее суток, вытянулся на 376 мм.

5) Строп текстильный ленточный СТП из материала «Лента для строп шириной 180 мм ТУ 8151-072-00323691-2009» показал наибольшую склонность к скручиванию:

– 14 град. при подъеме груза под нагрузкой 5 тс;
– 4 град. при спуске груза под нагрузкой 1 тс.

Наименьшая склонность к скручиванию:

– 0 град. при подъеме груза под нагрузкой 3 тс;
– 0 град. при подъеме груза под нагрузкой 5 тс.

После вытяжки предварительной нагрузкой строп вытянулся на 224 мм.

По окончании проведения испытаний строп, вымоченный в воде не менее суток, вытянулся на 202 мм.

6) Строп текстильный ленточный СТП из материала «Лента для строп шириной 240 мм ТУ 8151-072-00323691–2009» показал наибольшую склонность к скручиванию:

– 7 град. при подъеме груза под нагрузкой 3 тс;
– 101 град. при спуске груза под нагрузкой 5 тс – произошло складывание стропа в два слоя.

Наименьшая склонность к скручиванию:

– 0 град. при подъеме груза под нагрузкой 5 тс;
– 0 град. при спуске груза под нагрузкой 1 тс.

После вытяжки предварительной нагрузкой строп вытянулся на 76 мм.

По окончании проведения испытаний строп, вымоченный в воде не менее суток, вытянулся на 112 мм.

7) Цепь грузовая пластинчатая G250-6-60 ГОСТ 191–82 была испытана только при опускании грузов.

– наибольшая величина скручивания – 9 град. при нагрузке 3 тс.
– наименьшая величина скручивания – 0 град. при нагрузке 3 тс.

После вытяжки цепь вытянулась на 58 мм.

По окончании проведения испытаний цепь вытянулась на 86 мм.

Анализ экспериментальных данных

Проанализировав данные, полученные при испытании макетных образцов СЭП на скручивание, были сделаны следующие выводы:

1. Канаты показывают самый большой угол скручивания и величину удлинения.

2. Цепь пластинчатая грузовая показала хорошую сопротивляемость скручиванию – не более 6 град., небольшое удлинение в процессе вытяжки.

3. Стропы из текстильных лент показали лучшие результаты скручивания и не сильно вытянулись в процессе проведения испытаний.

ВЫВОДЫ

В процессе аналитического и практического исследования определен такой сменный элемент подъема, который:

– сохраняет свои исходные технические характеристик при работе под водой;
– обеспечивает опускание груза без его поворота вокруг оси сменного элемента подъема;
– позволяет благодаря своим техническим характеристикам выполнять свою задачу в изделии в полном объеме.

Строп шириной 180 мм показал при испытаниях наиболее стабильные показатели скручиваемости (все значения около 0 град.) и небольшое удлинение при вытяжке и испытаниях. ■

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВОГО И НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОГО РАСЧЕТОВ СУДОВЫХ ВОДО-ВОДЯНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

В.Р. Ефремов, *инженер-конструктор 3-й категории,*
А.А. Иванов, *инженер-конструктор 1-й категории,*
АО «СПМБМ «Малахит»,
контакт. тел. (812) 242 1504, +7 (900) 633 5985

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлен результат разработки программы проведения предварительных расчетов параметров судовых водо-водяных ядерных реакторов. Программа позволяет рассчитывать как наиболее часто используемые реакторы с водой под давлением (ВВРД), так и кипящие ядерные реакторы (ВВРК).

При разработке программы ставилась цель максимально сократить затраты времени расчета и ресурсы вычислительных машин при достаточной точности получаемых результатов. При этом разрабатывались:

- упрощенная методика теплового расчета параметров судовых ядерных реакторов;
- упрощенная методика нейтронно-физического расчета параметров судовых ядерных реакторов;
- интерфейс для ввода и вывода данных.

При использовании модели процессов для корректного расчета параметров следует учитывать ограничения на ввод исходных данных, обусловленные требованиями к конструкционным материалам и нахождением теплоносителя в активной зоне (АЗ) в однофазном состоянии:

- давление теплоносителя – от 1 до 22 МПа;
- температура теплоносителя – от 20 до 373 °С, что соответствует температуре критической точки воды при 22 МПа.

В настоящее время расчет энтальпии теплоносителя, теплового потока с поверхности твэла, запаса до кризиса теплоотдачи, коэффициента теплоотдачи и температуры оболочки твэла осуществляется по высоте АЗ в центральном канале без учета радиального распределения, в связи с чем полученные значения являются максимальными по сечению АЗ. Для остальных параметров рассчитываются средние значения по высоте канала. При этом тепловой поток рассчитывается во всем сечении АЗ с помощью коэффициента неравномерности поля энерговыделения по радиусу, который задается пользователем вручную. В дальнейшем это позволит рассчитать и привести усредненные значения параметров по всей АЗ.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

Программа предполагает последовательное проведение теплового и нейтронно-физического расчетов параметров судовых ядерных реакторов.

Задачей теплового расчета является определение теплотехнических и геометрических характеристик АЗ и ее элементов, а также параметров теплоносителя.

В начале работы пользователь задает тип реактора (ВВРД или ВВРК) и тип тепловыделяющих сборок (ТВС), материалы оболочек твэлов и кассет ТВС, а также вид используемого топлива. В программе учтены основные свойства конструкционных материалов, необходимые для расчета, такие как коэффициент теплопроводности, плотность, молекулярный вес и т.д.

После этого открывается возможность для перехода к заданию исходных данных для начала теплового расчета. В зависимости от их набора алгоритм расчета позволяет рассматривать семь различных задач. В окне ввода данных параметры, общие для всех вариантов расчета, расположены в правой части окна, в левой – специфичные для каждого варианта. Все варианты расчета и задания исходных данных приведены в табл. 1.

Алгоритм расчета был составлен на базе методических указаний [1–7].

При любых введенных исходных данных программа рассчитывает характеристики реакторной установки в трех ее состояниях:

- на момент начала кампании при холодной АЗ (T = 20 °С);
- на момент начала кампании при горячей АЗ (температура задаётся пользователем);
- на момент окончания кампании АЗ.

Особенности проводимого теплового расчета:

- рассчитывается запас до кризиса теплообмена по всей высоте АЗ;
- учитывается эффект поверхностного кипения теплоносителя по всей высоте АЗ.

Полученные в ходе теплового расчета значения используются в дальнейшем для проведения нейтронно-физического расчета, который начинается автоматически после теплового.

Допущения, принятые в ходе нейтронно-физического расчета:

- метод расчета двухгрупповой, при котором предполагается наличие в ядерном реакторе только быстрых и тепловых нейтронов;
- выполняется расчет гомогенизированной ячейки ядерного реактора, при котором топливо, теплоноситель и конструкционные материалы внутри АЗ перемешаны и находятся в одном агрегатном состоянии.

Особенности нейтронно-физического расчета:

- учтены эффекты отравления Xe^{135} и шлакования Sm^{149};
- если значение эффективного коэф-

Таблица 1

Варианты расчета и задания исходных данных

Номер варианта	Предельно допустимое выгорание топлива, г/см³	Средняя скорость теплоносителя на входе, м/с	Доля воды в ячейке АЗ	Отношение высоты АЗ к ее диаметру	Межкассетный зазор, мм	Зазор между твэлами, мм	Диаметр твэлов, мм	Число кассет в АЗ	Высота АЗ, мм
1	Дано	Дано	Дано	Дано	Искомая	Искомая	Искомая	Искомая	Искомая
2	Дано	Дано	Искомая	Дано	Дано	Искомая	Искомая	Искомая	Искомая
3	Дано	Дано	Искомая	Искомая	Дано	Дано	Дано	Искомая	Искомая
4	Дано	Искомая	Искомая	Дано	Дано	Дано	Дано	Искомая	Искомая
5	Дано	Искомая	Искомая	Искомая	Дано	Дано	Дано	Дано	Искомая
6	Дано	Дано	Искомая	Искомая	Дано	Искомая	Дано	Дано	Искомая
7	Искомая	Искомая	Искомая	Искомая	Дано	Дано	Дано	Дано	Дано

фициента размножения на конец компании меньше заранее установленного значения, расчет прерывается вследствие недостаточного запаса реактивности, и программа предлагает задать другие исходные данные.

После проведения расчета осуществляется вывод полученных результатов. Выводить данные можно как в отдельном окне, так и импортировать в файл Excel. При импорте в файл Excel автоматически строятся графики величин, рассчитываемых по высоте АЗ.

Ниже на рис. 1 приведено сравнение результатов расчета параметров с известными значениями [8] для транспортных ядерных реакторов КЛТ-40С, РИТМ-200, РИТМ-200Н и РИТМ-200С. В качестве исходных данных брались также известные значения для указанных ядерных реакторов (табл. 2).

По диаграммам видно, что результаты теплового расчета совпадают в пределах 9%, наибольшее отклонение получилось при расчете температуры оболочки твэлов. Наибольшее значение отклонения, полученное в результате нейтронно-физического расчета, составляет 30% для загрузки U^{235}.

Значительный вклад в общую погрешность расчета вносят несовершенство математической модели АЗ и указанные выше принятые допущения. В дальнейшем при доработке программы планируется повысить точность получаемых результатов.

Дополнительно построены графики запаса до кризиса теплообмена по высоте АЗ. Один из подобных графиков приведен на рис. 2, который качественно отражает известную зависимость для существующих ядерных реакторов.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В будущем рассматриваются следующие возможные пути усовершенствования расчетной модели и повышения ее точности:

1. Переход к шестигрупповому методу расчета, что потребует введения дополнительных данных по сечениям взаимодействия, соответствующих рассматриваемым энергиям нейтронов.

2. Переход к двухмерному расчету параметров с использованием метода Монте-Карло, включающих аксиальное и радиальное распределение величин.

В более далекой перспективе также можно реализовать:

- переход к расчету гетерогенной ячейки ядерного реактора;
- разработку полноценной математической модели судового ядерного реактора, включающую динамику его состояния;
- расчет параметров судовых ядерных реакторов на быстрых нейтронах.

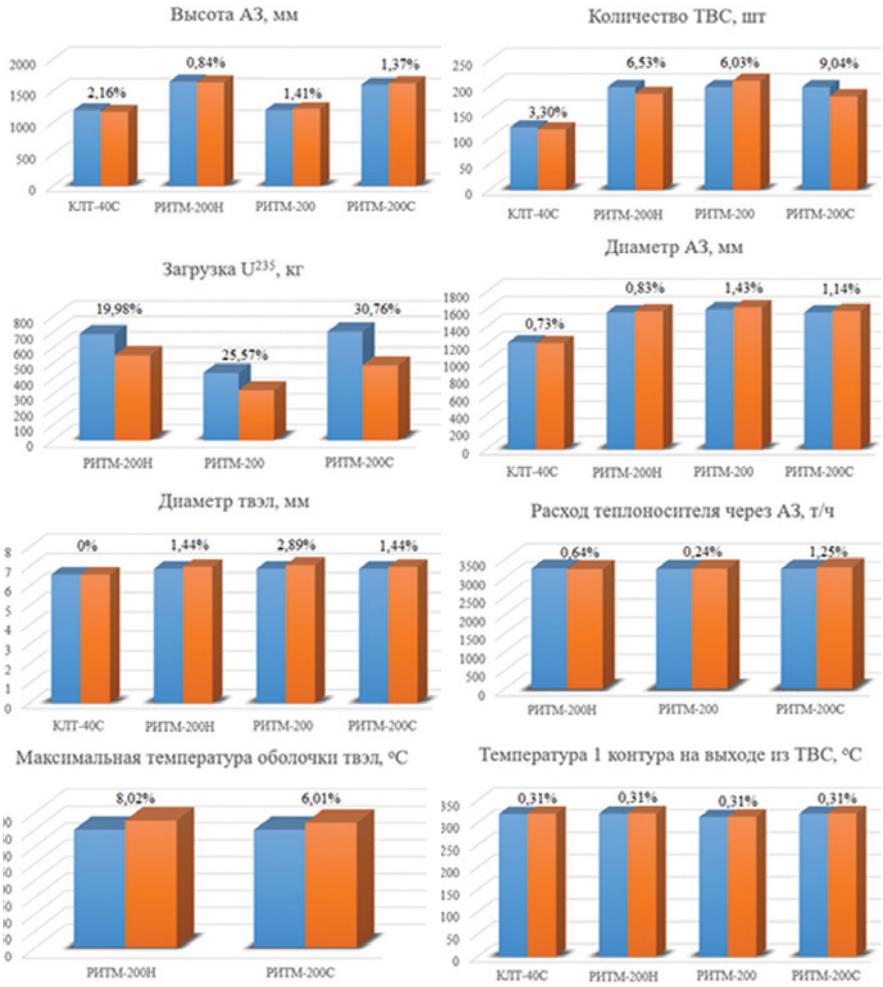


Рис. 1. ***Сравнение расчета параметров с данными по реакторам КЛТ-40С, РИТМ-200, РИТМ-200Н и РИТМ-200С***

– по данным, – по расчету

Таблица 2

Исходные данные для проведения сравнительного расчета

Установка	Тепловая мощность, МВт	Кампания, эфф.ч	Давление 1 контура, МПа	Температура 1 контура, °С
КЛТ-40С	150	14 000	12,7	280
РИТМ-200	175	26 000	15,7	277
РИТМ-200Н	190	42 100	15,7	283
РИТМ-200С	198	40 400	15,7	282

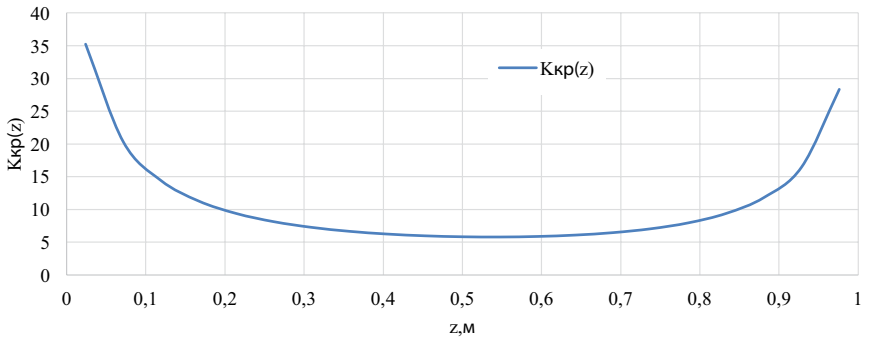


Рис. 2. ***График запаса до кризиса теплообмена***

ВЫВОДЫ

В работе было описано разработанное программное обеспечение, позволяющее проводить тепловой и нейтронно-физический расчеты параметров судовых ядерных реакторов.

Выполнено сравнение полученных результатов с данными [8] по существующим судовым реакторам КЛТ-40С, РИТМ-200, РИТМ-200Н и РИТМ-200С. С учетом принимаемых допущений расчет показал приемлемую точность результатов. Отклонение этих результатов от данных работы не превысило 30 %.

Разработанное программное обеспечение можно использовать в следующих направлениях:

– для проведения исследовательских работ по направлению судовых ядерных энергетических установок;
– для оценки в конструкторских бюро параметров судовой ядерной энергетической установки на ранних этапах эскизного проекта, не требующих большой точности проводимых расчетов;
– для обучения студентов в высших учебных заведениях проведению теплового и нейтронно-физического расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шаманов Н.П.* Расчет многоблочного парогенерирующего агрегата с кипящей активной зоной. Методические указания по курсовому проектированию. – Л.: Изд. ЛКИ, 1977.
2. *Ревков М.В.* Расчет активной зоны реактора с воспроизводством ядерного горючего. Методические указания по использованию ЭВМ в курсовом и дипломном проектировании. – Л.: Изд. ЛКИ, 1979.
3. *Вилькман Н.Н., Дядик А.Н., Ревков М.В.* Расчет судовых ядерных реакторов. – Л.: Изд. ЛКИ, 1985.
4. *Шаманов Н.П., Ревков М.В., Андреев В.М., Кириченко Л.И.* Расчет судовых ядерных реакторов. Методические указания. – СПб.: СПбГМТУ, 2003. – 50 с.
5. *Клемин А.И., Полянин Л.Н., Стригулин М.М.* Теплогидравлический расчет и теплотехническая надежность ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1980.
6. *Лейкин И.Ю., Гусев Л.Б.* Физические основы эксплуатации и безопасность корабельного ядерного реактора. – СПб.: Северная звезда, 2014. – 467 с.
7. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.* Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 360 с.
8. *Романов А.И., Папотин В.Ю., Тутуркин М.Ю.* Разработка активных зон для АСММ и ПЭБ. Текущее состояние и направления развития// Вопросы атомной науки и техники. – Сер.: Материаловедение и новые материалы. – 2023. – № 5(121). – С. 86–111. – EDN VFSQPY. ■

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНИКА В ОДНОКОНТУРНОЙ СХЕМЕ ЯДЕРНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

А.Н. Дядик, *д-р техн. наук, проф. СПбГМТУ,*
В.А. Дядик, *канд. техн. наук,*
гл. специалист отдела судов в эксплуатации ФАУ РМРС,
Д.С. Маловик, *аспирант СПбГМТУ,*
контакт. тел. (812) 714 1641

Согласно второму закону термодинамики работа любого теплового двигателя реализуется между горячим и холодным источниками теплоты. Как следует из рассмотрения схемы одноконтурной ядерной газотурбинной установки (ЯГТУ), используемой на морском подводном объекте, холодильник охлаждается непосредственно забортной водой. Учитывая высокую температуру рабочего тела (гелия) после газовой турбины, поступающего в холодильник, можно предположить, что на стоянке и при движении с малыми скоростями автономного необитаемого аппарата (АНПА) в холодильнике возможно кипение забортной воды на охлаждаемых поверхностях. В диссертации [1] даже обосновывается наличие при этом кавитации на поверхности трубок холодильника. Разберем этот вопрос отдельно.

ОБРАЗОВАНИЕ ПАРОВОЙ ФАЗЫ НА ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Образование паровых пузырей в канале происходит либо на стенке, либо вокруг мельчайших пузырьков.

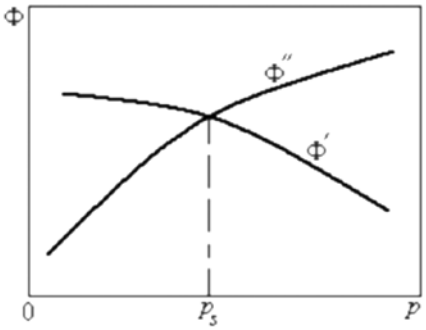


Рис. 1. ***Зависимость химического потенциала паровой и жидкой фаз от давления среды при T = const***

Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с фазовыми превращениями в движущихся двухфазных потоках. Известно [2], что описание новых упорядоченных состояний двухфазных систем, не удовлетворяющих равновесным условиям, должно опираться на теорию флуктуации. Новая структура вещества является результатом его неустойчивого состояния и возникает в результате флуктуации. Существует два типа флуктуаций: *гомофазные* – не выводящие систему из данного агрегатного состояния, и *гетерофазные* – выводящие систему за пределы исходного агрегатного состояния [3]. Для процесса кипения интерес представляют только гетерофазные флуктуации.

Основные положения равновесия гетерогенных систем установлены впервые Гиббсом. Условия равновесия фаз при наличии поверхностного натяжения [4] будут

$$T' = T''; p'' - p' = 2\sigma/R;$$
$$\Phi''(p'', T'') = \Phi'(p', T'),$$

где T'', T' – температура пара и жидкости; p'', p' – давление в паровом пузырьке и окружающей жидкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения (свободная энергия единицы поверхности); R – радиус парового пузырька; Ф'', Ф' – химические потенциалы газообразной и жидкой фаз.

В пространстве с координатами Ф, p, T жидкость и пар характеризуются соответствующими поверхностями химического потенциала $\Phi'(p', T')$ и $\Phi''(p'', T'')$. Точка пересечения химических потенциалов пара и жидкости представляет собой след кривой фазового равновесия – бинодали, ее же проекция на ось абсцисс является давлением насыщения при данной температуре (рис. 1). При давлении среды, превышающем p_s, химический потенциал Ф' меньше химического потенциала пара Ф''; при давлении меньшем p_s, Ф' > Ф''. Фаза, имеющая при данных p и T меньшее значение химического потенциала, будет устойчивой [5].

Таким образом, при давлении, меньшем p_s, жидкость будет находиться в ме-

тастабильном (перегретом) состоянии. Метастабильная жидкость будет относительно устойчива. Вследствие возникающей флуктуации в такой жидкости возможно образование паровой фазы. Образование парового пузырька в жидкой фазе сопровождается ростом энергии Гиббса на величину

$$\Delta E = \frac{4\pi}{3}\left(\Phi''_{\infty} - \Phi'_{\infty}\right)\frac{R^3}{v''} + 4\pi\sigma R^2, \qquad (1)$$

где Φ''_{∞} и Φ'_{∞} – химические потенциалы газообразной и жидкой фаз при плоской поверхности их раздела.

Поскольку образование паровой фазы в жидкой происходит при давлении, меньшем p_s, то $\Phi''_{\infty} < \Phi'_{\infty}$ и первый член зависимости (1) отрицательный. При малых R значение второго члена уравнения (1) намного больше и ΔE будет положительной величиной. Рост энергии Гиббса будет продолжаться до тех пор, пока оба члена выражения (1) не сравняются и радиус парового пузырька не достигнет некоторого критического значения $R_{кр}$.

Необходимым признаком экстремума функции является равенство нулю ее первой производной. Из условия $d\Delta E/(dR) = 0$ получается выражение для критического радиуса парового пузырька

$$R_{кр} = 2\sigma v''/(\Phi''_{\infty} - \Phi'_{\infty}).$$

При фазовом равновесии соблюдается равенство химических потенциалов жидкой и газообразной фаз, т. е. $\Phi' = \Phi''$. Следовательно, равны между собой и полные производные:

$$d\Phi'/(dT) = d\Phi''/(dT).$$

Используя данные работы [6], запишем

$$\frac{d\Phi'}{dT} = \left(\frac{\partial\Phi'}{\partial T}\right)_p + \left(\frac{\partial\Phi'}{\partial p}\right)_T \frac{dp'}{dT};$$

$$\frac{d\Phi''}{dT} = \left(\frac{\partial\Phi''}{\partial T}\right)_p + \left(\frac{\partial\Phi''}{\partial p}\right)_T \frac{dp''}{dT}.$$

Поскольку

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial T}\right)_p = -s; \quad \left(\frac{\partial\Phi}{\partial p}\right)_T = v \text{ и } s'' - s' = r/T_s,$$

то

$$v''\frac{dp''}{dT} - v'\frac{dp'}{dT} = \frac{r}{T_s}. \qquad (2)$$

Уравнение (2), напоминающее соотношение Клапейрона–Клаузиуса, связывает величины dp/dT для фаз при различных давлениях среды. С помощью уравнения (2) определим критический радиус парового пузырька в объеме жидкости при условии, что искривление межфазной поверхности не приведет к изменению давления в жидкой фазе. Величина перегрева жидкости $\Delta T_{пер} = T_ж - T_s$ учитывает уменьшение упругости паров над криволинейной поверхностью по сравнению с плоской, а также влияние сил поверхностного натяжения на давление внутри пузырька. Представим уравнение (2) в виде

$$r\Delta T_{пер}/T_s = v''\Delta p'',$$

где

$$\Delta p'' = p'' - p' = 2\sigma/R_{кр}. \qquad (3)$$

Окончательная зависимость для критического радиуса парового пузырька примет вид

$$R_{кр} = \frac{2\sigma T_s}{r\rho''\Delta T}. \qquad (4)$$

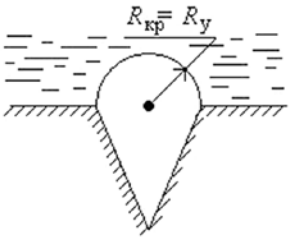


Рис. 2. ***Схема образования парового пузырька в микровпадине конической формы***

В работе [7] получены результаты решения уравнений Гиббса совместно с уравнением Клапейрона–Клаузиуса в широком диапазоне изменения $\Delta T/\Delta p$ для случая образования паровой фазы на границе жидкости с твердой поверхностью. Эти результаты показывают, что условия образования зародыша пузырька в массе перегретой жидкости и на стенке одинаковы.

В процессе вскипания жидкости на стенке образование зародышей паровых пузырьков происходит в микровпадинах. Теоретический анализ образования зародышей паровых пузырьков в микровпадинах строится на основе упрощенных моделей их роста.

Примем, что микровпадины имеют коническую форму (рис. 2). Модель образования зародыша парового пузырька в конической микровпадине была предложена Уостуотером.

При поверхностном кипении происходит адиабатный процесс вскипания жидкости [8], когда ее температура равна температуре стенки и постоянна по высоте пристеночного жидкостного слоя. Для этого случая экспериментально установлено [9], что основной характеристикой активности микровпадины является размер ее устья, следовательно, $R_{кр} = R_у$. Приближенный теоретический анализ процесса парообразования позволяет сделать вывод, что существует некоторое критическое значение радиуса активной микровпадины $R_{кр}$.

ПРОЦЕСС РОСТА ПАРОВОГО ПУЗЫРЬКА НА СТЕНКЕ КАНАЛА

Рассмотрим рост парового пузырька на стенке канала в микровпадине (см. рис. 2). Условно примем геометрию микровпадины конической. Микровпадины с меньшим радиусом, чем $R_{кр}$, не могут быть активными центрами парообразования, а с большими радиусами будут активными.

Возникший в микровпадине зародыш парового пузырька с радиусом $R_{кр}$ будет находиться в состоянии неустойчивого равновесия с окружающей его жидкостью. Достаточно весьма незначительного возмущения, чтобы вызвать дальнейший рост парового пузырька.

Рассмотрим одиночный сферический пузырек в несжимаемой невязкой жидкости бесконечного объема. Уравнения движения и неразрывности для сферически симметричного потока будут иметь вид

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + w\frac{\partial w}{\partial r} = -\frac{1}{\rho'}\frac{\partial p}{\partial r}, \qquad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{2w}{r} = 0. \qquad (6)$$

Интегрируя уравнение неразрывности в пределах от радиуса поверхности пузырька R до r, при $r > R$, получаем радиальную скорость жидкости w, выраженную через скорость перемещения поверхности раздела фаз $\dot{R} = dR/d\tau$. Тогда радиальная скорость жидкости

$$w = \frac{R\,R^2}{r^2}. \qquad (7)$$

Подставляя (7) в (5), получаем

$$\frac{2R\dot{R}^2 + R^2\ddot{R}}{r^2} - \frac{2\dot{R}R^4}{r^5} = -\frac{1}{\rho'}\frac{\partial p}{\partial r}.$$

Интегрируя последнее уравнение в пределах от поверхности раздела фаз до бесконечности, получаем уравнение Рэлея

$$\rho'\left(R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2\right) = \Delta p, \qquad (8)$$

где $\Delta p = p'(R) - p'(\infty)$ – разность давлений жидкости на межфазной границе и на достаточно большом расстоянии от пузырька.

Другой способ определения скорости роста парового пузырька связан с решением только тепловой задачи и исключает решение динамической задачи. В такой постановке решение задачи роста скорости парового пузырька впервые было получено в [10]. Задача решалась с использованием уравнения теплового баланса на границе раздела фаз. За время $d\tau$ через межфазную границу передается количество теплоты dQ и происходит рост парового пузырька, объем которого увеличивается на dV'', а содержание пара на dG'. Уравнение теплового баланса записывается в следующей форме:

$$4\pi R^2\alpha\Delta T d\tau = R\rho'' 4\pi R^2 dR,$$

где R – радиус пузырька в момент времени τ; α – коэффициент теплоотдачи, а затем приводится к виду

$$\frac{dR}{d\tau} = \frac{\alpha\Delta T}{r\rho''}. \qquad (9)$$

Практически уравнением (9) пользоваться невозможно, так как α является переменной величиной и подлежит определению.

Более точно тепловая задача роста парового пузырька решается с использованием уравнения энергии для жидкости и граничных условий. Уравнение энергии для сферически симметричной системы координат имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}+w_r\frac{\partial T}{\partial r}=a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right), \quad (10)$$

где a – коэффициент температуропроводности.

Радиальная скорость перемещения поверхности раздела фаз определяется зависимостью (7), которая с учетом испарения жидкости в пузырек с его поверхности будет иметь вид

$$w=(1-\rho''/\rho')\,\dot{R}\,R^2/r^2.$$

Граничное условие на поверхности раздела фаз формулируется с использованием закона сохранения энергии. Количество теплоты, подводимой теплопроводностью, определяется зависимостью

$$4\pi R^2\lambda\left|\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R}d\tau\,.$$

Теплота, подводимая с энтальпией жидкости, составит $d(r\rho''V'')$. Поступающее в паровой пузырек количество теплоты расходуется на работу расширения пара $p''dV''$ и увеличение его внутренней энергии $d(u''\rho''V'')$, т. е.

$$4\pi R^2\lambda\left|\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R}d\tau+d\left(r\rho''V''\right)= \\ =p''dV''+d\left(u''\rho''V''\right). \quad (11)$$

Часто граничное условие упрощают, пренебрегая изменением некоторых величин. Точное решение уравнения (11) связано с большими трудностями, поэтому его упрощают или решают приближенно.

В реальных условиях динамический и тепловой факторы кипения жидкости действуют одновременно, вызывая рост паровых пузырьков. Существуют несколько решений задачи о скорости роста парового пузырька с учетом динамического и теплового факторов.

Одним из первых приближенных решений задачи о росте парового пузырька является решение М.С. Плессета и С.А. Цвика. При решении вводится в рассмотрение начальный радиус пузырька, для которого записывается соотношение

$$\frac{2\sigma}{R_{кр}}=p_п\left(T_\infty\right)-p_\infty,$$

где T_∞ – температура перегретой жидкости вдали от пузырька.

Тогда уравнение (8) запишется так:

$$R\ddot{R}+\frac{3}{2}\dot{R}^2= \\ =\frac{p_п\left(T\right)-p_п\left(T_\infty\right)+\frac{2\sigma}{R_{кр}}\left(1-\frac{R_{кр}}{R}\right)}{\rho'}. \quad (12)$$

Температура T определяется с использованием упрощенного уравнения энергии (10). Радиус парового пузырька определяется в предположении, что понижение температуры от T_∞ до T происходит в очень тонком слое жидкости, окружающем пузырек, толщина которого весьма мала по сравнению с радиусом. Приближенное выражение для T записывается следующим образом:

$$T=T_\infty-\sqrt{\frac{a}{\pi}}\int_0^\tau\frac{R^2\left(x\right)\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{R(x)}}{\left[\int_x^\tau R^4\left(y\right)dy\right]^{1/2}}dx. \quad (13)$$

Задача сводится к решению уравнений (12) и (13), поскольку. T и $\rho''(T)$ выражаются в функции R и $\dot{R}$.

Окончательно выражение для радиуса растущего пузырька имеет вид:

$$R=2\sqrt{\frac{3}{\pi}}\,Ja\sqrt{a\tau}\,, \quad (14)$$

где $a=\lambda'/\left(c_p\rho'\right)$ – коэффициент температуропроводности; Ja – число Якоба, определяемое так

$$Ja=\frac{\rho'}{\rho''}\frac{\Delta T_{пер}c_p'}{r}.$$

В процессе роста пузырька можно выделить три стадии. Первые две – начальная и промежуточная – протекают в течение очень короткого промежутка времени – миллисекунды.

Третья стадия является основной по времени и значению. Это практически вся видимая *стадия* развития пузырька, *называемая асимптотической*.

Формула (14) дает возможность определить радиус парового пузыря для любого момента времени. На рис. 3 изображен график изменения радиуса парового пузыря, рассчитанного по формуле (14) при изменении давления водяного пара от 1 до 10 МПа.

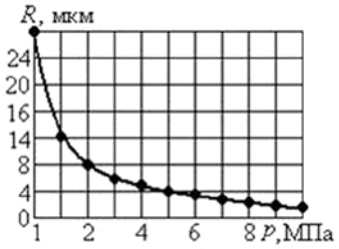


Рис. 3. ***Зависимость радиуса парового пузырька от давления пара***
• – расчетные точки

Из рассмотрения данного графика видно, что с ростом давления пара радиус парового пузырька, образующегося на стенке, уменьшается и становится равным нескольким микронам.

ДИНАМИКА ПАРОВОГО ПУЗЫРЬКА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЗАХЛОПЫВАНИЯ

В реальных условиях кипения форма паровых пузырей отличается от сферической. Поэтому отрывной диаметр пузыря d_0 определяет среднестатистический, т.е. наиболее вероятный диаметр.

Значение d_0 находится из условия равновесия пузыря в момент отрыва от теплопередающей поверхности. В этом случае рассматривается равенство двух сил – подъемной (Архимедовой), стремящейся оторвать пузырь, и силы поверхностного натяжения, удерживающей его на стенке.

Для условно сферического пузыря это условие выглядит так:

$$\frac{\pi d_0^3}{6}\left(\rho'-\rho''\right)g=\pi d_0\sigma f\left(\Theta\right). \quad (15)$$

Здесь g – ускорение свободного падения; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м – сила, приходящаяся на единицу длины контура; $f(\Theta)$ – функция краевого угла (рис. 4).

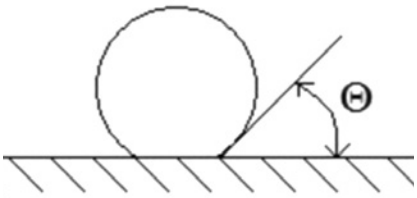


Рис. 4. ***Краевой угол парового пузыря на стенке***

Функция краевого угла впервые определена Фритцем. На основании опытных данных им получена формула [11,12]

$$d_0=0{,}02\Theta\sqrt{\frac{\sigma}{\left(\rho'-\rho''\right)g}}, \quad (16)$$

где Θ определяется в градусах.

Уравнение (16) не всегда подтверждается экспериментально. Это объясняется тем, что на пузырь кроме вышеуказанных сил действуют и другие силы. Для реальных условий процесса кипения в правую часть уравнения (15) вводится либо инерционная сила, либо сила гидродинамического сопротивления.

Иногда задача решается с учетом влияния обеих этих сил. Теоретически и экспериментально получено, что диаметр парового пузыря при отрыве увеличивается с ростом числа Якоба. Поэтому с увеличением плотности теплового потока и уменьшением давления насыщения значение d_0 возрастает.

Оторвавшиеся паровые пузыри попадают в относительно более холодную воду и захлопываются либо с образованием ударных волн, либо с образованием кумулятивных струек. Данные, полученные в последнее время показывают, что не ударные волны, а кумулятивные струйки вызывают разрушение материалов при захлопывании паровых пузырьков. В [13] приведены оценочные расчеты максимального давления, возникающего на поверхности твердой стенки при воздействии ударных волн, которое составило 10 МПа, что недостаточно для разрушения материала.

Как показано в работе [14], численный расчет задачи о захлопывании пузырька дает те же величины скорости струйки, что и приближенная модель захлопывания парового пузырька. Это позволяет создать приближенную модель захлопывания парового пузырь-

ка, основание которого находится в устье микровпадины. Поскольку пузырек имеет сферическую форму, то последовательность его захлопывания примем обратной процессу его роста. Допустим, что в момент попадания пузырька во фронт более холодной воды радиус его составлял $R(\tau)$. Полагая захлопывание пузырька сферически симметричным, а основание пузырька расположенным на устье микровпадины, получим, что в момент микроудара жидкости о стенку радиус пузырька будет равен $R_{кр}=R_у$. Схема захлопывания парового пузырька представлена на рис. 5.

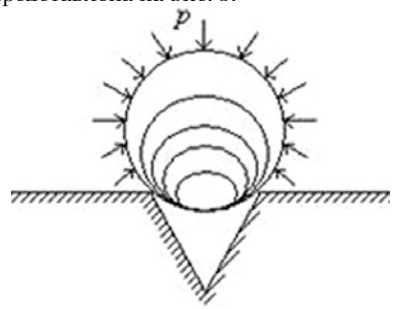


Рис. 5. ***Схема захлопывания парового пузырька, основание которого находится на устье микровпадины***

Считая жидкость несжимаемой, будем полагать, что ее движение во всем объеме будет определяться условиями на границе раздела фаз. При отсутствии массопереноса через границу для моментов времени τ_0 и τ_1 запишем

$$4\pi\rho' R^2(\tau_0)w(\tau_0)=4\pi\rho' R^2(\tau_1)w(\tau_1),$$

откуда

$$\frac{w(\tau_0)}{w(\tau_1)}=\left[\frac{R(\tau_1)}{R(\tau_0)}\right]^2 \qquad (17)$$

Найдем выражение для кинетической энергии микрообъема жидкости в момент соударения с твердой стенкой при захлопывании пузырька с начальным радиусом $R_п$:

$$E_{кин}=\frac{1}{2}\rho'\int_{R_п}^{R_у} w^2(\tau)\cdot 4\pi R^2(\tau)dR.$$

С учетом (17) запишем

$$E_{кин}=\frac{1}{2}\rho'\int_{R_п}^{R_у} w_у^2\cdot 4\pi R_б^4\frac{dR}{R^2(\tau)}=$$

$$=-2\pi\rho' R_у^4 w_у^2\frac{1}{R(\tau)}\Big|_{R_п}^{R_у}= \qquad (18)$$

$$=-2\pi\rho' w_у^2 R_у^3++2\pi\rho' w_у^2\frac{R_у^4}{R_п}.$$

Пренебрегая ввиду малости отношения $R_у^4/R_п$ вторым членом выражения (18), запишем зависимость для кинетической энергии микрообъема жидкости, ударяющейся о стенку, в виде

$$E_{кин.у}=-2\pi\rho' w_у^2 R_у^3. \qquad (19)$$

Работа, совершаемая системой при захлопывании пузырька,

$$A=E_{кин.п}-E_{кин.у}=-E_{кин.у}. \qquad (20)$$

Элементарная работа, совершенная за время $d\tau$, будет $dA=d(PL)=\Delta p\cdot 4\pi R^2(\tau)\,dR$, где P – сила; L – расстояние; Δp – перепад давления между жидкой и паровой фазами. Интегрируя выражение для dA, получаем

$$A=4\pi\Delta p\int_{R_п}^{R_у} R^2(\tau)dR=\frac{4}{3}\pi\Delta p\left(R_п^3-R_у^3\right). \qquad (21)$$

При интегрировании принято, что p = const во время захлопывания пузырька. Поскольку $A = E_{кин.у}$, то

$$\frac{4}{3}\pi\Delta p\left(R_п^3-R_у^3\right)=2\pi\rho' w_у^2 R_у^3. \qquad (22)$$

Из этого выражения можно получить зависимость для скорости микрообъема жидкости, ударяющейся в стенку, при захлопывании парового пузырька [13]:

$$w_у=\sqrt{\frac{2}{3}\frac{\Delta p}{\rho'}\left[\left(\frac{R_п}{R_у}\right)^3-1\right]}. \qquad (23)$$

Как следует из формулы (23), скорость кумулятивной струи пропорциональна $\Delta p^{0,5}$, т.е. корню квадратному из перепада давления в жидкости и пузыре. Если бы паровой пузырь попадал в область высокого давления, как, например, в струйных аппаратах в скачке уплотнения, то эффект от ударов кумулятивных струй был бы серьезным. В нашем случае пузыри, отрывающиеся от стенок теплообменника схлопываются из-за попадания в более холодные слои воды, поэтому материал стенок трубок холодильника страдать не должен от кавитации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен жизненный цикл парового пузырька от момента его образования до захлопывания при попадании в более холодный слой воды. Задача решалась применительно к забортному теплообменнику–холодильнику ядерной газотурбинной установки на малогабаритном морском подводном объекте. На основании строгих уравнений теплофизики и гидродинамики получено, что подобное явление не будет поводом для возникновения механизма разрушения трубок забортного холодильника, поскольку даже при возникновении кумулятивных струек вблизи поверхности, их ударной энергии будет недостаточно для разрушения материала трубок. Таким образом, кавитационного разрушения при таких взаимодействиях не будет. Возможен гидродинамический шум от вскипания забортной воды, но это не входило в задачу, решаемую в статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Струев *В.П.* Исследования и экспериментальное обоснование конструкции элементов атомной газотурбинной установки с гелиевым теплоносителем с учетом их газодинамических и гидравлических особенностей: дисс. ... д-ра. физ.-мат. наук/СПб.: Изд-во СПбГУ, 1995. – 238 с.
2. *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости флуктуаций. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
3. *Френкель Я.И.* Кинетическая теория жидкостей. – Л.: Наука,1975.– 592 с.
4. *Вукалович М.П., Новиков И. И.* Термодинамика. – М.: Машиностроение, 1972. – 672 с.
5. *Скрипов В. П.* Метастабильная жидкость. – М.: Наука, 1972. – 312 с.
6. Сычев В. В. Дифференциальные уравнения термодинамики. – М.: Наука, 1981. – 195 с.
7. *Копп И. З.* О границах области реализации поверхностного пузырькового кипения// Общие вопросы тепло- и массопереноса. – Минск: Наука и техника, 1966. С. 212 – 218.
8. *Спиридонова Е. А., Самонин В. В., Подвязников М. Л.* Определение поглотительных характеристик водных растворов содержащих эндофуллеренолы, по отношению к органическим соединениям // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 75–84.
9. *Гриффитс П., Уоллис Д.* Роль состояния поверхности при пузырчатом кипении// Вопросы физики кипения. – М.: Мир, 1964. С. 99 – 137.
10. *Bosnjakovic F.* Verdampfung und Flusnig-Keitsűberhitzung// Teghn. Mech. und Thermodin. 1930. – Vol.1. – № 10. – S. 358 – 362.
11. *Толубинский В.Н.* Теплообмен при кипении.– Киев: Наук. думка, 1980. – 310 с.
12. *Присняков В.Ф.* Кипение. Киев: Наук. думка, 1988. – 240 с.
13. *Воинов О.В.* Динамика двухфазных систем с учетом изменения формы границ раздела фаз: Автореф. дисс. д-ра физ.-мат. наук. – М., 1980. – 40 с.
14. *Шаманов Н.П., Дядик А.Н., Лабинский А.Ю.* Двухфазные струйные аппараты. – Л.: Судостроение,1989. – 240 с. ■

КОНТРОЛЬ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КОРАБЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХИ

Б.Ю. Семёнов, *начальник сектора – гл. конструктор направления СКЭМП, АО «НПФ «Меридиан»,*
контакт. тел. +7 (812) 602 0375, доб. 526

Контроль низкочастотного электромагнитного поля (ЭМП) корабельного электрооборудования традиционно осуществляется путем погружения датчика индукционного типа на контрольную глубину и регистрации уровня создаваемой электрооборудованием индукции низкочастотного электромагнитного поля (НЭМП).

Основные сложности, связанные с получением достоверных значений ЭМП электрооборудования, объясняются наличием внешней помехи в местах, где проводятся данные измерения. Как правило, внешняя помеха промышленной частоты сети 50 Гц, излучаемая близко расположенными линиями электропередач, электроподстанциями, промышленными предприятиями, а также иными объектами береговой электроэнергетики, накладывается на НЭМП корабельного электрооборудования, что приводит к недопустимо высокой погрешности измерения.

Исключение или, по крайней мере, минимизация до приемлемых значений внешней помехи представляет собой достаточно сложную задачу, особенно если контроль НЭМП проводится в положении корабля «на ходу». Техническая реализация мероприятия заключается в установке дополнительного индукционного датчика на большом расстоянии от корабля, где уровень помехи очищен от влияния НЭМП корабля. Сигнал, получаемый от дополнительного датчика, вычитается в измерительной аппаратуре из суммарного измеренного сигнала.

Расстояние, на которое приходится выносить дополнительный датчик помехи НЭМП, составляет, как правило, несколько сот метров, что существенно повышает требования не только к качеству линии передачи сигнала, но и значительно увеличивает трудоемкость постановки измерительной аппаратуры. Кроме этого, характер помехи на большом удалении от корабля может оказаться иным, чем вблизи установленного измерительного датчика, и это также приведет к ухудшению достигаемого результата компенсации внешней помехи.

МЕТОДИКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХИ

Предлагаемая к рассмотрению методика дифференциальной компенсации помехи частотой 50 Гц в месте проведения измерений НЭМП корабельного электрооборудования основана на следующих исходных положениях:

а) максимальный габаритный размер источника НЭМП много меньше (по крайней мере, на порядок) контрольного расстояния, на котором проводятся измерения НЭМП;

б) источники внешней помехи значительно удалены от места проведения измерений, что позволяет считать неизменным величину магнитной индукции помехи на отрезке глубины 3–4 м.

На рис. 1 показана схема расстановки датчиков измерительного (И) и двух контрольных ($К_1$ и $К_2$) в месте проведения измерений. В соответствии с исходными положениями источник НЭМП на контрольной глубине r имеет дипольный характер пространственного распределения индукции магнитного поля и может характеризоваться магнитным моментом M.

В соответствии с положениями теории электромагнитного поля величина магнитной индукции ($B_и$) в месте измерения с учетом величины внешней помехи ($B_п$) будет определяться из соотношения

$$B_и = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{M}{r^3} + B_п, \qquad (1),$$

где μ_0 – магнитная постоянная, 4·10–7 Гн/м; M – магнитный момент источника НЭМП, А·м^2; r – контрольное расстояние, м; $B_и$ – индукция магнитного поля, создаваемая источником, Тл; $B_п$ – индукция магнитного поля, создаваемая помехой, Тл.

На расстояниях ($r - \Delta r$) и ($r + \Delta r$) от датчика И располагаются датчики $К_1$ и $К_2$ соответственно. Величина магнитной индукции $B_{к1}$, фиксируемой датчиком $К_1$, с учетом величины внешней помехи $B_п$ можно определить из соотношения, которое аналогично (1):

$$B_{к1} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{M}{(r - \Delta r)^3} + B_П, \qquad (2)$$

а величина магнитной индукции $B_{к2}$, фиксируемой датчиком $К_2$ с учетом величины внешней помехи $B_п$, находим из соотношения

$$B_{к2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{M}{(r + \Delta r)^3} + B_П. \qquad (3)$$

Существенным для проведения измерений является одноименное фазирование датчиков И, $К_1$, $К_2$, т. е. вре-

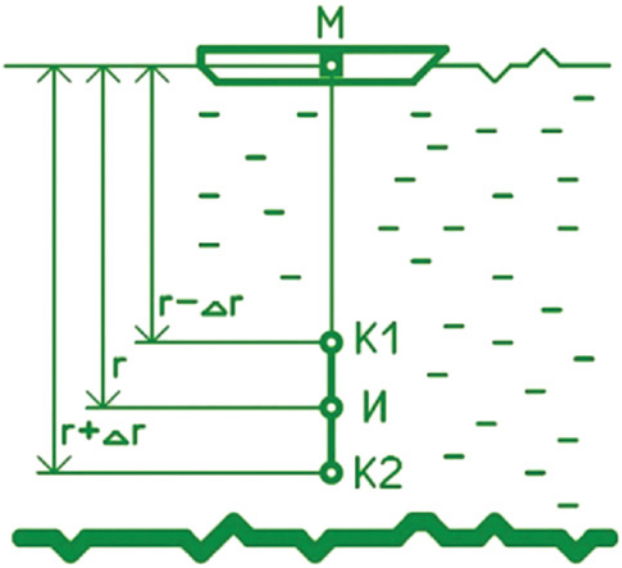


Рис. 1. ***Схема расстановки датчиков в дифференциальной схеме измерения***

менное изменение индукции $B_и$, $B_{к1}$, $B_{к2}$ должно происходить в одной фазе. Тогда, выполнив простейшие математические операции над выражениями (1), (2), (3), получим соотношение

$$2B_и - B_{k1} - B_{k2} = 2\frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{M}{r^3} + 2B_п - \\ -\frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{M}{(r-\Delta r)^3} - B_п - \\ -\frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{M}{(r+\Delta r)^3} - B_п. \qquad (4)$$

Далее, преобразовав соотношение (4), приходим к соотношению

$$(B_{k1} + B_{k2} - 2B_И) = \\ = M\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{(r-\Delta r)^3} + \frac{1}{(r+\Delta r)^3} - \frac{2}{r^3}\right). \qquad (5)$$

Выражение (5) содержит только одну неизвестную величину – магнитный момент M источника НЭМП. Остальные члены выражения (5) известны: контрольное расстояние r задается при измерении, расстояние Δr – между измерительным и контрольными датчиками обеспечивается конструкцией балки, на которой размещаются датчики. Величины индукции $B_и$, $B_{к1}$, $B_{к2}$ также являются известными, так как датчики имеют известный коэффициент преобразования (Тл/В), и, проведя измерение напряжения на выходах индукционных элементах, можно выполнить пересчет в значение индукции.

Затем проводится расчет индукции НЭМП $B_м$, создаваемой источником НЭМП, по формуле

$$B_м = \frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{M}{r^3}. \qquad (6)$$

Индукция $B_м$, полученная путем проведения измерений и дальнейшей математической обработки, является конечным результатом измерений.

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ КАНАЛА ИЗМЕРЕНИЯ

Схема канала измерения, содержащего измерительный датчик И и два контрольных датчика $К_1$ и $К_2$, показана на рис. 2.

Интеграторы (ИНТ) выравнивают частотные характеристики датчиков, а полосовые фильтры (ПФ) выделяют из спектра сигнала составляющую частоты 50 Гц. Далее в канале датчика И установлен масштабный усилитель $x2$, которой усиливает сигнал датчика в 2 раза. Сигналы датчиков $К_1$ и $К_2$ суммируются на сумматоре (СУМ) с одинаковым коэффициентом передачи для каждого канала. Затем сигналы с выхода $x2$ и СУМ поступают на вход дифференциального усилителя (ДИФУ), на выходе которого образуется сигнал, пропорциональный ($B_{к1}$+$B_{к2}$–2$B_и$). Этот сигнал может быть подвергнут дальнейшей обработке в аналоговом или цифровом виде.

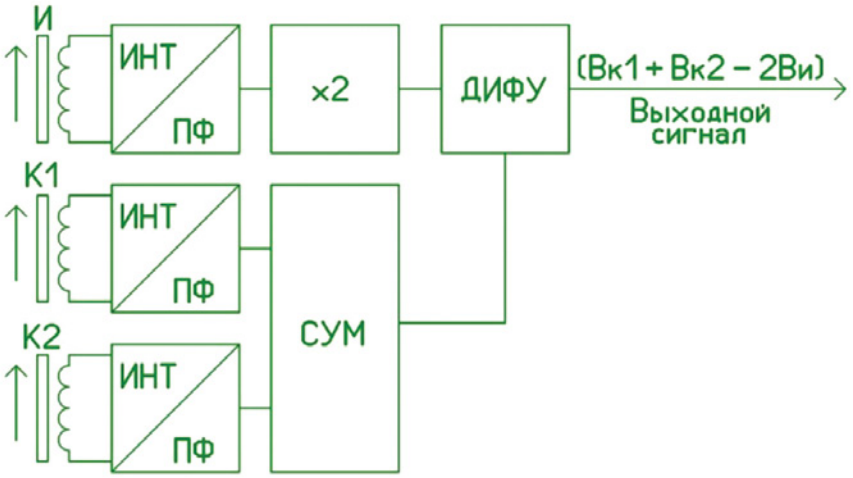


Рис. 2. ***Канал измерения для реализации аппаратуры контроля***

ЗАМЕЧАНИЕ О ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

Изложенная методика измерения НЭМП электрооборудования корабля ориентирована на схемотехническую реализацию с применением методов аналоговой электроники. Соответственно, в случае использования известных схемотехнических решений узлов измерительного тракта на основе операционных усилителей (полосовой фильтр, сумматор, масштабный усилитель, дифференциальный усилитель) погрешность измерительного тракта будет в значительной степени определяться неидентичностью амплитудных и фазовых характеристик этих узлов. Кроме того, уровень сигнала на выходе дифференциальной схемы принципиально ниже абсолютного уровня сигнала, получаемого от каждого датчика, поэтому на суммарную погрешность окажет влияние также уровень собственных шумов микросхем.

Необходимо также иметь в виду, что на погрешность метода оказывают влияние размеры источника НЭМП и его конструкция. Если источник НЭМП представляет собой замкнутый виток с током круглой формы радиусом R, то при приближении к нему будет возрастать погрешность измерения, поскольку в формулах (1), а также в формулах (2) и (3) появляется поправка на радиус источника:

$$B_и = \frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{M}{\left(\sqrt{R^2+r^2}\right)^3} + B_п. \qquad (7).$$

Учет поправки, связанной с влиянием радиуса R (что расширяет диапазон контрольных расстояний r) в аналоговом виде сложен, поэтому при схемотехнической реализации измерительной аппаратуры необходимо будет использовать цифровые вычислительные средства, в интерфейсе которых можно задавать величины R, r, и, если предусматривается регулировка расстояния Δr, также и этот параметр.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика измерения НЭМП электрооборудования кораблей не требует наличия датчика внешней помехи и может быть реализована путем доработки находящейся в эксплуатации контрольной аппаратуры без последующего увеличения трудоемкости получения результатов измерений.

Техническая реализация аппаратуры, позволяющей проводить дифференциальные измерения, может быть выполнена как на основе аналоговых схемотехнических решений, так и комбинированных решений, при использовании которых преобразование сигналов осуществляется методами аналоговой схемотехники, а вычисление конечного результата с учетом расстояния датчиков от источника НЭМП, взаимного положения датчиков и максимального размера источника НЭМП проводится методами цифровой схемотехники. ■

РАЗВИТИЕ АНТЕННОЙ ТЕХНИКИ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

А.Ю. Степкин, *начальник отдела АФУ,*
В.А. Казначеев, *специалист по системам радиосвязи,*
Я.А. Демидов, *специалист по системам радиосвязи,*
АО «НТИ «Радиосвязь»,
контакт. тел. +7 (906) 274 2712

АО «НТИ «Радиосвязь» с момента своего создания в 1991 г. активно занимается разработкой, изготовлением и поставкой антенн и антенных коммутаторов различного назначения для надводных кораблей (НК) ВМФ. За эти годы были созданы и внедрены в состав автоматизированных комплексов связи (АКС) НК образцы передающих и приемных коротковолновых и приемопередающих ультракоротковолновых антенн, а также антенных коммутаторов коротковолнового и ультракоротковолнового диапазонов.

Антенна К-667-001 МБ стала первой разработанной предприятием для НК. Это свободностоящая штыревая антенна высотой 11 м, предназначенная для работы с коротковолновыми радиопередатчиками мощностью до 5 кВт. По сравнению с предшественницей (антенна К-667-001) за счет отсутствия элементов потерь и наличия встроенного широкополосного согласующего устройства был обеспечен более высокий коэффициент полезного действия при заданном уровне согласования на частотах выше 6 МГц, а за счет применения в конструкции антенны стеклопластиковых элементов обеспечена высокая антикоррозионная стойкость.

Следующим шагом в развитии передающих коротковолновых антенн стала антенна К-676-2 (рис. 1), которая, благодаря перестраиваемому согласующему устройству, позволяет достичь более высокого согласования с фидером и повысить КПД передающего тракта, особенно в нижней части частотного диапазона. Разработаны модификации антенны К-676-2, комплектуемые разными излучателями: штыревой углепластиковой (со сниженной радиолокационной заметностью) антенной высотой 8 м (для работы с радиопередатчиками мощностью до 1 кВт) или упомянутой выше антенной К-667-001 МБ (для работы с радиопередатчиками мощностью до 5 кВт). Управление перестройкой согласующего устройства по частоте осуществляется дистанционно по командам от АКС НК или с пульта местного управления.

Разработанная в 2017 г. широкополосная штыревая передающая антенна К-676-2АШ обеспечивает заданный уровень согласования с фидером во всем коротковолновом диапазоне частот без применения перестраиваемого согласующего устройства, благодаря чему идеально подходит для работы в режиме ППРЧ, так как скорость изменения рабочей частоты определяется только передающим устройством. Данная антенна несложна в эксплуатации в отличие от антенны К-676-2, что связана с необходимостью предварительной настройки и последующего управления перестройкой согласующего устройства, кроме того, она позволяет существенно сократить трудозатраты при проведении пусконаладочных работ на заказе и устранить негативное влияние сложной электромагнитной обстановки на цепи управления согласующего устройства. Создание такой широкополосной антенны позволило приступить к решению актуальной задачи обеспечения одновременной работы двух радиопередатчиков на одну антенну на различных частотах, что способствовало уменьшению общего количества антенн на НК при сохранении количества одновременно действующих передающих трактов.

Рис. 1. ***Изделие К-676-2 – согласующее устройство и блок управления***

Техника приемных антенн развивалась в АО «НТИ «Радиосвязь» в двух направлениях: создание штыревых пассивных антенн и малогабаритных активных антенн.

Приемная штыревая антенна АПС-6 Б высотой 6 м обеспечивает прием радиосигналов во всем коротковолновом диапазоне частот. По своим техническим характеристикам антенна аналогична широко применяемой ранее антенне АПС-6 и отличается от последней меньшей массой и разборной конструкцией из конических полимерных трубок (упрощает доставку к месту монтажа за счет снижения в два раза габаритов транспортной тары). Разработано несколько исполнений антенны, отличающихся материалом трубок (стеклопластиковые или углепластиковые для уменьшения радиолокационной заметности) и наличием встроенного согласующего устройства, позволяющего повысить эффективность антенны в нижней части рабочего диапазона частот.

Активная приемная антенна К-625 (рис. 2) уже более двух десятилетий широко применяется в составе АКС НК и на береговых объектах. Она обеспечивает высокую чувствительность приемного тракта в широком диапазоне частот (от 60 кГц до 80 МГц). Различные исполнения антенны, предназначенные для подключения до 16 независимо работающих радиоприемных устройств, формируются из следующих составных частей – приборов:

– АБ – антенна, состоящая из металлического вибратора и антенного усилителя. Питание прибора осу-

Рис. 2. ***Приемная антенна К-625***

ществляется по сигнальному высокочастотному кабелю. Малые габариты антенного блока обеспечивают удобство его размещения на корабле;
- П12 – широкополосный антенный усилитель с одним выходом, предназначенный для совместной работы с прибором АБ и с одним из вариантов прибора П17;
- П12–01 – широкополосный антенный усилитель-разветвитель с восемью выходами, предназначенный для совместной работы с прибором АБ.
- П5 – блок питания и контроля для прибора АБ;
- П17 – пассивный разветвитель (П17-2 – на два выхода; П17-4 – на четыре выхода; П17-8 – на восемь выходов; П17-16 – на шестнадцать выходов).

Для обеспечения работы ультракоротковолновых радиостанций (например, Р-612) в диапазоне частот от 100 до 400 МГц АО «НТИ «Радиосвязь» поставляет антенну К-674-11Б (рис. 3), отличающуюся высоким уровнем согласования с фидером и высокой надежностью. Антенна имеет ряд исполнений, отличающихся волновым сопротивлением (50 или 75 Ом), способом крепления к надстройке и диаметром соединительного кабеля при различных высотах установки антенны на НК и заданном удалении от радиостанции. В 2018 г. была проведена модернизация антенны, обеспечившая повышение коэффициента усиления и расширение верхней границы частотного диапазона до 512 МГц, что позволило удовлетворить требования по обеспечению работоспособности радиостанции Р-620.

В настоящее время для работы в диапазоне частот от 30 до 80 МГц АО «НТИ «Радиосвязь» разрабатывает биконическую антенну (рис. 4) с возможностью установки на береговых радиоцентрах на мачтах на высоте не менее 12 м и надстройках НК.

Рис. 3. ***Изделие К-674-11 Б***

Рис. 4. ***Биконическая антенна диапазона 30–80 МГц***

Подключение антенных устройств к выходам радиопередатчиков и к входам радиоприемников в АКС НК осуществляется, как правило, с помощью разработанных АО «НТИ «Радиосвязь» антенных коммутаторов Ю-627 (рис. 5) и Ю-628.

Автоматизированный коммутатор передающих антенн Ю-627 предназначен для подключения выходов РПДУ мощностью до 8 кВт к входам антенно-фидерного тракта и позволяет коммутировать любую антенну на любой радиопередатчик. Изделие Ю-627 содержит прибор К6 и прибор К1. Прибор К6 – высокочастотный коммутатор радиопередающих трактов выпускается в исполнениях с различной емкостью коммутационного поля: 2×6, 3×3, 6×4, 6×6, 8×6, 8×8. Прибор К1 – прибор управления прибором К6. Дистанционное управление осуществляется по стыку RS-232. Коммутация трактов сохраняется при выключении электропитания.

Коммутатор Ю-628 (рис. 6) предназначен для коммутации приемных антенн коротковолнового диапазона на радиоприемные устройства и приемопередающих антенн ультракоротковолнового диапазона (до 400 МГц) на радиостанции в условиях стационарного объекта и НК. Изделие Ю-628 состоит из пульта управления и блока коммутации (прибор КБ), изготавливаемого с различной емкостью коммутационного поля: 3×3, 6×6, 9×9. Дистанционное управление осуществляется по стыку RS-232. Коммутация трактов сохраняется при выключении электропитания.

Все образцы антенной техники, предлагаемые потребителям, отличаются новейшими схемно-техническими решениями и использованием современных, в том числе композитных, материалов. При этом специалисты предприятия стремятся максимально использовать комплектующие изделия российских производителей. ■

Рис. 5. ***Коммутатор передающих антенн Ю-627***

Рис. 6. ***Коммутатор Ю-628***

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СРЕДСТВ РАДИОСВЯЗИ

А.С. Батурин, *руководитель СКБ – гл. конструктор ТЗУ АО «НПО Завод «Волна», г. Сарапул,*
А.Н. Киченко, *канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник 18 ЦНИИ МО,*
В.Э. Гель, *канд. воен. наук, доцент, ген. директор АО «УК «Радиостандарт», контакт. тел. (812) 252 0914*

В настоящее время при разработке радиосредств различных диапазонов волн требуется установление требований к дальности необходимой связи. Для проработки достижимости необходимых требований актуальным является математическое моделирование каналов связи. Отдельным направлением моделирования различных каналов связи стоит моделирование распространения сигналов в декаметровом диапазоне волн. Это связано с особенностями распространения радиосигналов на коротких волнах – наличием замираний и многолучевости, связанных с отражением сигналов от слоев ионосферы. В настоящей статье выполнен анализ моделей распространения радиоволн в декаметровом диапазоне волн, учитывающих различную ширину спектра передаваемого сигнала, применяемых при разработке радиосредств.

Информационный анализ показывает, что имеется ряд моделей, позволяющих оценивать показатели распространения радиоволн в декаметровом диапазоне волн, а именно модели:

- Ваттерсона;
- Воглера и Хоффмайера;
- Герма, Зернова и Стрэйнджвэйса;
- Яу;
- Марийского государственного технического университета (МарГТУ);
- Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ) и др.

1. Феноменологическую модель Ваттерсона (*Watterson*) разработчики программных и аппаратных имитаторов ионосферных радиоканалов и систем связи декаметрового диапазона применяют чаще всего [10]. Она описывает коротковолновый ионосферный канал связи с Гауссовым рассеянием в полосе частот до 12 кГц. Функциональная схема модели изображена на рис. 1.

Комплексная огибающая $\dot{x}(t)$ передаваемого сигнала поступает на линию задержки с множественными отводами. Каждая линия задержки соответствует отдельному принимаемому лучу без учета магнитно-ионного расщепления. Отдельные лучи умножаются на модулирующие функции $\dot{c}(t)$ и складываются в выходной сигнал $\dot{y}(t)$ с учетом аддитивного шума $\dot{n}(t)$:

$$\dot{y}(t)=\sum_{i=1}^{N}\dot{c}(t)\dot{x}(t-\tau_i)+n(t),\ \ \tau_1=0, \quad (1)$$

где N – общее число отводов линии задержки, τ_i – задержка i-го луча, относительно первого.

Модель базируется на трех ключевых принципах [5, 10]:

- каждая модулирующая функция $\dot{c}(t)$ является комплексным гауссовым случайным процессом, реализующим эффект рэлеевских замираний;
- все модулирующие функции $\dot{c}(t)$ независимы друг от друга, как и их вещественные и мнимые части;
- спектральная плотность мощности модулирующих функций $\dot{c}(t)$ представляет собой сумму двух разнесенных по частоте функций Гаусса (рис. 2) – каждая для одной магнитно-ионной компоненты:

$$S_i(\nu)=\frac{1}{A_{sia}\sigma_{sia}\sqrt{2\pi}}\exp\left[\frac{-(\upsilon-\upsilon_{sia})^2}{2\sigma_{sia}^2}\right]+ \\ +\frac{1}{A_{sib}\sigma_{sib}\sqrt{2\pi}}\exp\left[\frac{-(\upsilon-\upsilon_{sib})^2}{2\sigma_{sib}^2}\right]. \quad (2)$$

В узкополосном ионосферном канале не представляется возможным временное разделение магнитно-ионных компонент из-за малой взаимной задержки во времени, поэтому их наличие учитывается в частотной области – в спектральной плотности мощности модулирующих функций $\dot{c}(t)$, которая изображена на рис. 2. Таким образом, шесть независимых параметров определяют функцию коэффициента передачи отвода и ее спектр: $\overline{A}_{sia}$ и $\overline{A}_{sib}$ – затухания обыкновенной и необыкновенной компонент волны, υ_{sia} и υ_{sib} – допплеровские сдвиги частоты для обыкновенной и необыкновенной составляющих волны, σ_{sia} и σ_{sib} – среднеквадратичные

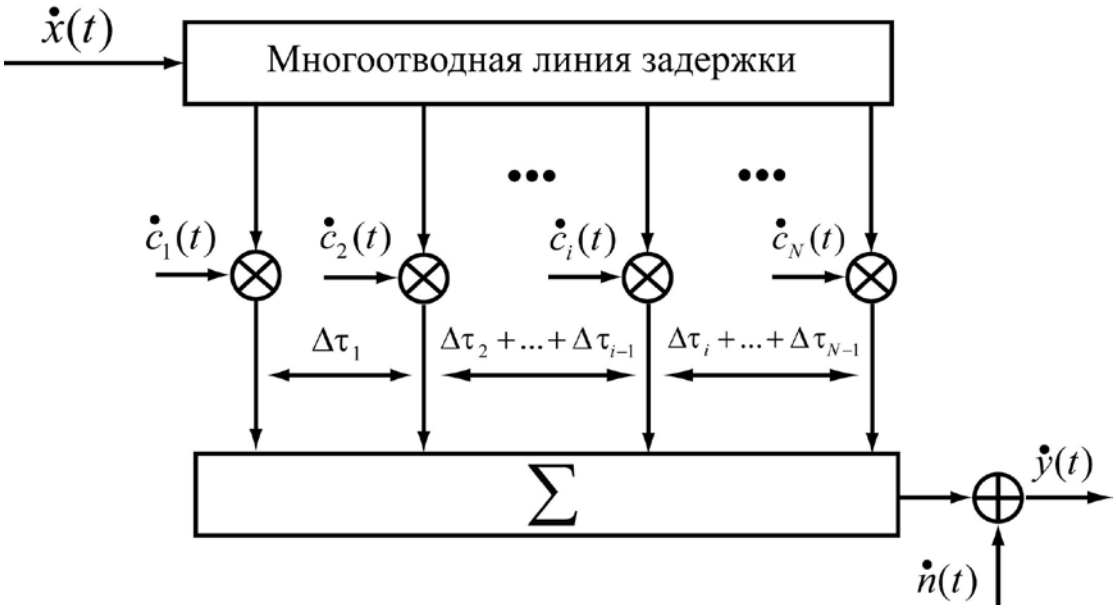


Рис. 1. ***Структурная схема модели Ваттерсона***

Таблица

Режимы работы имитатора узкополосного ионосферного канала

№	Широты	Режим	Взаимная задержка лучей, мс	Макс. допплеровское рассеяние $2\sigma_{si}$, Гц
1	Низкие	Спокойные условия	0,5	0,5
2		Умеренные условия	2	1,5
3		Возмущенное состояние	6	10
4	Средние	Спокойные условия	0,5	0,1
5		Умеренные условия	1	0,5
6		Возмущенное состояние	2	1
7		Возмущенное состояние для почти вертикального распространения	7	1
8	Высокие	Спокойные условия	1	0,5
9		Умеренные условия	3	10
10		Возмущенное состояние	7	30

отклонения для соответствующих функций Гаусса в спектральной плотности мощности и половина допплеровского рассеяния для обыкновенной и необыкновенной компонент.

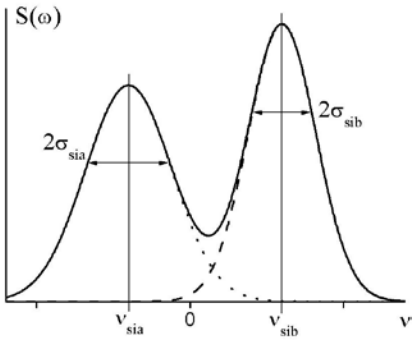


Рис. 2. ***Спектральная плотность мощности модулирующих функций***

Во время имитационного моделирования все указанные параметры, в том числе задержки между отводами, выставляются перед непосредственным моделированием и подразумеваются фиксированными. Поэтому модель воспроизводит стационарный ионосферный канал связи, что в реальности справедливо в интервале времени, как правило, не более 10 мин.

Недостатками модели Ваттерсона, которые не позволяют применять ее для широкополосного ионосферного канала, являются [16]:

1) ширина спектра сигнала не более 12 кГц (как правило, канал моделируют в полосе порядка 3 кГц);

2) пренебрежение размытием сигнала во временной области из-за дисперсионных свойств ионосферы (зависимость фазовой и групповой скоростей распространения радиоволн от частоты) и рассеяния на неоднородностях ионосферы;

3) фиксированные значения взаимных задержек между многолучевыми компонентами.

Имитаторы на базе модели Ваттерсона рекомендуются для тестирования модемов декаметрового диапазона длин волн. Порядок тестирования и стандартные режимы работы имитатора канала описаны в рекомендации ITU-R F.1487 [5]. В данном документе определяется 10 режимов работы имитатора, которые перечислены в таблице. Для всех режимов предполагаются два луча распространения, нулевой допплеровский сдвиг и одинаковые статистические характеристики случайных процессов $\dot{c}(t)$.

Результаты исследования компании Harris Corporation показали [2], что реализованные имитаторы на базе модели Ваттерсона могут приводить к различным результатам тестов КВ модемов для одних и тех же параметров модели, например, к различным значениям средней вероятности ошибки в приеме информации. Оказалось, что необходимо учитывать некоторые особенности реализации модели Ваттерсона.

Анализ литературы [11] позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время компания Harris Corporation на основе модели Ваттерсона разрабатывает имитатор ионосферного канала для сигналов с шириной спектра до 48 кГц.

2. Модель, разработанная Воглером и Хоффмайером *(Vogler, Hoffmeyer)*, представляет собой расширение модели Ваттерсона на более широкую полосу частот [6, 7]. Расширение состоит в том, что для каждого отвода линии задержки модели Ваттерсона (для каждого луча распространения) вводится изменяющаяся во времени импульсная реакция канала, которая учитывает профиль задержки для имитации размытия сигнала во времени из-за рассеяния на неоднородностях ионосферы и изменяющийся с задержкой допплеровский сдвиг [2].

Импульсная характеристика канала для одного луча имеет вид

$$\dot{h}_i(\tau,t)=\sqrt{C_{0i}T_i(\tau)}\dot{C}_i(t)e^{j\varphi_0+j2\pi f_{Bi}(\tau)t}, \quad (3)$$

где τ – задержка распространения, t – момент наблюдения, $\dot{C}_{0i}(t)$ – нормировочная константа, $T_i(\tau)$ – функция, описывающая расширение сигнала во времени (профиль задержки мощности), $\dot{C}_i(t)$ – комплексный мультипликативный шум, гауссовый случайный процесс с гауссовой или экспоненциальной корреляционной функцией, $f_{Bi}(\tau)$ – допплеровский сдвиг, который полагается линейной функцией от τ:

$$f_{Bi}(\tau)=f_{si}+b_i(\tau_{ci}-\tau). \quad (4)$$

Здесь f_{si} – допплеровский сдвиг в момент воздействия $\tau=\tau_{ci}$, τ_{ci} – положение максимума $T_i(\tau)$, значение групповой задержки распространения сигнала на несущей частоте или средняя задержка распространения сигнала в канале,

$$b_i=\frac{f_{sLi}-f_{si}}{\tau_{ci}-\tau_{Li}}, \quad (5)$$

где τ_{Li} – нижняя граница диапазона τ, f_{sLi} – допплеровский сдвиг при задержке равной τ_{Li}.

Функция $T_i(\tau)$ для каждого луча определяется выражением

$$T_i(\tau)=\begin{cases}A_i y_i^{\alpha_i}e^{\beta_i(1-y_i)}, & \tau\ge\tau_{Li},\\ 0, & \tau<\tau_{Li},\end{cases}$$
$$y_i=\frac{\tau-\tau_{Li}}{\tau_{ci}-\tau_{Li}}. \quad (6)$$

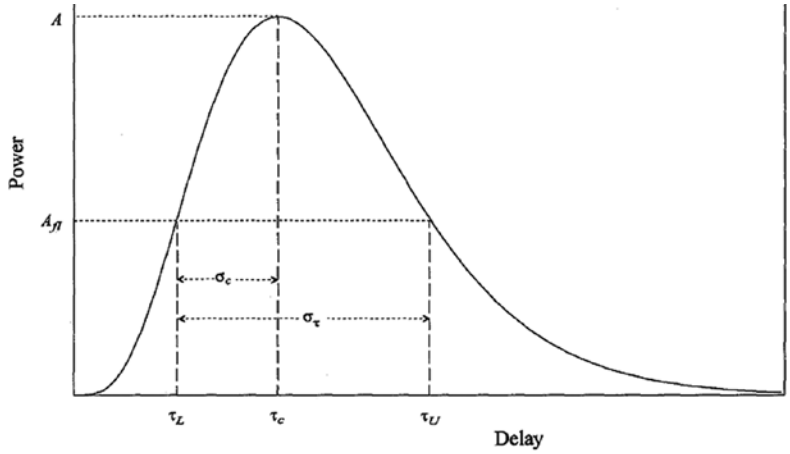


Рис. 3. ***Функция $T_i(\tau)$***

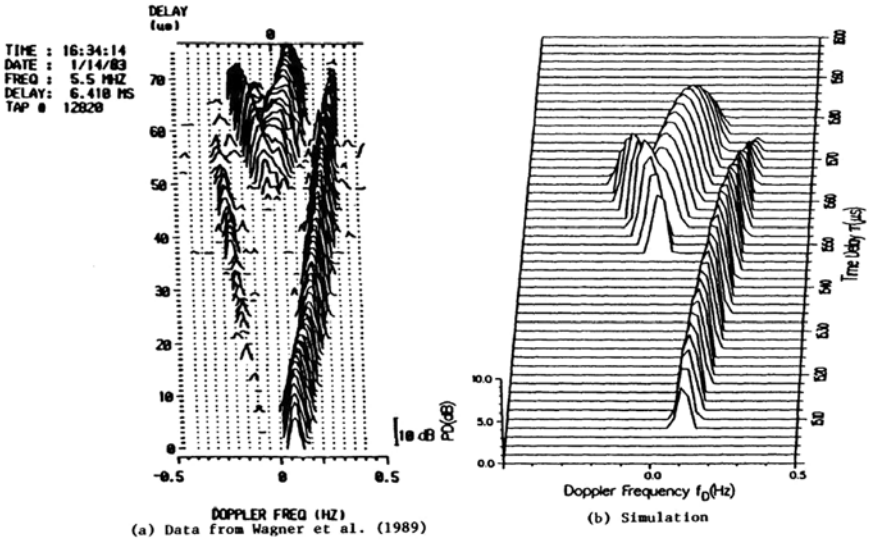


Рис. 4. ***Экспериментальная (слева) и теоретическая (справа) функции рассеяния среднеширотного широкополосного (1 МГц) ионосферного канала [7]***

Здесь α_i и β_i – параметры, влияющие на форму $T_i(\tau)$, τ_{Li} и τ_{Ui} – нижняя и верхняя границы диапазона для τ, A_i – значение функции $T_i(\tau)$ для задержки $\tau = \tau_{ci}$.

График функции $T_i(\tau)$ для $\alpha_i = \beta_i$ приведен на рис. 3. Пунктирной линией по уровню Afl показан порог чувствительности приемника.

Форма функции $T_i(\tau)$ (см. рис. 3) заимствована из работы [1], в которой опубликованы экспериментально полученные импульсные реакции ионосферного канала с полосой пропускания 20 кГц.

Модель оказалась способна воспроизводить экспериментальные функции рассеяния (функция рассеяния канала определяется как преобразование Фурье от автокорреляционной функции импульсной характеристики канала) широкополосного ионосферного канала для различных трасс и состояний ионосферы [16] (рис. 4). Экспериментальные измерения функции рассеяния были получены с помощью специального ионозонда, зондирующего ионосферу короткими импульсами с шириной спектра 1 МГц, и опубликованы в литературе [8, 9]. На рис. 3 по оси ординат отложена задержка τ, а по оси абсцисс – частота допплеровского рассеяния f_D.

В рамках проекта National Telecommunications and Information Administration (NTIA) по созданию имитатора широкополосного ионосферного канала связи были разработаны также имитационные статистические модели помех и атмосферного шума. Результат разработки имитатора канала, включающего генератор шумов и помех, опубликован в работе [3].

Достоинством модели является простота описания эффектов воздействия канала на распространяющийся в нем сигнал в широкой полосе частот и преодоление ограничений модели Ваттерсона. К недостаткам можно отнести необходимость ввода большого количества входных параметров, которые определяются из экспериментальных ионограмм [16].

3. Модель Герма, Зернова и Стрэйнджвэйса. Авторы модели, *Gherm V.E., Zernov N.N., Strangeways H.J.*, [4] предлагают двухэтапный подход к построению модели широкополосного ионосферного канала, рассматривая ионосферу как трехмерную неоднородную анизотропную среду, включающую случайные локальные неоднородности. Основная идея заключается в наличии детерминированной и стохастической составляющих в модели канала связи. Описание модели представлено в статье [16]. Первый этап моделирования – это численная или аналитическая трассировка лучей для исходной (базовой) модели ионосферы, которая может быть принята слоистой изотропной средой. При необходимости, во время трассировки лучей в исходной ионосфере, могут быть учтены анизотропия среды и горизонтальные градиенты электронной концентрации. Результатом данного этапа является построение траекторий наклонного распространения.

На втором этапе полагается, что комплексная огибающая импульсного сигнала, прошедшего через возбужденную ионосферу, описывается через интеграл Фурье в частотной области. Во время расчета комплексной огибающей импульсного сигнала используются передаточные функции канала для каждого луча распространения, полученные в результате применения метода геометрической оптики для решения волнового уравнения в невозмущенной ионосфере.

С целью учета эффектов рассеяния поля на случайных локальных неоднородностях ионосферы для каждого луча вводится дополнительный случайный комплексный множитель, статистические характеристики которого определяются с помощью расширенного на трехмерный случай метода плавных возмущений Рытова [4, 14].

Основным недостатком модели являются громоздкие математические выражения и необходимость численного расчета. К преимуществу модели можно отнести статистический учет эффектов рассеяния распространяющегося электромагнитного поля на ионосферных неоднородностях [16].

4. Модель, разработанная К.С. Яу *(K.S. Yau)* [12] специально для имитации замираний распространяющегося в ионосфере широкополосного сигнала, вызванных следующими эффектами: несоответствием поляризации принимаемого сигнала и приемной антенны из-за фарадеевского вращения векторов поляризации магнитоионных компонент (поляризационные замирания), фокусировки и дефокусировки волнового фронта из-за колебательных возмущений электронной плотности ионосферы в горизонтальной плоскости, многолучевого распространения [16, 12].

Выражения для частотной характеристики широкополосного ионосферного канала с учетом расщепления волны на обыкновенную и необыкновенную компоненту можно записать в форме

$$\dot{H}(f) = \dot{H}_o(f) + \dot{H}_x(f) = \\ = A_o(f)e^{-j\psi_o(f)} + \dot{A}_x(f)e^{-j\psi_x(f)}, \quad (7)$$

$$\psi_{o,x}(f) = \frac{2\pi}{\lambda_{o,x}} P_{total\ o,x}(f), \quad (8)$$

где $A_o(f)$ и $A_x(f)$ – АЧХ канала для обыкновенной и необыкновенной компонент, $\psi_o(f)$ и $\psi_x(f)$ – соответствующие ФЧХ канала, $\lambda_{o,x}$ – длины волн, $P_{total\ o,x}(f)$ – значения суммарной длины оптического пути. С учетом многолучевого распространения сигнала формула (2.8) запишется в виде

$$\dot{H}(f) = \sum_{i=1}^{N_r} A_{xi}(f)e^{-j\psi_{xi}(f)} + \\ + \dot{A}_{oi}(f)e^{-j\psi_{oi}(f)}. \quad (9)$$

Уравнение (9) используется для теоретического и экспериментального исследования закономерностей замираний ЛЧМ-сигнала в канале с шириной полосы частот до 200 кГц. Учет магнитного поля Земли в аналитической форме осуществляется с помощью метода частотного сдвига.

Преимуществом модели являются наличие аналитических выражений, описывающих искажения сигнала и

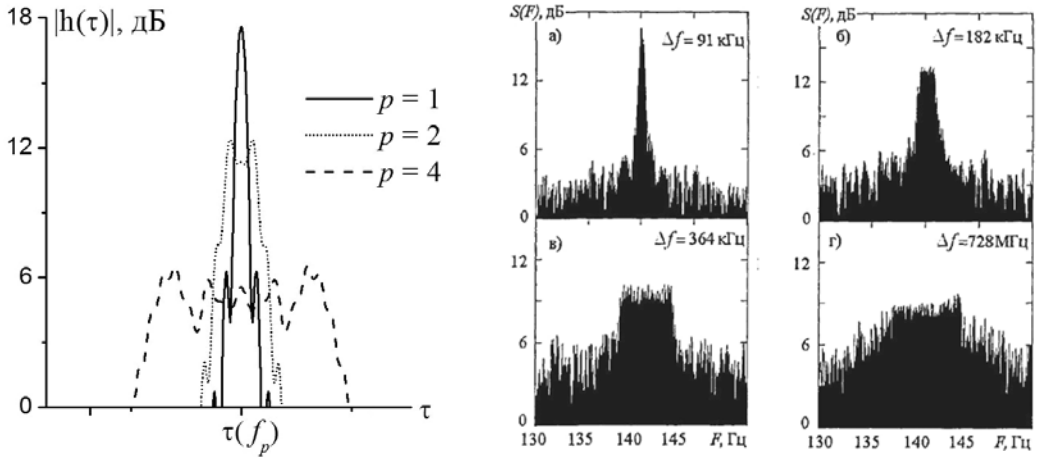


Рис. 5. ***Расчетные (слева) и экспериментально полученные (справа) импульсные реакции широкополосного ионосферного канала***

связанных с физическими параметрами среды распространения [16]. Полученные в работе [12] формулы также учитывают нестационарность ионосферы во времени. Однако необходимость построения траекторий распространения лучей требует сложных предварительных математических вычислений.

5. Модель, разработанная в МарГТУ. Сотрудники Марийского государственного технического университета (ныне – Поволжский государственный технологический университет) занимались исследованиями дисперсионных свойств ионосферы в широкой полосе частот (порядка 1 МГц). Модель, разработанная в МарГТУ, основана на передаточной функции канала с нелинейной ФЧХ, которая получается в результате аппроксимации участка прогнозируемой ионограммы полиномом частоты. С данной моделью можно ознакомиться в работе [15].

На рис. 5, где f_p – рабочая частота, p – коэффициент дисперсности, слева изображены расчетные импульсные реакции широкополосного ионосферного канала в рамках описанной модели, справа – полученные в натурном эксперименте амплитудные спектры ЛЧМ-сигнала на выходе согласованного фильтра. В работе [15] доказывается, что указанные спектры с учетом некоторой нормировки совпадают с импульсной реакцией канала. Для получения упомянутых спектров сотрудники МарГТУ использовали ионосферный зонд собственной разработки.

Преимуществами данной модели являются подробный учет дисперсионных свойств канала, которые вносят существенный вклад в искажения передаваемых широкополосных сигналов, относительная простота, учет нерегулярностей ионосферы. Среди недостатков модели можно отметить отсутствие непосредственного учета медленных замираний сигналов, связанных с изменением параметров среды [16].

6. Модель, разработанная в МТУСИ. Сотрудники Московского технического университета связи и информатики предложили свою модель широкополосного ионосферного канала, которую можно рассматривать как расширение модели Ваттерсона для случая широкополосного сигнала [16]; описание модели приведено в литературе.

Данная модель также предполагает многоотводную линию задержки, однако каждая мода распространения подвергается более сложной обработке, чем это предусмотрено в моделях Ваттерсона и Воглера–Хоффмайера. Принципиальная схема процедуры обработки отдельной моды распространения изображена на рис. 6, где N – размерность блока быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Каждая мода распространения претерпевает дисперсионные искажения и частотно-селективные замирания по следующей схеме: поступающий на вход сигнал подвергается процедуре (БПФ). К полученному спектру входного сигнала применяется нелинейная ФЧХ канала. Затем каждая из N спектральных составляющих входного сигнала умножаются на соответствующие N значений белого гауссова шума для имитации медленных замираний сигнала. После выполнения обратного БПФ (ОБПФ) находим временные отсчеты отдельной моды распространения, подверженной дисперсионным искажениями и замираниям. Для получения сигнала на выходе необходимо обработать по описанной выше схеме и сложить все моды распространения.

Мультипликативный шум предварительно подвергается двойной фильтрации (рис. 6). Первая фильтрация – параллельная фильтрация в банке из N фильтров ФНЧ 1, полоса пропускания которых выбирается такой, чтобы обеспечить заданное допплеровское рассеяние, как это делается, например, в модели Ваттерсона. Вторая фильтрация – последовательная фильтрация в фильтре ФНЧ 2, для обеспечения тре-

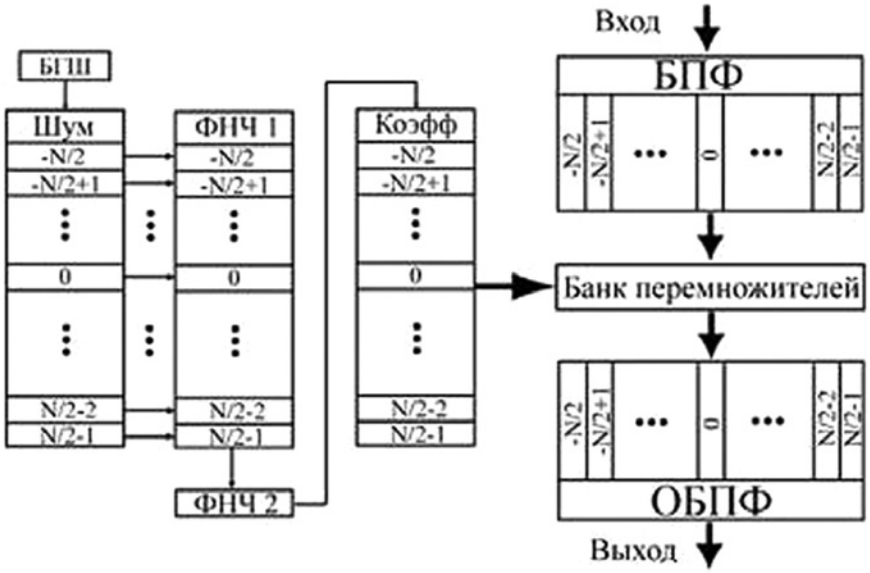


Рис. 6. ***Схема блока обработки отдельной моды распространения [16]***

буемой полосы когерентности замираний. Полоса пропускания фильтра ФНЧ 2 выбирается равной обратной величине полосы когерентности замираний. Таким образом, параллельная фильтрация обеспечивает фильтрацию компонент мультипликативного шума во времени — между последующими процедурами БПФ и ОБПФ. Последовательная фильтрация обеспечивает фильтрацию компонент в частотной области. Таким образом, в квазистатическом приближении для передаваемого через канал сигнала реализуются дисперсионные искажения и замирания с заданной полосой когерентности.

На базе предлагаемой модели в МТУСИ реализована версия модуля имитатора широкополосного ионосферного канала для системы моделирования радиотехнических систем и устройств «Спектр-2» [13].

К *достоинствам* данной модели можно отнести то, что она учитывает дисперсионные искажения и медленные частотно-избирательные замирания распространяющегося в радиоканале сигнала и при этом не требует предварительной трассировки лучей. Модель может использовать экспериментально полученные значения для полосы когерентности замираний и параметров нелинейной ФЧХ канала. Однако требуется экспериментальное подтверждение предложенной модели.

ВЫВОД

Проведенный анализ рассмотренных моделей позволяет сделать вывод о том, что для моделирования узкополосного декаметрового канала связи чаще всего достаточно и целесообразно использовать модель Ваттерсона, так как эта модель относительно проста для реализации, апробирована многими разработчиками имитаторов ионосферных каналов, а методика тестирования декаметровых модемов с использованием данной модели описана в рекомендации ITU-R F.1487.

Для моделирования широкополосного декаметрового канала связи интерес представляет модель, разработанная сотрудниками МТУСИ, так как она учитывает дисперсионные искажения и медленные частотно-избирательные замирания распространяющегося в радиоканале сигнала и при этом не требует предварительной трассировки лучей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Basler R.P., Price G.H., Tsunoda R.T., Wong T.L.* Ionospheric distortion of HF signals // Radio Science. – 1988. – Vol. 23. – № 4.– P. 569–579.
2. *Furman W.N., Nieto J.W.* Understanding HF channel simulator requirements in order to reduce HF modem performance measurement variability – [Электронный ресурс] – The Nordic HF Conference, Sweden, 2001.
3. *Lemmon J.J.* A new wideband high frequency channel simulation system / *Lemmon J.J., Mastrangelo J.F., Vogler L.E., Hoffmeyer J.A., Pratt L.E., Behm C.J.*//IEEE Transactions on Communications. –1997. –Vol. 45. –№ 1. – P. 26–34.
4. *Gherm V.E., Zernov N.N., Strangeways H.J.* HF Propagation in a Wideband Ionospheric Fluctuating Reflection Channel: Physically Based Software Simulator of the Channel / /Radio Science. –2005. – Vol. 40. – № 1.
5. Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators : ITU-R F.1487. – 2000. – 11 p.
6. *Vogler L.E., Hoffmeyer J.A., Washington D.C.* A new approach to HF channel modeling and simulation. – Part I: Deterministic mode. – NTIA Report 88-240 – NTIA, 1988. – 44 p.
7. *Vogler L.E., HoffmeyerJ.A., Washington D.C.* A new approach to HF channel modeling and simulation. – Part II: Stochastic model. – NTIA Report 90-255. – NTIA, 1990. – 44 p.
8. *Bello P.A., Wagner L.S., Goldstein J.A., Meyers W.D.* The HF skywave channel: measured scattering functions for midlatitude and auroral channels and estimates for short-term wideband HF Rake modem performance //MILCOM 89 Proceedings – 1989. – Vol.3.– P. 830–839.
9. *Wagner L.S., Goldstein J.A., Meyers W.D.* Wideband probing of transauroral HF channel: Solar minimum //Radio Science. – 1988. – Vol. 23. – №4.– P. 555–568.
10. *Watterson C., Juroshek J., Bensema W.* Experimental Confirmation of an HF Channel Model//IEEE Transactions on Communication Technology. – 1970. – Vol. 18. – №6. – P. 792–803.
11. Wideband HF Channel Simulator Considerations and Validation Discussions – [Электронный ресурс]/Harris Corporation at High Frequency Industry Associations (HFIA) meeting. – 2009.
12. *Yau, K.S.* The Fading of signals Propagating in the Ionosphere for Wide Bandwidth High-Frequency Radio Systems: Ph.D. Thesis – Adelaide: University of Adelaide. – 2008. – 253 p.
13. *Аджемов С.С., Лебедев А.Н.* Пакет программ для имитационного моделирования радиотехнических систем и обработки сигналов // Отраслевая научно-техническая конференция, МТУСИ, 2007.
14. *Зернов Н.Н., Герм В.Э. , Горин Ю.А.* Дифракция волнового поля на слабых неоднородностях диэлектрической проницаемости в трехмерной плавно-неоднородной среде //Вестник СПбГУ. – 2001. – Сер. 4. – Вып. 2 (№11). – С. 32–38.
15. *Иванов Д.В.* Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 266 с.
16. *Лобов Е.М.* Современные подходы к имитационному моделированию широкополосного ионосферного канала//T-comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2010. – №11. – С. 56– 60. ■

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ МНОГОФАКТОРНЫХ РИСКОВ

С.М. Доценко, *д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ, советник ген. директора,*
Д.В. Звездарёв, *канд. техн. наук, доцент, ген. директор, АО НПО «Импульс»,*
А.А. Бенгерт, *канд. техн. наук, ген. директор ООО «СДК»,*
С.И. Биденко, *д-р техн. наук, проф., гл. эксперт АО НПО «Импульс»,*
Д.И. Якушев, *д-р техн. наук, проф.,ФГКУ ВО «СПбУ МВД России»,*
Е.А. Рылов, *канд. техн. наук, советник ген. директора,*
И.А. Полковников, *канд.* техн. *наук, зам. ген. директора–начальник НТЦ ИКС НК, АО «ПКБ «РИО», контакт. тел. +7(905) 289 4413, polkovnikovi@pkb-rio.com*

Описание морских транспортных систем включает представление всех составляющих ее сторон: транспортных средств (флота), логистической инфраструктуры (береговая портовая), средств навигации и связи, системы управления, внешней (географической) среды, экологии, материально-технического обеспечения, судостроения, судоремонта и т. д. Еще одна общая для всех транспортных объектов и процессов черта – их рисковость, обусловленная опасностями и угрозами географической, морской, метеорологической, техногенной, социальной стихий.

Транспортная система (ТС), являясь пространственно определенной и содержательно сложной организационно-технической категорией [14, 18], характеризуется двумя моментами:

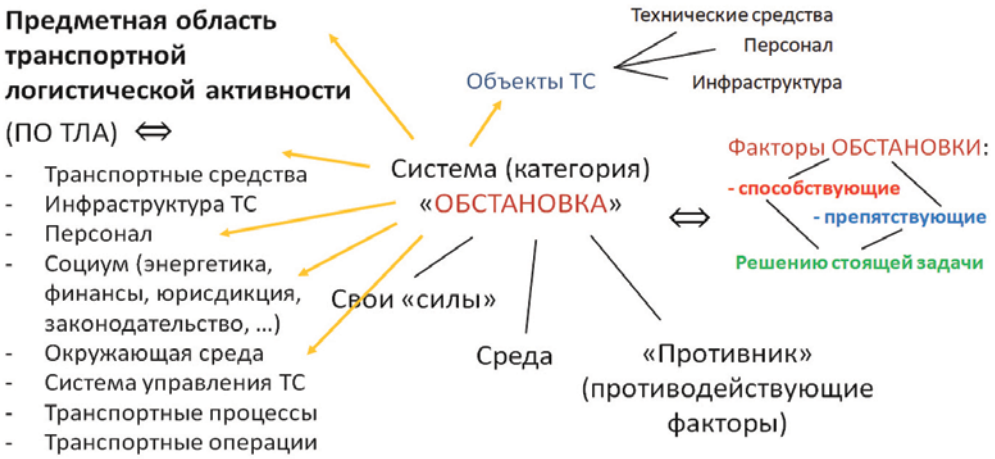


Рис. 1. ***Структура предметной области транспортной логистики***

– является территориальным объектом;
– располагается и функционирует в сложной природно-хозяйственной среде.

Это требует специальных территориальных или геоинформационных подходов к моделированию и регулированию транспортной логистики [9, 14].

Предметная область транспортной логистической активности (ТЛА) включает (рис. 1) транспортные средства (водный, железнодорожный, автомобильный, авиационный транспорт, трубопроводы), персонал, инфраструктуру и систему управления ТС, компоненты окружающей среды (ОС), факторы и ресурсы социума (экономика, финансы, правовое регулирование, ..).

Основной контролинговый инструмент, описывающий состояние и функционирование ТС,– это категория «обстановка» [12, 13, 14, 15, 18], характеризуемая внешнми и внутренними факторами и условиями функционирования ТС. Непременным всеобщим характеризующим атрибутом компонентов обстановки являются их рискологические параметры и оценки [1, 10, 19] (рис. 2).

Обстановка в системе ТЛА –это состояние логистической системы в районах дислокации объектов ТС, в определенный момент или промежуток времени, которое характеризуется совокупностью процессов и явлений природного, социального и антропогенного (техногенного) характера, оказывающих влияние на решение поставленных логистических задач. Частными случаями или составляющими обстановки для морской (водной) ТС являются логистическая, операционная, ледовая и другая навигационно-гидрографическая и гидрометеорологическая (НГГМ) ситуация.

Понятие видов или составляющих элементов транспортно-логистической обстановки приобретает законченный смысл при идентификации соответствующих факторов, характеризующих неопределенности, опасности, угрозы и риски (рис. 2) транспортных операций, так как в этом случае в полной мере осуществляется учет факторов противодействия географической (природной) и социальной среды системе ТЛА [1–3, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 16, 17, 19, 20]. При

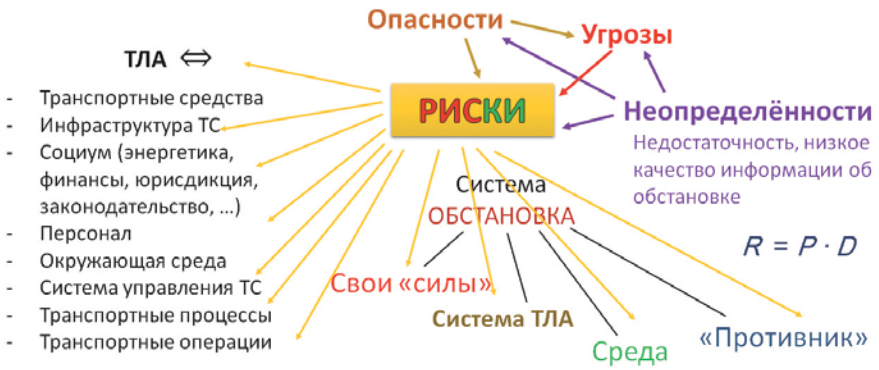


Рис. 2. ***Рискологические факторы в системе ТЛА***
R – риск (мат. ожидание ущерба), P– в ероятность наступления нежелательного события, D – величина ущерба от наступления этого нежелательного события

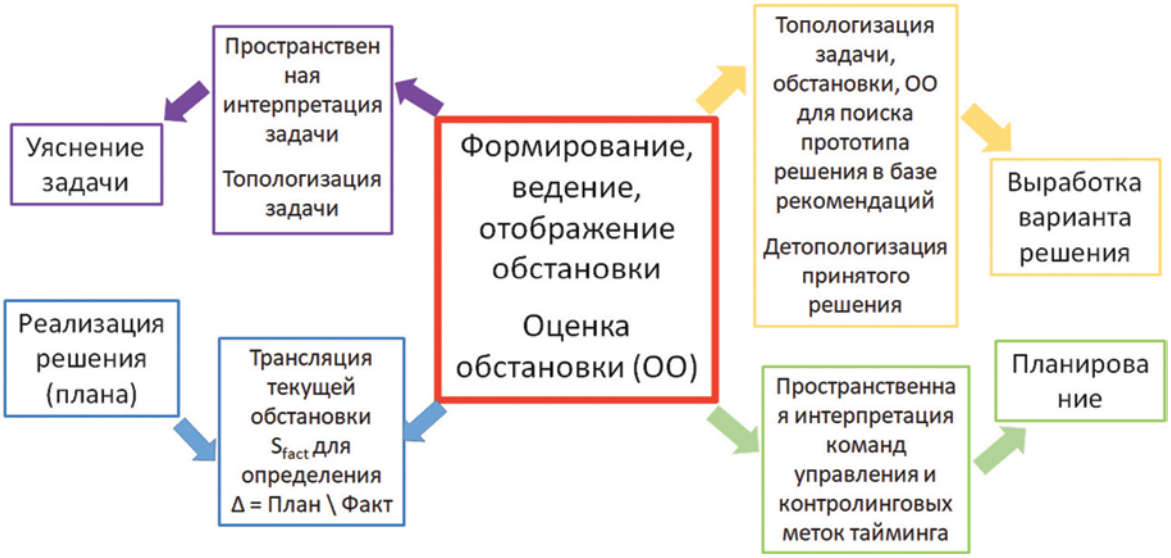


Рис. 3. ***Иллюстрация центральной базовой роли отображения и оценки обстановки в методике управления ТС***
Sfact – текущая фактическая обстановка в ТС; топологизация – переход от географически точной обстановки к ее топологическому (без географического, картографически) подобия реальной действительности (РД) образу; детопологизация – обратное топологизации: переход от топологического образа обстановки к ее географическому образу (карте); база рекомендаций – формализованное структурирование отображение содержания руководящих документов,инструкций, руководств, наставлений по рекомендованным действиям объектов транспорта в типовых ситуациях; план – решение, детализированное до уровня последовательности команд, выдаваемых на подчиненные управляемые объекты; метки тайминга – временные маркеры начала исполнения и завершения исполнения плановых команд управления; Δ – пространственно-содержательная невязка (различие) между плановой командой (что надо сделать) и ее фактическим исполнением (что реально сделано)

таком подходе констатируется наличие потенциальных затруднений (или, наоборот, позитива), обусловленных теми или иными факторами геоситуации.

В методиках атоматизированного и ручного управления ТС [12, 14, 15, 18], включающего этапы уяснения задачи, оценки обстановки, выработки рекомендаций, организации выполнения принятого решения, именно анализ (оценка) геоситуации, в отличие от всех других стадий управления (выполняются самостоятельно и в отдельности от других этапов), постоянно итерационно взаимодействует со всеми остальными процедурами.

К обстановке и ее оценке при реализации цикла управления ТС постоянно обращаются все входящие в методику другие информационно-расчетные процедуры (рис. 3).

Выводы из оценки обстановки в подавляющем большинстве уже являются элементами замысла или прототипом решения стоящей задачи.

Известно, что саму процедуру оценки обстановки детерминирует управленческая категория «задача». При выполнении оценки обстановки как раз и выявляются факторы геоситуации, которые либо способствуют, либо препятствуют решению стоящей задачи.

Риск здесь выполняет двоякую функцию (рис. 4):

– служит специфической характеристикой факторов обстановки;
– показывает степень (возможность) достижимости цели (задачи) в конкретных условиях территориальной обстановки.

Категория риска всегда относится к определенному объекту деятельности, цель которой заключается в достижении конкретного результата (решения стоящей задачи). Возможность достижения этого результата или его величина связаны с такими факторам, как:

– качества (свойства) объекта;
– условия функционирования объекта;
– способы использования объекта.

При исследовании риска чаще всего рассматривается вторая группа факторов (условия функционирования), к которым относятся природные (природно-климатические условия, географическое местоположение и т.д.); действия конкурентов или партнеров (например, возможность, характер, способы целенаправленного противодействия либо содействия); экономические, социальные, экологические и другие ограничения.

Геоинформационная поддержка управления ТС [6, 9, 14] подразумевает пространственную интерпретацию категорий и этапов управления (оценка обстановки, выработка вариантов решения, планирование и т. д.), а также придание карте свойств киберактивности [4, 9, 14].

Рискологические параметры играют особую роль при моделировании обстановки в акваториях с ограничивающими факторами (мелководье, лед, течения, сложные фарватеры и т. д. Наиболее характерный пример – акватория Арктической зоны). Это обусловлено следующим факторами:

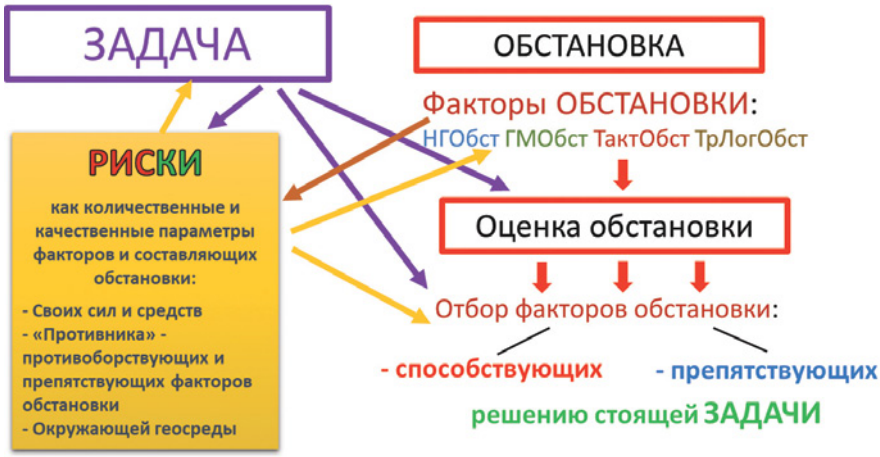


Рис. 4. ***Связь риска с категорией «задача» технологии управления территориальным объектом или системой***
НГОбст – навигационно-гидрографическая обстановка, ГМОбст – гидрометеорологическая обстановка, ТактОст – тактическая обстановка, ТрЛогОбст – транспортно-логистическая обстановка

– акватория Арктики изобилует практически круглогодичными многочисленными глобальными опасными динамическими объектами, характеризуется такими явлениями и процессам, как низкие температуры, ледовые поля, течения, малые глубины, низкая инсаляция, ионизация атмосферы, аномалии магнитного поля, ..;
– риск является всеобщей характеризующей метрикой всех объектов и процессов общей обстановки в ТС и окружающей среде (ОС);
– риск является универсальной метрикой успешности или проблематичности процессов в системе ТЛА;
– для определения рискололгических параметров морских грузоперевозок (например, в Арктической зоне) требуется оперативная обработка больших массивов динамической информации об обстановке (лед, глубины, течения, осадки и др.);
– для регулирования рисков требуется системное применение специальных методов и процедур (риск-менеджмент).

Рискологические аспекты модели обстановки в ТС связываются с тремя базовыми концепциями риска [1, 7, 8, 10, 13, 17, 20, 21]: риск как мера неопределенности, как следствие опасности или угрозы, как мера возможности (см. таблицу 1).

Для сложных морских грузоперевозок (например, арктических) в большей степени приемлемы концепции, связанные с категориями «неопределенность», «опасность», «угроза».

Неопределенность –это недостаточность сведений об условиях, в которых протекает или будет протекать деятельность, низкая степень предсказуемости, предвидения этих условий. Неопределенность, например арктической морской ТС (АМТС), определяется:
– недостаточностью данных об обстановке (см. рис. 2) в связи с отсутствием полнофункциональной системы ее освещения в Арктике;
– низким качеством имеющейся информации.

Опасность – это некий объект или явление, несущие в себе потенциальную возможность нанесения имущественного или иного ущерба субъекту определенной деятельности. Она не существует сама по себе, а проявляется как некоторое отношение (между объектами ТС, объектами ТС и ОС), детерминируемое решаемой задачей или лимитирующим условием (оценкой). Так, например, мель или банка это объекты навигационной опасности для плавания грузовых судов и в то же время перспективные районы для добывания морских биоресурсов. Другое субъективное отношение допустимая близость (расстояние) до опасного объекта. Если, например, судно находится на необходимом удалении от банки, и не существует возможности сближения с данным мелководным объектом, то для данного судна рассматриваемая мель не является опасностью.

Опасность – это потенциальный источник ущерба или затруднений. Она может проявиться, а может и нет в зависимости от отношений содержательной упорядоченности (по задачам и оценочным условиям) на множестве объектов ТС и отношения их близости к объектам из множества опасностей окружающей среды.

Угроза – это опасность, реализованная по содержательному отношению или отношению «близость».

Вероятность – мера оценки возможности наступления того или иного события. Любому фактору (объекту, процессу, явлению, событию, действию) системы (предметной области) ТЛА может быть приписана вероятностная мера, характеризующая степень его работоспособности, надежности, готовности и т.д. (вероятность столкновения, вероятность посадки на мель, вероятность попадания в зону действия тайфуна, вероятность превышения времени выгрузки/погрузки, вероятность несвоевременного прибытия в порт назначения и т.д.).

Риск – это оценка возможности реализации угрозы, соотнесенная с величиной ущерба при наступлении нежелательного события.

Предложен классический подход к измерению риска R в системе ТЛА:

$$R = P \cdot D, \qquad (1)$$

где P – вероятность наступления нежелательного события; D – величина ущерба от наступления нежелательного события. В терминах теории вероятности риск – это математическое ожидание ущерба.

Угроза (риск) навигационной ситуации (ледовая обстановка, глубины, течения, ветер, видимость ...) в геопространственном отношении характеризуются содержательными параметрами опасных зон (ОЗ) (описательные характеристики ОЗ) и их географическими (геометрическими) параметрами (собственное пространство ОЗ). Так, непосредственно зона опасности Sp_D (рис. 5) формируется, распределяется и изменяется в регионе (геопространстве) в зависимости от ряда факторов:

$$Sp_D = f(C_D, Cnt_D, V_D, CP_D, F_{EI}, t), \qquad (2)$$

где C_D – координаты ОЗ (центроид); Cnt_D – граница (контур) ОЗ; V_D – скорость перемещения ОЗ; CP_D, – содержательные параметры опасности; F_{EI} – факторы влияния окружающей среды (геосреды) на ОЗ температура, течения, ветер, волнение, осадки ...; t –момент времени.

Таблица

Базовые концепции риска и их характеристики

Концепции риска	Характеристики концепций
Риск как мера неопределённости	Связана с понятием вероятностного распределения возможных исходов некоторой операции (проекта, предприятия). При наличии неопределенности и альтернатив риск это возможность реализации худших альтернатив. Риск мера несоответствия между разными результатами решений, которые оцениваются с точки зрения их полезности или вредности, а также эффективности по критериям соответствия выбранным ориентирам: степенью неопределенности экономического результата в будущем; возможностью появления обстоятельств, обусловливающих неуверенность или невозможность получения ожидаемых результатов от реализации поставленной цели
Риск как следствие опасности и/или угрозы	Наличие н причины (опасность, угроза) негативного события. Рассматривает негативные события, которые причиняют вред. Под риском понимается возможность наступления событий с негативными последствиями, т.е. реализация предполагаемой опасности
Риск как мера возможности	Основана на взаимосвязи между риском и «преференцией». Ей соответствует понятие шанса. Риск это мера возможных потерь на пути к цели. Любое вложение ресурсов в проект с осознанной целью получить выгоду вовлекает в рассмотрение вопрос о соотношении риска и потенциального выигрыша. Последнее должно быть достаточно привлекательным для участников проекта. Чем выше рискованность вложения ресурса, тем больше должен быть оцениваемый «доход»

Рис. 5. ***Пространственно-содержательные периметры региональной зоны опасности SpD***
SpDti, SpDti+1 – границы (контуры) ОЗ на разные моменты времени tj

Сложнее и динамичнее формируются и изменяются топология и содержа-

ние рисковой зоны RSp_V территориальной системы «корабль–ОЗ» (рис. 6).

Рис. 6. ***Пространственно-содержательные параметры «относительной» RSpV рисковой (опасной) зоны***

Параметры зоны RSp_V зависят не только от физической природы и физико-географический условий региона, но и от взаимного расположения ОЗ и корабля (судна), а также от содержательно-пространственных характеристик судна его ледового класса, осадки, наличия укомплектованности и обученности экипажа, уровня запасов, состояния технических средств и систем освещения обстановки, скорости и курса судна, расстояния относительно границы ОЗ:

$$RSp_V = f((P_V, W_V), (P_{TA}, W_{TA})) = f(Sp_D, K_V, V_V, CP_V, t, A_D, F_{EI}, D_D, C_V, C_{TA}), \quad (3)$$

где P_V – вероятность инцидента с кораблем (судном); W_V – оцениваемый ущерб от инцидента с кораблем (судном); P_{TA} – вероятность нежелательного воздействия на ОС, объекты ТХА; W_{TA} – оцениваемый ущерб (негативные последствия) от нежелательного события с ОС, объектом ТХА; K_V – координаты корабля; V_V – скорость корабля; CP_V – содержательные параметры (состояние) корабля; A_D – угол встречи корабля с опасностью; D_{DV} – расстояние между кораблем и опасностью; C_V – ресурсно-«стоимостные» параметры корабля; C_{TA} – ресурсно-«стоимостные» параметры ОС и ТХА.

Еще одна тесно связанная с понятием «риск» категория это «*вероятность*» как мера оценки возможности наступления того или иного события. Любому фактору (объекту, процессу, явлению, событию, действию) системы (предметной области) ТЛА может быть приписана вероятностная мера, характеризующая степень его работоспособности, надежности, готовности и т. д. (вероятность столкновения, посадки на мель, попадания в зону действия тайфуна, превышения времени выгрузки / погрузки, несвоевременного прибытия в порт назначения и т.д.).

Относительно процессов регулирования (управления) морской логистической деятельностью риски и с вероятностной, и содержательной точки зрения являются мерами, характеризующими успешность (или проблематичность) выполнения (реализации) этапов общепринятой рекомендованной методики принятия решения, выработки рекомендаций и управления объектами флота в системе ТЛА [1, 16, 19].

Следует отметить, что транспортное средство (например, корабль или судно), с точки зрения рискологии, при осуществлении своей логистической деятельности выступает в двух ипостасях (рис. 7): как объект риска и как субъект риска.

В качестве объекта риска корабль (судно) во время рейса подвергается негативному воздействию ОС (шторм, мели, лед, плохая видимость, экстремальные температуры, аномалии физических полей Земли,..), а также ситуационной реальности (столкновение с другим судном, СНО или ГТС; попадание в объявленный ограничительный

Рис. 7. ***Субъектно-объектный дуализм рисковой природы объекта флота (корабль)***

Рис. 8. ***Объективная и субъективная ипостаси рисков в системе управления территориальной ТС***
АМТС – арктическая морская транспортная система; СУ – система управления

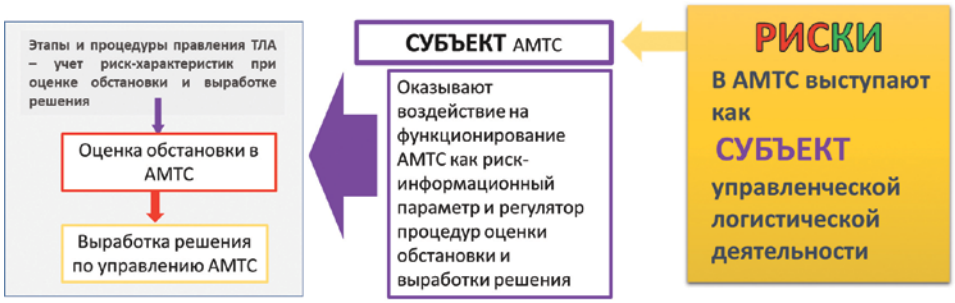


Рис. 9. ***Субъективная сущность рисков в системе управления территориальной ТС***

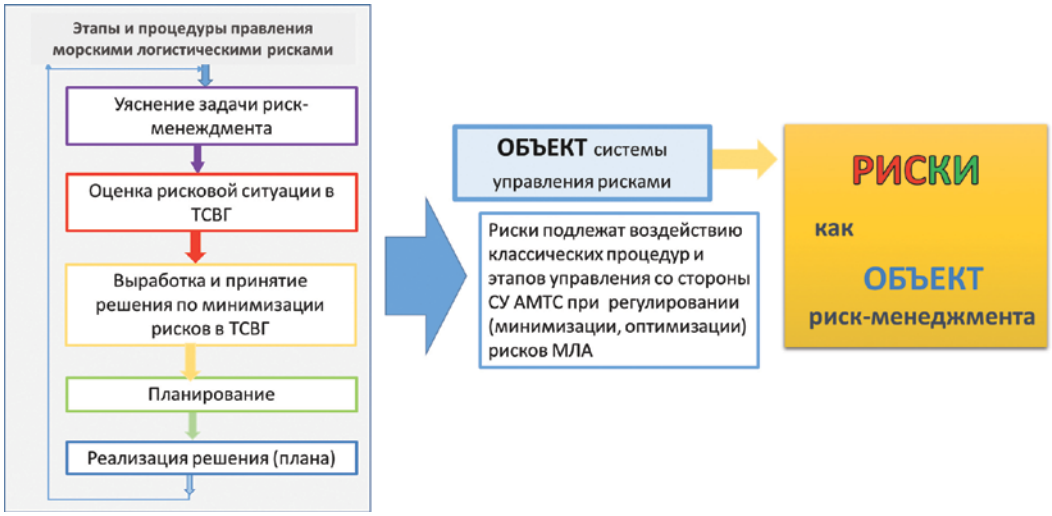


Рис. 10. ***Объективная роль рисков в системе управления территориальной ТС***

район; пиратство, терроризм, диверсия; социальные коллизии локаут, криминал, эпидемия...).

Как сложный техногенный объект, несущий на борту опасные перевозимые грузы (топливо, возможно ядерное), технические средства, корабль (судно) в случае аварии (нештатной ситуации, инцидента, коллизии) выступает в качестве субъекта риска и может нанести ущерб ОС, объектам территориальной транспортной и хозяйственной активности.

Также двойственность, или дуализм, категории «риск» возможен и в системе управления логистической транспортной активностью (рис. 8).

Здесь, с одной стороны, риски выполняют классическую функцию управления, являются специфическими риск-характеристиками обстановки при ее оценке и выработке решения (рис. 9).

С другой стороны, если на роль ведущего фактора (задачи, критерия) ТЛА выдвигается безопасность морских грузоперевозок, то риски в системе управления ТЛА начинают выступать в роли субъекта управленческой логистической деятельности (УЛД). И все процедуры и этапы управления ТЛА нацелены на минимизацию рисков морских грузоперевозок морской деятельности (рис. 10).

Исследованные рискологические параметры и представления модели АМТС могут служить для разработки автоматизированных методик и процедур специального зонирования и маршрутизации как исходные характеристики системы морской арктической логистики. Модель логистической и других составляющих обстановки в АМТС является формально-логической основой для разработки методик и алгоритмов оценки и зонирования территориальной логистической ситуации в АМТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абчук В.А.* Теория риска в морской практике.– Л.: Судостроение, 1983.– 152 с.
2. *Алексеев, Г.М.* Особые случаи морской практики.– М.: Морской транспорт, 1989. 339 с.
3. *Арикайнен А. И.* Судоходство во льдах Арктики.– М.: Транспорт, 1990. 246 с.
4. *Багров Лео.* История картографии / Пер. с англ. Н.И. Лисовой. –М.: ЗАО Центрполиграф, 2004. 319 с.
5. Безопасность плавания во льдах/ Под ред. А. П. Смирнова.– М.: Транспорт, 1993.
6. *Берлянт А.М.* Геоиконика.– М.: Астрея, 1996. 224 с.
7. *Буянов Н.Ф.* Особо опасные и чрезвычайные гидрометеорологические явления.– Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 1967. 24 с.
8. *Вейхман В.В.* Проблема определения понятия «безопасность мореплавания»// Теория и практика судовождения: Сб. науч. тр. БГАРФ. Калининград, 1995. Вып. 8. С. 96 101.
9. *Дерябин В.В.* Использование электронных картографических навигационных информационных систем.– СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2019. 160 с.
10. *Ежов Д.А., Бородин Е.Л.* О понятиях угроз, опасностей и рисков судоходства в стесненных районах плавания // Эксплуатация морского транспорта. 2023. № 4 (109) С. 5160.
11. *Лифшиц В.М.* Опасные явления на море.– М.: ВНТИЦентр, 1977. С. 11
12. Морской рейс [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ozhikharev.wixsite.com/projects (дата обращения: 05.10.2023).
13. *Ольшамовский С.Б., Земляновский Д.К., Щепетов И.А.* Организация безопасности плавания судов.– М.: Транспорт, 1979. 213 с.
14. *Панамарев Г.Е., Биденко С.И.* Геоинформационная поддержка управления сложными территориальными объектами и системами.– Новороссийск: Изд–во ГМУ, 2012. 202 с.
15. Правила разработки и проведения морских операций / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2010. 122 с.
16. *Топалов В. П., Торский В. Г.* Риски в судоходстве. — Одесса: Астропринт, 2007. 368 с.
17. *Топалов В.П., Торский В.Г., Позолотин Л.А.* Опасности для мореплавания.– Одесса: Астропринт, 2009. 238 с.
18. *Туктаров Р.Р.* Основы организации военных сообщений и воинских перевозок: Учеб. пособие.– Новороссийск: Изд-во ГМУ им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2012. 292 с.
19. *Фисенко А.И.* Риски организации судоходства в Арктике по Северному морскому пути // Транспортное дело России. 2015. № 6. С. 260 262.
20. *Цой Л.Г.* Критерии безопасности [Электронный ресурс] // Морские вести России. 2016. №14: Режим доступа: http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=63482
21. *Kuo Ch.* Management Ship Safety. LLP . LondonHong Kong, 2008. 98 p.

МОДЕЛЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АНОМАЛИЙ В ДЕМОДУЛИРОВАННОМ ТРАФИКЕ АБОНЕНТСКИХ ТЕРМИНАЛОВ VSAT

И.М. Жданова, *адъюнкт ВАС им. С.М. Будённого,*
С.С. Дворников, *канд. техн. наук, доцент кафедры,*
С.В. Дворников, *д-р техн. наук, проф., ГУАП и ВАС им. С.М. Будённого,*
контакт. тел. (812) 247 9400

ВВЕДЕНИЕ

Абонентские терминалы VSAT (англ. *Very Small Aperture Terminal*) широко используются на кораблях и судах различного класса для организации сетей спутниковой связи [1–4]. Это объясняется прежде всего простотой и удобством эксплуатации оборудования VSAT при минимальных затратах на подготовку специалистов [5]. В настоящее время цифровые модемы VSAT ориентированы в основном на работы по протоколам стандартов DVB-S и DVB-S2 [6–8]. Вместе с тем внедрение технологии DVB-S2X (англ. DVB – *Digital Video Broadcasting*) существенно раздвинуло границы практического использования земных станций типа VSAT [9–11].

Это обусловлено в первую очередь техническими возможностями стандартов на базе новой технологии, обеспечивающей устойчивую работу/ каналов связи при уровне отношения сигнал/шум (ОСШ) порядка –10 дБ при допустимой вероятности битовой ошибки не более 10^{-5} [12].

Наиболее значимыми прорывными решениями, реализованными в DVB-S2X, является возможность применения переменного кодирования и модуляции (англ. VCM – *Variable Coding and Modulation*) и адаптивного кодирования и модуляции (англ. ACM – *Adaptive Coding and Modulation*), а также сегментации по времени [13].

С одной стороны, указанные технические решения существенно повысили достоверность передачи сообщений в каналах с переменными параметрами, а с другой – способствовали созданию эффекта непреднамеренного деструктивного воздействия, приводящего к возникновению аномального информационного трафика [14, 15].

В настоящей работе исследованы условия проявления указанного эффекта и представлена модель возникновения аномалий в демодулированном трафике абонентских терминалов VSAT.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЙ СТАНДАРТА DVB-S2X

Официально стандарт DVB-S2X был принят в марте 2014 г. как дополнительное расширение широко известного стандарта цифрового спутникового телевидения DVB-S2 [10]. Реализованные в стандарте DVB-S2X новые технологии позволили повысить его эффективность по отношению к DVB-S2 примерно на 51% [16].

В основу стандарта DVB-S2X положены принципы, положительно зарекомендовавшие себя еще в стандарте DVB-S2. К таковым следует отнести реализацию способа прямой коррекции ошибок (англ. FEC – *Forward Error Correction*) [17], проверенное кодирование на основе кода с малой плотностью проверок на чётность (LDPC – *Low-Density Parity-Check*) в сочетании с БЧХ (англ. BCH – *Bose–Chaudhuri–Hocquenghem codes*) в качестве внешнего кода [18].

Такие решения обеспечивают дополнительное повышение помехоустойчивости приема от 5 до 10% в дополнение к 20, 25 и 35%, уже обеспечиваемых стандартом DVB-S2. Авангардным решением стандарта DVB-S2X стали более точная градация режимов кодирования и увеличение используемых модуляционных форматов высоких порядков, таких как 64/128/256APSK (APSK – *Amplitude and Phase-Shift Keying*) [12].

В соответствии с ГОСТ Р 59807–2021 [19] в стандарте DVB-S2X определено 39 разновидностей сочетания вида модуляции и типа кодирования, обеспечивающих только для FECFRAME в 61 560 бит возможность работы при ОСШ от –2,85 дБ (вид передачи – QPSK 2/9) до 19,57 дБ (вид передачи – 256APSK 3/4). (Здесь QPSK – *Quadrature Phase Shift* Keying) [20].

Такой подход, основанный на технологии ACM, позволил совместно объединять нескольких каналов на различных несущих частотах, что способствовало повышению эффективности совместной передачи в приложениях статистического мультиплексирования (DTH – *Direct-To-Home*) [21, 22]. Кроме того, протоколы стандарта DVB-S2X позволяют использовать различное кодирование на длительности кадра, когда заголовок, содержащий адресную часть, и синхропосылки кодируются более помехоустойчивым кодом, чем информационный контент [21, 23].

Вместе с тем рассмотренные технические решения как раз и приводят к возникновению эффекта непреднамеренного деструктивного воздействия. Это объясняется тем, что в результате нарушения, например, условий электромагнитной совместимости (ЭМС) [24, 25], наличие непреднамеренных излучений стороннего источника приведут к подавлению информационной части пакета при сохранении требуемой достоверности приема его служебной части. А поскольку в этом случае служебная информация будет сохранена, то информационная часть будет демодулирована. Но в виду ее формального подавления вложенная информация будет воспроизведена неверно.

Учитывая энергетическое нарушение допустимой величины ОСШ, демодулированная информационная часть пакета будет содержать длинные серии повторяющихся комбинаций «0» и «1». Для лучшего понимания возникающего эффекта на рис. 1 показано сигнальное созвездие 32APSK [12].

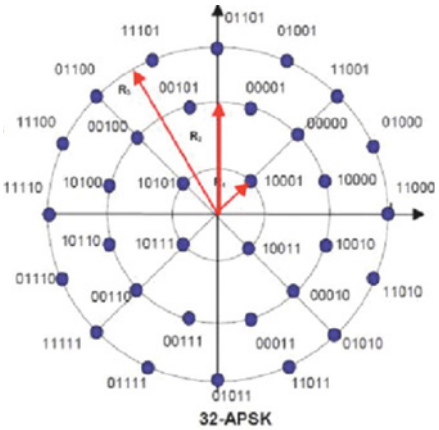


Рис. 1. ***Сигнальное созвездие 32APSK***

Так, при энергетическом превосходстве мешающего сигнала демодулятором будет приниматься решение в пользу комбинаций синфазной и квадратурной составляющих с большей амплитудой, поэтому на его выходе появятся преимущественно комбинации, соответствующие внешнему кругу сигнального созвездия (01101, 01001, 11001 и т.д). Такие серии повторяющихся значений демодулированного трафика в [14] определены как аномалии.

Сложность рассматриваемой ситуации обусловлена тем, что правильный прием адресной (служебной) части пакета не позволит сразу принять однозначное решение о наличии внешнего деструктивного воздействия.

МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АНОМАЛИЙ ТРАФИКА

К терминалам VSAT относят оборудование для организации спутниковой связи, технические характеристики которого удовлетворяют требованиям, определяемым Рек. МСЭ-Р S.725 «Технические характеристики VSAT» [26, 27].

Такие терминалы, как правило, оборудуются антенными системами с диаметром тарелки порядка 1,8...3,5 м. В ряде случаев размеры антенн VSAT могут достигать до 6 м в диаметре.

Компактность оборудования VSAT позволяет осуществлять его установку с высокой плотностью на относительно небольших территориях, что может привести к нарушению условий ЭМС [24]. Данному обстоятельству способствует и доступность оборудования VSAT для пользователей.

Вместе с тем контроль и управление оборудованием VSAT при их работе в сетях осуществляются централизованно (рис. 2).

Однако нередко могут использоваться и местные станционные системы контроля и управления.

Поскольку в терминалах VSAT преимущественно используют маломощные передатчики до 20 Вт, на практике пользователям указанного оборудования доступны не все возможности стандарта DVB-S2X.

Как правило, ограничиваются передачами 32APSK-L (32-кратная амплитудная и фазовая манипуляция (англ. *32-ary Amplitude and Phase Shift Keying-QuiserLinear*), и работой на частотах 14/11–12 ГГц в пределах Ки-диапазона. В таких условиях стандарт DVB-S2X обеспечивает скорость передачи порядка 8 Мбит/с для видеосервиса разрешения высокой четкости (англ. HD – *High Definition*), обеспечиваемого кодеком MPEG-4 [19].

Применение технологии VCM открывает возможность при использовании каналов с низким качеством снижать скорость до 1 Мбит/с, что предусмотрено ГОСТ Р 59807–2021 [19].

Проведенный анализ особенностей функционирования терминалов VSAT в сетях космической связи и возможностей стандарта DVB-S2X позволил определить в качестве исходных данных для оценки условий возникновения аномалий величину спектральной эффективности используемых каналов γ и допустимое значение ОСШ h^2, представленные в табл. 1 и табл. 2 [19].

В табл. 1 и табл. 2 цифровые значения после вида модуляции x/x обозначают скорость кода, а буква L указывает на то, что передача оптимизирована для работы в квазилинейных каналах.

Согласно данным табл. 1, при модуляции QPSK различия в помехоустойчивости от выбранного кодирования достигают 4,3 дБ. То есть если в канале с переменными параметрами используется режим VCM, при котором для модуляции QPSK служебная часть пакета кодируется кодом со скоростью 2/9, а информационная часть – 11/20, то условия возникновения аномалий наступят, если суммарное значение отношения сигнал/

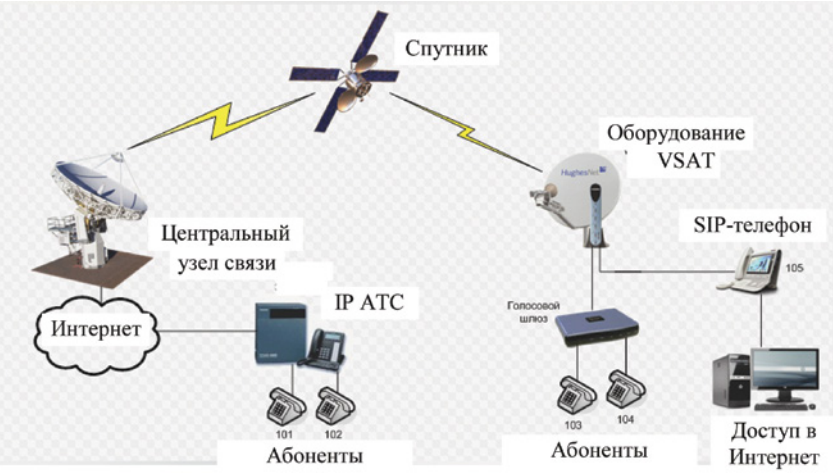


Рис. 2. ***Организационная структура построения сетей на основе VSA***

Таблица 1

Характеристики стандарта DVB-S2X для передач QPSK и 8APSK

Вид модуляции	QPSK 2/9	QPSK 11/20	8APSK 5/9-L	8APSK 26/45-L
γ	0,434841	1,088581	1,647211	1.713601
h^2, дБ	–2,85	1,45	4,73	5,13

Таблица 2

Характеристики стандарта DVB-S2X для передач 15APSK и 32APSK

Вид модуляции	16APSK 1/2-L	16APSK 77/90	32APSK 2/3-L	32APSK 7/9
γ	1,972253	3,386618	3,289502	3,841226
h^2, дБ	5,97	11,99	11,10	13,05

(шум + помеха) будет лежать в пределах от h^2 = –2,85 дБ – 1,45 дБ.

Соответственно, для модуляции 8APSK рассматриваемые условия наступают при h^2 от 4,73 до 5,13 дБ. Для модуляции 16APSK допустимый интервал в 6,02 дБ начинается с h^2 = 5,97 дБ, а при 32APSK условия возникновения аномалий наступают, если 11,1 дБ < h^2 < 13,05 дБ.

В целях практического применения полученных значений необходимо оценить энергетический потенциал, обеспечиваемый на линиях космической связи с использованием терминалов VSAT. С этой целью предлагается следующая модель энергетической оценки, характеризующая ситуацию возникновения аномалий в демодулированном трафике информационной части принимаемых пакетов.

Согласно [27], уровень шумов в точке приема будет определяться как

$$P_{ш} = kT_{э}\,\Delta f_{ш}, \qquad (1)$$

где $\Delta f_{ш}$ – шумовые полосы частот приёмных устройств; h^2 – ОСШ; k – постоянная Больцмана ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ [Вт/(Гц град)] (–228,6 дБВт/КГц); $T_{э}$ – эффективная температура, характеризующая полную мощность шумов, воздействующих на вход приемного тракта терминала VSAT.

В свою очередь эффективная температура

$$T_{э} = T_{а}\eta_{пр\,а} + T_{в} + T_{ш}, \qquad (2)$$

где $T_{а}$ – эквивалентная шумовая температура антенны; $T_{в}$ – эквивалентная шумовая температура антенно-волноводного тракта; $\eta_{пр\,а}$ – коэффициент полезного действия антенно-волноводного тракта приемной антенны.

Шумовая температура приемника $T_{ш}$ оценивает внутренние шумы, пересчитанные к его входу. Значение $T_{ш}$ может быть выражено через коэффициент шума $n_{ш}$, который рассчитывается следующим образом:

$$T_{ш} = T_{0}(n_{ш} - 1). \qquad (3)$$

Здесь T_{0} = 290 К – абсолютная температура среды, в которой работает приёмник.

В свою очередь эквивалентная шумовая температура антенны $T_{в}$ определяется углом места, уровнем приема космического излучения, атмосферы и Земли, а также собственными шумами и уровнем коэффициентом, учитывающим прием по задним лепесткам, величина которого лежит в пределах от 0,2 до 0,4 и составляет порядка 15 К.

Результирующий уровень спектральной плотности шума составит N_{0} = –204,3 дБВт/Гц.

Шумовая полоса частот $\Delta f_{ш}$ зависит от вида модуляции и скорости передачи и определяется требованиями норм 19-02 «Нормы на ширину полосы радиочастот и внеполосные излучения». Так, для передач с QPSK и APSK указанная полоса частот может быть рассчитана как

$$\Delta f_{c} = (1{,}25 \div 2)R, \qquad (4)$$

где R – информационная скорость передачи.

Тогда для скорости R = 1 Мбит/с, и наихудшего случая получим Δf_{c} = 2 МГц (63,0 дБГц).

В итоге суммарный уровень мощности шума в приемном тракте терминалов VSAT может достигать $P_{ш}$ =–139,3 дБВт.

На практике, согласно [27], реальное значение сигнала в канале приема для терминалов VSAT обеспечивается на уровне P_c = –140,2 ... –136,2 дБВт, т.е. значение ОСШ составляет h^2 = 1 ... 6 дБВт.

С учетом данных табл. 1 и табл. 2, наиболее вероятными для стандарта DVB-S2X при использовании оборудования VSAT будут передачи на основе модуляции QPSK 8APSK 16APSK.

Следовательно, условия, приводящие к возникновению аномалий трафика, будут наблюдаться при уровне сигналов сторонних средств в точке приема в интервале от –138 до –133 дБВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показывает, что при нарушении условий ЭМС возникает ситуация, при которой излучения сторонних радиоэлектронных средств с относительно небольшим энергетическим потенциалом на уровне порядка –135,5 ± 2,5 дБВт могут выступать как деструктивное воздействие для абонентов сетей VSAT.

Указанное явление особенно опасно при использовании режима VCM стандарта DVB-S2X. Возможность достоверного приема адресной преамбулы формируемых пакетов приводит к тому, что в информационной части, защищенной более быстрым, но менее помехоустойчивым кодом, будут возникать аномалии, проявляемые в периодическом повторении кодовых комбинаций битов, соответствующих верхнему уровню сигнальных конструкций.

Такая ситуация особенно опасна для линий VSAT, организуемых на судах, поскольку отсутствие явных признаков нарушения связи не позволяет оперативно принять соответствующие меры. А отсутствие дополнительных телекоммуникационных средств может привести к продолжительной потери связи с кораблями.

Дальнейшее исследование авторы связывают с разработкой эффективных способов своевременного выявления аномалий демодулированного трафика в сетях VSAT [28, 29].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гаврилов А.А., Прищепа И. Н., Прорешкин А. В.* Анализ способов построения антенных систем морских терминалов мобильной спутниковой связи с зеркальными антеннами // Электросвязь. – 2022. – № 6. – С. 26–33. – DOI 10.34832/ELSV.2022.31.6.004. – EDN ZJTKQS.
2. *Васильев И.* Цифровая оптимизация судоходства и спутниковая связь // Технологии и средства связи. – 2020. – № S1. – С. 66–68. – EDN TENUFQ.
3. *Макаренко С. И.* Описательная модель системы спутниковой связи Inmarsat // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 4. – С. 64–91. – DOI 10.24411/2410-9916-2018-10404. – EDN YPVHPV.
4. Помехозащищенность абонентских терминалов малых спутниковых станций в режиме телефонии / *Бестугин А. Р. , Дворников С. В., Дворников* С. С. и др. // Радиотехника. – 2024. – Т. 88. – № 4. – С. 142–148. – DOI 10.18127/j00338486-202404-14. – EDN DYCBEU.
5. *Кузьмичев А. П.* Об экспериментальном арктическом рейсе НЭС «Михаил Сомов», оборудованного морской станцией VSAT // Российские полярные исследования. – 2012. – № 3(9). – С. 31–33. – EDN PFQXVD.
6. *Кислов К. В.* Связь и информационный обмен на морском транспорте // Вестник Морского государственного университета. – 2013. – № 58. – С. 24–28. – EDN VRVETH.
7. *Смоленцев С.В., Шахнов С.Ф., Буцанец А.А.* Сетевые аспекты передачи данных из морского автономного надводного судна в центр дистанционного управления и обратно // Электронные информационные системы. – 2024. – № 1(40). – С. 5–18. – EDN AWZQNZ.
8. *Быховский М.А.* Анализ международного стандарта DVB-S2, определяющего параметры современных систем спутниковой связи // Цифровая обработка сигналов. – 2020. – № 1. – С. 18–25. – EDN BCMCUR.
9. *Захаров А.А., Лаврентьев М.В., Волгаткин К.М.* Реализация технологии коммутации лучей в рамках стандарта DVB-S2X Annex E для VSAT-сетей нового поколения // Электросвязь. – 2022. – № 8. – С. 18–24. – DOI 10.34832/ELSV2022.33.8.002. – EDN RGGNRA.
10. *Коломенский К. Ю., Демидова А. Ю., Казаринов А. С.* От DVB-S к DVB-S2X: прогресс в стандартизации систем цифрового спутникового вещания // Изв. вузов России. – Сер. Радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27. – № 2. – С. 68–78. – DOI 10.32603/1993-8985-2024-27-2-68-78. – EDN SUBWTQ.
11. *Белов А.С., Алдошин А.И., Абакумова А.Ю.* Отечественные модемы земных станций спутниковой связи // Электросвязь. – 2020. – № 1. – С. 27–36. – DOI 10.34832/ELSV.2020.2.1.004. – EDN ZUIMIZ.
12. *Куликов Г.В., Ханг Д. С., Стариковский А. И.* Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией на фоне частотно-манипулированной помехи // Вопросы радиоэлектроники. – Сер.: Техника телевидения. – 2022. – № 4. – С. 44–51. – EDN UVASSE.
13. Research and Implementation of the Transmission Efficiency of LEO Remote Sensing Satellite Based on Variable Coding Modulation / *Jie He. , Lei Sh., Wei Q. et al.* // Journal of Physics. – Conference Series. – 2022. – Vol. 2289. – №. 1. – P. 012005. – DOI 10.1088/1742-6596/2289/1/012005. – EDN LPQCWF.
14. *Жданова И.М., Дворников С.С., Дворников С.В.* Обнаружение аномалий трафика на основе обработки их фреймовых вейвлет-преобразований //Тр. учебных заведений связи. –2024. – №10(5). – С.14–23. https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-14-23. EDN: BJFZSE
15. Формирование векторов признаков для систем видеонаблюдения / *Васильева Д.В., Дворников С.С., Толстуха Ю.Е. и др.* // Вопросы радиоэлектроники. – Сер.: Техника телевидения. – 2023. – № 4. – С. 62–68. – EDN NZSBEJ.
16. Newtec M6100 Broadcast Satellite Modulator (R2.6). //Rev.1 – 2015. – 02.
17. *Вдовин С.* Алгоритмы прямой коррекции ошибок и особенности их применения. Турбокод // Компоненты и технологии. – 2016. – № 11(184). – С. 76–79. – EDN ZRTEYZ.
18. *Дворников С.В., Устинов А. А., Дворников С.С., Ишин Д.М.* Анализ эффективности блоковых кодов// Вопросы радиоэлектроники. – Сер.: Техника телевидения. – 2011. – № 1. – С. 63–73. – EDN NXCYST.
19. ГОСТ Р 59807–2021. Телевидение вещательное цифровое. Приемник-декодер расширенной системы второго поколения спутникового вещания (DVB-S2X). Основные параметры. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 15 с.
20. *Дворников С.В., Овчинников Г.Р., Балыков А.А.* Программный симулятор ионосферного радиоканала декаметрового диапазона // Информация и космос. – 2019. – № 3. – С. 6–12. – EDN CGVGIJ.
21. ETSI EN 302 307-2: Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications. – Part 2: DVB-S2 Extensions (DVBS2X).
22. *Дворников С.В.* Упрощенное представление модели Hata для расчета затухания сигнала на открытых трассах// Информация и космос. – 2017. – № 3. – С. 6–10. – EDN ZGWHNB.
23. Исследование субканальных шумов сигналов, сформированных по технологии ортогонального частотного мультиплексирования / *Бестугин А. Р., Дворников С. В., Крячко А. Ф. и др.* // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2018. – № 3. – С. 123–129. – EDN VAIBLL.
24. *Скрынников В.Г.,* Пальцин *Д.А., Девяткин Е.Е.* Особенности оценки условий ЭМС для сетей 5G/IMT-2020 // Электросвязь. – 2019. – № 5. – С. 22–27. – EDN SISUSN.
25. *Дворников С.В., Г. А. Фокин А.Х., Аль-Одхари, Федоренко И. В.* Оценка влияния свойств сигнала PRS LTE на точность позиционирования// Вопросы радиоэлектроники. – Сер.: Техника телевидения. – 2017. – № 4. – С. 94–103. – EDN YQWNLJ.
26. *Ермилов В.Т.* VSAT в России и за рубежом: сравнительный анализ норм и требований // Электросвязь. – 2009. – № 5. – С. 20–23. – EDN KXPPYR.
27. *Селиванов С. В., Дворников С. С., Ибрагимов А. Р., Дворников С. В.* Энергетическая защищенность линий радиосвязи абонентских терминалов VSAT// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2024. – № 2. – С. 56–61. – EDN LIRKDG.
28. *Васильева Д. В., Дворников С. В., Якушенко С. А., Дворников С. С.* Автоматизация процедур обнаружения лесных пожаров по результатам обработки видео// Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. – 2023. – № 4. – С. 47–58. – DOI 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-47-58. – EDN TQYCOI.
29. *Васильева Д.В., Дворников С.С., Дворников С.В.* Обоснование технических требований к РЛС обнаружения малоразмерных объектов , // Вопросы радиоэлектроники. – Сер.: Техника телевидения. – 2023. – № 4. – С. 97–104. – EDN AQBXDR. ■

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ ОБУЧЕНИЯ ПИЛОТОВ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

К. С. Дементьев, *бакалавр, СПбГМТУ,*
В. Н. Кондратьев, *гл. конструктор комплексных систем,*
К. А. Смирнов, *канд. тех. наук, ген. директор, заслуженный конструктор РФ,*
АО «Морские навигационные системы»,
контакт. тел. +7 (812) 320 3840

Проведение подводно-технических работ (ПТР) неразрывно связано с использованием телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА). Оснащенность высокоточными средствами навигации и возросшая удельная мощность современных ТНПА позволяют решать с их помощью широкий спектр задач: от поисковых и инспекционных погружений до монтажных работ и прокладки подводных коммуникаций. Современный ТНПА – универсальная платформа, которая перед погружением оснащается специализированным оборудованием и инструментами для выполнения задач погружения, которые зачастую осложнены условиями плохой или даже нулевой видимости. Поэтому одним из ключевых факторов успешности выполнения ПТР является качественная подготовка пилотов ТНПА и отработка их навыков по управлению специализированным оборудованием. Таким образом, разработка тренажёров, имитирующих работу ТНПА при выполнении ПТР, – актуальная и экономически целесообразная задача.

АО «МНС» поставляет комплекты ТНПА III (рабочий класс ROV) и IV (буксируемые аппараты и донные ROV) классов на отечественные суда. Для обучения пилотов этих аппаратов и отработки их навыков при проведении подводных технических работ компанией-изготовителем ТНПА совместно с АО «МНС» разработаны тренажёры, адаптированные для заказчика. Тренажёр состоит из программной и аппаратной частей. Программное обеспечение (ПО) тренажёра построено по 2-уровневой сетевой архитектуре «Клиент-сервер».

ПО тренажёра состоит из модулей, которые имитируют:
- движение и ориентацию ТНПА в пространстве;
- работу (включая неисправности) оборудования и сменных инструментов ТНПА;
- работу щита электропитания (ЩРП) ТНПА и механизмов спускоподъемного устройства (СПУ);
- надводную и подводную среду (тип грунта дна, направление и скорость подводного течения, волнение, видимость и. т.д.);
- работу судовой гидроакустической навигационной системы (ГАНС).

Наиболее часто выполнемые ТНПА задачи условно можно объединить в «типовые сценарии» для аппарата конкретного класса. Моделирование этих сценариев на тренажёре позволяет осуществлять тренировки пилотов ТНПА.

Первую группу сценариев можно условно определить как задачи по пилотированию ТНПА:
- спуск и подъем аппарата за борт с использованием СПУ;
- расстыковка и стыковка ТНПА с устройством глубоководного погружения (УГП);
- пилотирование ТНПА в ручном и автоматических режимах;
- пилотирование донных ТНПА с использованием модулей движения на гусеницах или на полозьях;
- пилотирование ТНПА в заданном районе работ по данным, полученным от судовой ГАНС.

Тренажер позволяет готовить пилотов до приобретения ими «навыков» управления пилотированием ТНПА и манипуляторами и доведения до уровня «умение» выполнение операций с применением специализированного навесного оборудования и инструментов. Достижение этих уровней подготовки требует применения в аппаратной части тренажёра таких же пультов управления и видеостен, как и на судне-носителе (рис. 1–4).

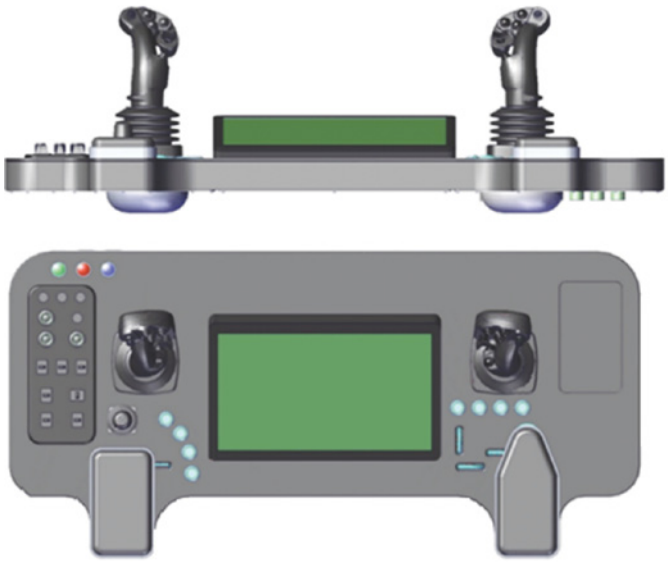


Рис. 1. ***Пульт пилота ТНПА***

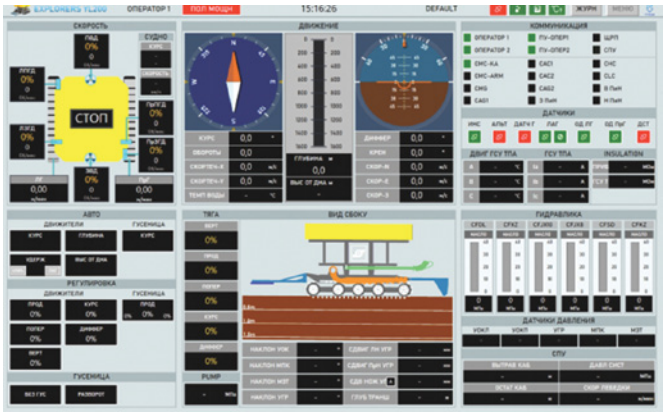


Рис. 2. ***Интерфейс ТНПА IV класса***

Вторая группа моделируемых сценариев охватывает непосредственное выполнение работ с использованием навесных инструментов или специализированного оборудования, установленного на ТНПА. Так, для подводного траншеекопателя такими задачами являются:
- поиск проложенного на дне кабеля, его заглубление с помощью устройства гидроразмыва и закапывание траншеи;
- поиск проложенного на дне кабеля и его резка;
- поиск и маркировка закопанного кабеля.

Для ТНПА III класса это:
- работы, связанные с применением сменного инструмента и тросорезов;

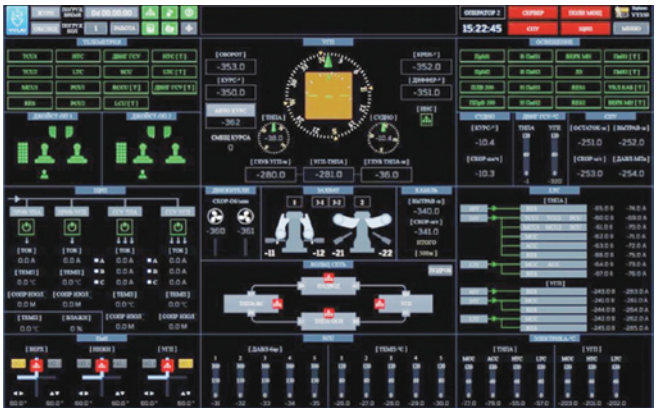


Рис. 3. ***Интерфейс ТНПА III класса***

Рис. 4. ***Интерфейс видеостены***

– управление манипуляторами, в том числе с применением копирующих джойстиков;
– проведение измерений с использованием газоанализаторов, ультразвуковых толщиномеров и т. п.

При разработке ПО тренажёра сложно имитировать большое разнообразие съемного инструмента и специализированного навесного оборудования. Поэтому отдельной задачей разработчиков является создание ПО, имитирующего только общие принципы работы такого оборудования с универсальными интерфейсами. Ниже приведены примеры интерфейсов такого ПО, имитирующего работу устройства поиска кабеля, гидролокатора и судовой ГАНС (рис. 5–7).

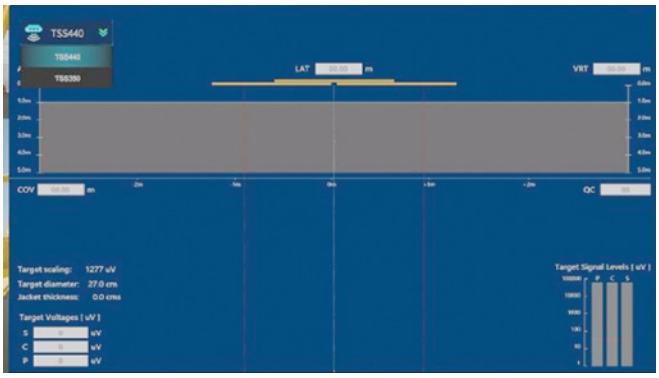


Рис. 5. ***Интерфейс устройства обнаружения кабеля***

Имитация среды, окружающей ТНПА, – важная составляющая ПО тренажёра, поэтому должна быть предусмотрена возможность настройки погодных и гидрологических условий: глубины дна, скорости течения, волнения, видимости под водой, типа грунта. Эти настройки позволяют отрабатывать навыки работы пилотов в неблагоприятных условиях.

Важной задачей является отработка действий пилотов при неисправностях оборудования. В поставляемых тренажёрах имитируются неисправности движителей, манипуляторов,

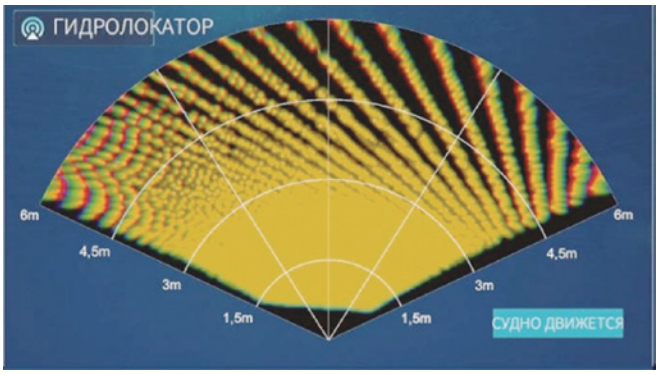


Рис. 6. ***Интерфейс гидролокатора***

Рис. 7. ***Интерфейс ГАНС***

системы освещения, видеокамер и их поворотных платформ, навесного оборудования и инструмента. Управление указанными выше настройками среды и ввод неисправностей реализовано в рамках ПО (рис. 8) рабочего места инструктора как важной и неотъемлемой части тренажёра.

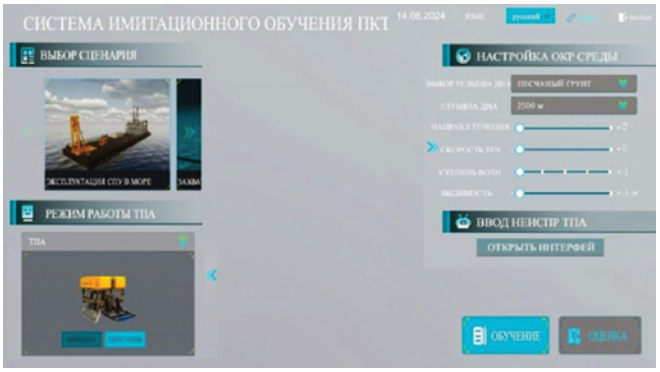


Рис. 8. ***Интерфейс ПО инструктора***

Поставляемые АО «МНС» тренажёры объективно обладают рядом ограничений:
– моделирование подводных течений выполнено в упрощенном виде без учета их изменений в разных точках имитируемой среды;
– моделирование движения ТНПА при работе со сторонними объектами не учитывает их воздействия на аппарат;
– набор инструментов и навесных механизмов ТНПА определен требованиями заказчика;
– тренажёры унифицированы для ТНПА III (рабочий класс ROV) и IV (буксируемые аппараты и донные ROV) классов. Посты управления ТНПА других классов имеют значительные отличия как в части органов управления, в особенности джойстиков, так и в части отображаемых интерфейсов.

Доработка тренажёров с целью исключения указанных ограничений возможна, но потребует увеличения трудоёмкости и, соответственно, стоимости тренажёра. ■

ТИПЫ СИГНАЛОВ, ИССЛЕДУЕМЫЕ СИСТЕМАМИ РАДИОМОНИТОРИНГА

А.Н. Киченко, *канд. тех. наук, ст. науч. сотрудник 18 ЦНИИ МО РФ, контакт. тел. (499) 728 9814, alkichenko@yandex.ru*

Интенсивное развитие радиосистем передачи информации в настоящее время характеризуется как увеличением числа систем связи, так и их многообразием. На сегодняшний день при решении таких задач, как контроль за радиоэлектронными средствами с целью обеспечения межсистемной и внутрисистемной электромагнитной совместимости систем связи, контроль радиообстановки при проведении специальных и военных операций, наблюдение за источниками радиоизлучений иностранных государств в интересах соблюдения международных соглашений и информационного обеспечения высшего военно-политического руководства страны, используется автоматизированный мониторинг.

Ситуация усугубляется тем, что в последнее время наблюдается существенное усложнение сигнальной обстановки, которое связано со следующими факторами:

- увеличение эксплуатируемых телерадиовещательных систем, систем наземной мобильной связи, систем спутниковой связи, включая системы спутниковой персональной подвижной связи;
- постоянная интенсификация использования радиочастотного спектра, при которой в одних и тех же участках спектра функционируют системы различного назначения;
- использование различных типов радиосигналов – узкополосных, широкополосных, сверхширокополосных, с фиксированным или динамическим частотно-временным распределением излучений, с различными методами модуляции;
- постоянное повышение верхней границы рабочего диапазона частот систем связи, связанное с развитием современной электронной компонентной базы;
- увеличение числа нелицензированных источников радиоизлучений с различными уровнями мощности и большим числом внеполосных излучений, не соответствующих допустимым нормам;
- использование в современных системах военной и специальной связи сигналов с повышенной энергетической и структурной скрытностью.

Вышеперечисленное делает *особенно актуальными методы обнаружения и оценки* параметров сигналов с неизвестной структурой в условиях априорной неопределенности.

Разработкой теории оптимальной обработки детерминированных и случайных сигналов, используемой в системах радиомониторинга занимались отечественные и зарубежные ученые, наиболее существенных результатов добились Р.Л. Стратонович [3], Я.Д.Ширман, В.Н. Голиков [4], Д. Мидлтон [5], К.Хелстром [6].

Существующие автоматизированные системы радиомониторинга не позволяют проводить обработку низкоэнергетических сигналов и сигналов с неизвестными параметрами, так как применяемые в них методы обработки эффективны при большой энергетике принимаемого сигнала и при наличии априорной информации о типе и параметрах принимаемых сигналов. В тоже время обработка таких сигналов является целевой задачей специальных систем мониторинга, включая космические.

Еще одним недостатком автоматизированных систем радиомониторинга является необходимость обучения и повышения квалификации обслуживающего персонала, который выполняет работу по идентификации, классификации и распознаванию входных сигналов, основываясь на собственных знаниях и опыте. Нивелировать данный недостаток можно с помощью создания автоматических систем мониторинга, что требует усовершенствования методов обработки сигналов.

Исследованию проблемы улучшения качественных характеристик и автоматизации систем радиомониторинга посвящено большое число работ отечественных и иностранных ученых. Основные тенденции развития методов цифровой обработки случайных сигналов направлены на внедрение дополнительных способов обработки с целью получения большей информации о принимаемом сигнале. В работах основное внимание уделено изучению вейвлет-анализа, фрактального анализа и обработке в нейронных сетях.

В качестве дополнительного критерия при обработке случайных сигналов можно использовать гармонический, периодически повторяющийся характер радиосигналов. Для эффективного решения задачи обнаружения и классификации необходимо исследовать интегральные характеристики всей последовательности в целом. Фрактальный анализ позволяет проводить исследования самоподобия, в том числе и последовательностей со скрытой периодичностью.

Вместе с тем в настоящее время отсутствуют разработанные методы обнаружения, фильтрации и классификации случайных сигналов, необходимые для создания автоматических систем поиска. Исследование новых методов цифровой обработки позволяет использовать их не только для контроля радиоэлектронной обстановки (РЭО), но и для улучшения качества связи как в обычных условиях, так и в сложной радиоэлектронной обстановке.

АНАЛИЗ ТИПОВ СИГНАЛОВ, ИССЛЕДУЕМЫХ СИСТЕМАМИ РАДИОМОНИТОРИНГА

Существующие системы радиомониторинга имеют обширную номенклатуру и различное исполнение: наземные, воздушные, морские, космические.

Различные системы имеют свою специфику реализации, которая касается организации антенно-фидерной системы и используемых методов обработки. Вне зависимости от исполнения все системы радиомониторинга решают одни и те же задачи и имеют схожие проблемы при их решении. Общий недостаток – слабая степень автоматизации процесса обработки входного сигнала. Кроме того, слабо распространено использование новых методов цифровой обработки сигналов, позволяющих улучшить качественные показатели систем радиомониторинга. Поэтому развитие и внедрение математического аппарата цифровой обработки случайных сигналов позволит создать автоматические системы радиомониторинга нового поколения.

Типы сигналов

1. Сигнал с полностью известными параметрами

$$s(t)=f(t-\tau_0)\cos\left[\omega_0 t+\varphi(t-\tau_0)-\theta_0\right],\ t_0\le t\le t_0+\tau_u, \quad (1)$$

$f(t-\tau_0)$ —закон амплитудной модуляции; $\varphi(t-\tau_0)$ – закон фазовой модуляции; $\cos\omega_0 t$ – колебание несущей частоты; θ_0– начальная фаза.

Известные параметры сигнала отмечены индексом 0.

2. Сигнал со случайной начальной фазой, равномерно распределенной на интервале $(-\pi, \pi)$,

$$s(t)=f(t-\tau_0)\cos\left[\omega_0 t+\varphi(t-\tau_0)-\theta\right],\ t_0\le t\le t_0+\tau_u \quad (2)$$

3. Сигнал со случайными амплитудой и начальной фазой, причем равномерно на интервале $(-\pi, \pi)$:

$$s(t)=af(t-\tau_0)\cos\left[\omega_0 t+\varphi(t-\tau_0)-\theta\right],\ t_0\le t\le t_0+\tau_u \quad (3)$$

4. Сигнал со случайными амплитудой, частотой и начальной фазой [6, 15]:

$$s(t)=af(t-\tau_0)\cos\left[\omega t+\varphi(t-\tau_0)-\theta\right],\ t_0\le t\le t_0+\tau_u, \quad (4)$$

Распространение радиосигнала $s(t)$ предполагает воздействие на него помех $n(t)$, поэтому в дальнейшем колебание $\xi(t)$, принятое на конечном временном интервале T представляет собой случайный процесс [6]:

$$\xi(t) = s(t) + n(t),\ t_0 \le t \le t_0 + T,$$

где $n(t)$ – аддитивный нормальный белый шум с нулевым средним значением.

В общем случае вид сигнала, принимаемого системой радиомониторинга, неизвестен, поэтому наиболее близким прототипом при решении задач радиомониторинга является сигнал 4, параметры которого в общем случае неизвестны.

В существующих системах радиомониторинга искусственно сужают количество различных типов исследуемых сигналов, однако данный подход тупиковый, поскольку количество систем связи постоянно растет, появляются новые типы сигналов, что ведет к усложнению общей радиоэлектронной обстановки.

МЕТОДЫ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Основные понятия адаптивной обработки сигналов. При поиске оптимальных алгоритмов обработки сигнала неизбежно приходится опираться на некоторые статистические модели сигналов и шумов. Чаще всего при формировании этих моделей используются концепции линейности, стационарности и нормальности (гауссовости). Однако перечисленные принципы далеко не всегда выполняются на практике, а от адекватности выбранной модели в значительной мере зависит качество приема сигнала. Адаптивные фильтры позволяют системе подстраиваться под статистические параметры входного сигнала.

Существует большое количество адаптивных алгоритмов, различающихся вычислительной сложностью, особенностями поведения, используемыми исходными данными и структурами самих адаптирующихся систем [16].

Важнейшим признаком классификации является наличие/отсутствие *образцового,* или *опорного, сигнала* (desiredsignal, referencesignal). При наличии такого сигнала процесс адаптации называется *обучением с учителем* (supervisedlearning). В данном случае адаптивный фильтр стремится сделать свой выходной сигнал максимально близким к образцовому сигналу. О том, что именно подразумевается под близостью сигналов, будет подробнее сказано при описании конкретных алгоритмов.

Адаптация без использования образцового сигнала называется *слепой* (blindadaptation), или *обучением без учителя* (unsupervisedlearning). Разумеется, в этом случае требуется некоторая информация о структуре полезного входного сигнала (например, знание типа и параметров используемой модуляции). Очевидно, что слепая адаптация представляет собой более сложную вычислительную задачу, чем адаптация с использованием образцового сигнала.

Наиболее распространены линейные адаптивные системы, в которых обработка сигнала проводится нерекурсивным дискретным фильтром. Одно из главных достоинств такого варианта – это то, что нерекурсивный фильтр остается устойчивым при любых значениях его коэффициентов. Однако следует отметить, что алгоритм адаптации в любом случае вносит в систему обратную связь, вследствие чего адаптивная система в целом может стать неустойчивой.

К нелинейным адаптивным системам относятся, в частности, *нейронные сети* (neuralnetworks), в определенной степени моделирующие работу нервной системы живых организмов.

Еще одна разновидность нелинейных адаптивных систем – *рекурсивные адаптивные фильтры*. Однако их создание связано с серьезными проблемами, прежде всего, с устойчивостью, поэтому такие фильтры не получили широкого распространения.

Общая структура адаптивной системы, использующей образцовый сигнал, показана на рис. 1. [17, 18].

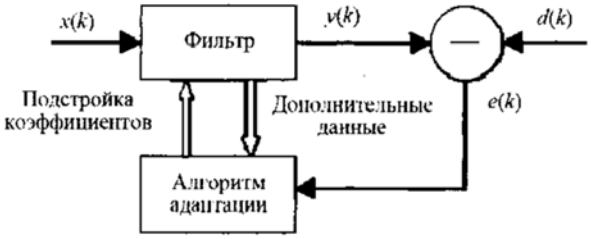


Рис. 1. ***Общая структура адаптивного фильтра***

Входной дискретный сигнал *x(к)* обрабатывается дискретным фильтром, в результате чего получается выходной сигнал *y(к)*. Этот выходной сигнал сравнивается с *образцовым сигналом d(k)*, разность между ними образует *сигнал ошибки e(к)*.

Задача адаптивного фильтра – минимизировать ошибку воспроизведения образцового сигнала. С этой целью блок адаптации после обработки каждого отсчета анализирует сигнал ошибки и дополнительные данные, поступающие из фильтра, используя результаты этого анализа для подстройки параметров (коэффициентов) фильтра.

АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ, ЧАСТО ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ПРАКТИКЕ В РАЗЛИЧНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

К их числу относятся:

- алгоритмы LMS (Least Mean Square, метод наименьших квадратов, в отечественных источниках иногда используется аббревиатура МНК);
- RLS (Recursive Least Square, рекурсивный метод наименьших квадратов, в отечественных источниках иногда используется аббревиатура РНК).

Вывод формул, описывающих данные алгоритмы, делается на основе уравнений оптимальной фильтрации сигнала. Возможны различные подходы к решению задачи оптимальной фильтрации. Статистический подход в сочетании с методом градиентной оптимизации дает алгоритм LMS, а детерминированный подход приводит к алгоритму – RLS.

Все нижеизложенное относится к алгоритмам, использующим образцовый сигнал, т. е. к обучению с учителем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные технологии радиомониторинга в спутниковых системах связи и ретрансляции: Монография/ *Тестоедов Н.А., Лавров В.И., Кузовников* А.В., *Сомов В.Г., Халиманович В.И.* – М.: Радиотехника, 2015.
2. *Кузовников А.В., Сомов В.Г., Тестоедов Н.А.* Методы обработки сигналов в системах радиомониторинга: Монография. – ???УКАЗАТЬ ГОРОД!!!Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева, 2012.
3. *Стратонович Р.Л.* Принцип адаптивного приема. – М.: Сов. радио, 1973.
4. *Ширман Я.Д., Голиков В.Н.* Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров. – М.: Сов. радио, 1963.
5. *Миддлтон Д.* Введение в статистическую теорию связи, М.: Сов. радио, 1962.
6. *Хелстром К.* Статистическая теория обнаружения сигналов. – М.: Иностр. лит-ра, 1963.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АМПЛИТУДНОГО КВАНТОВАТЕЛЯ СО СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ ПОРОГОМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОМЕХ, ВЫЗВАННЫХ ВОЛНЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ

Е.К. Самаров, *д-р техн. наук, зав. кафедрой математики СПбГМТУ, контакт. тел. (812) 757 1911, omega511@mail.ru*

Одним из главных требований, предъявляемых к цифровым устройствам обработки радиолокационных сигналов, является обеспечение постоянства среднего числа ложных отметок на выходе обнаружителя. Для этой цели широко применяется стабилизация порогового уровня при бинарном квантовании входного процесса [1]. Рассмотрим и проанализируем работу амплитудного квантователя (АК) со стабилизируемым порогом.

АНАЛИЗ РАБОТЫ АК СО СТАБИЛИЗИРУЕМЫМ ПОРОГОМ

Один из вариантов построения АК со стабилизируемым порогом (АК1) представлен на рис. 1. Сигнал с выхода амплитудного детектора (АД) приемника радиолокационной станции (РЛС) поступает на вход порогового каскада (ПК1) амплитудного квантователя АК1. С выхода ПК1 снимаются импульсы постоянной амплитуды, которые подаются на блок преобразования частоты потока импульсов превышений порога в напряжение, в данном случае пиковый детектор (ПД) [2]. Затем это напряжение сравнивается с эталонным $U_э$, и сигнал ошибки поступает на интегратор (Ин). Выходное напряжение интегратора U является порогом квантования.

АК со стабилизируемым пороговым уровнем обеспечивают заданную вероятность $P_п$ превышения помехой порогового напряжения при воздействии помех с неизвестной, но постоянной мощностью, например, шумов приемника. Для судовых радиолокационно-вычислительных систем основными помехами являются сигналы, отраженные от взволнованной поверхности моря (помехи от моря) [3]. Нестационарность эхо-сигналов от поверхности моря проявляется в изменении мощности помехи в зависимости от дальности и направления на облучаемый участок. В этом случае использование АК со стабилизируемым порогом приводит, несмотря на постоянство средней частоты ложных отметок на выходе обнаружителя, к сильной зависимости вероятности превышения порогового уровня шумов от мощности помехи на входе приемника. Как правило, это обстоятельство приводит к существенным потерям в пороговой мощности полезного сигнала, находящегося в области малой дисперсии помехи, например, на больших дальностях. Эти потери объясняются неоптимальностью АК с системой стабилизации в условиях помехи с изменяющейся мощностью и большим расхождением модели помехи, принятой при синтезе устройства, и реальной нестационарной помехи от моря.

Методы синтеза алгоритмов обнаружения сигналов в условиях изменяющейся мощности [4, 5] позволяют значительно повысить эффективность работы устройств обработки радиолокационных сигналов.

Одной из возможных процедур бинарного квантования при воздействии

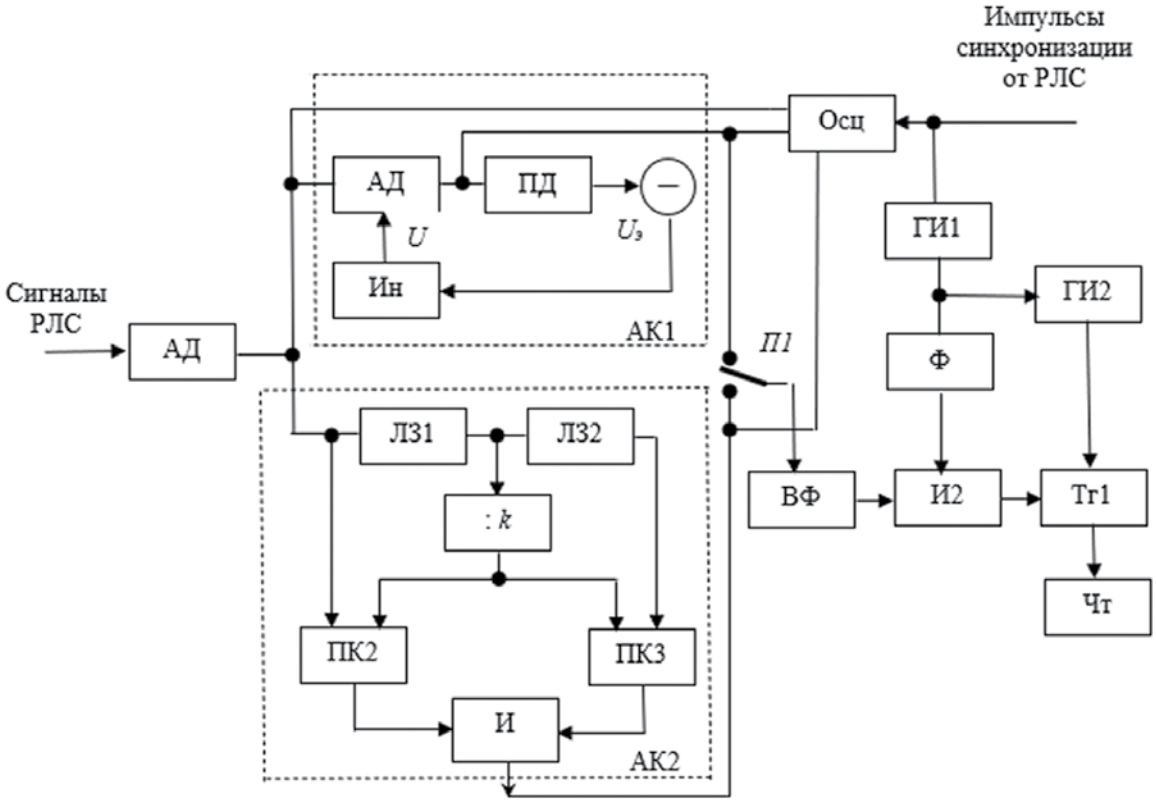


Рис. 1. ***Структурная схема экспериментальных исследований амплитудного квантователя со стабилизированным порогом***

локально-стационарной помехи является правило дискретизации, основанное на сравнении опорного отсчета в области предполагаемого сигнала x_0 со случайным порогом, образованным из ряда опорных отсчетов в области помехи $\{x_i\}_{i=1}^{n}$. При этом сигнал на выходе АК может быть записан в виде [5]

$$\varphi(x)=\prod_{i=1}^{n}U(x_0-kx_i), \qquad (1)$$

где n – число опорных отсчетов в области помехи; k – коэффициент деления, зависящий от заданной частоты ложных отметок на выходе устройства обработки; $U(x)=\begin{cases}1, & x\geq 0;\\ 0, & x<0.\end{cases}$

Такой способ квантования достаточно просто реализуется технически (см. рис. 1). В данном случае сигналы с выходов этих линий подаются на два пороговых каскада ПК2 и ПК3 таким образом, что отсчеты в области предполагаемого сигнала сравниваются с опорными отсчетами в области помехи.

Входные сигналы компараторов поступают на схему совпадения. Сигнал «1» на выходе этой схемы появится только в том случае, если отсчетов области предполагаемого сигнала превысит два отсчета в области помехи.

Расчеты характеристики АК показывают, что при использовании их в устройствах обнаружения импульсных пакетов длиной 20–30 импульсов в условиях постоянной мощности шума алгоритм (1) имеет потери по сравнению с квантованием при постоянном пороговом уровне. Величина этих потерь зависит от вероятности ложной тревоги на выходе обнаружителя и отношения сигнал–шум (ОСШ) [6–8] и составляет в среднем 1,5–3,0 дБ. Однако при воздействии помех с изменяющейся мощностью вероятность превышения случайного порога не будет зависеть от мощности процесса на входе. Это позволяет сделать предположение, что при действии помех от моря алгоритм (1) может оказаться более эффективным, чем АК со стабилизируемым пороговым напряжением.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АК

Для сравнения характеристик, рассмотренных АК при обнаружении эхо-сигналов реальных надводных целей в условиях помех от моря, использовалась установка, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Сигнал с выхода детектора РЛС подавался на вход амплитудного АК со стабилизируемым порогом и на вход АК с двумя случайными порогами АК2. С помощью переключателя П1 выходные сигналы одного из АК могут быть поданы на вход схемы временного АК.

Временной АК состоит из схемы совпадения И2, схемы выделения переднего фронта (ВФ) квантованных импульсов и триггера Тг1. На схему И2 через формирователь (Ф) подается импульс временного квантования, длительность и время задержки которого относительно зондирующего импульса определяются параметрами сигнала с выхода генератора импульсов ГИ1. Второй генератор импульсов ГИ2 служит для создания импульса, задержанного относительно сигнала ГИ1 на 5 мкс. При этом на выходе триггера Тг1 появляются импульсы длительностью $\tau \geq 5$ мкс $\tau_{кв}$, где $\tau_{кв}$ – длительность импульса временного квантования.

Такое расширение квантованных импульсов необходимо для точной фиксации частоты совпадения пересечений порогового уровня с импульсом квантования при помощи частотомера (Чт). Для визуального контроля процессов амплитудного и временного квантования на осциллограф (Осц) подавались сигналы с выхода АК, видеосигналы РЛС, а также контрольные сигналы схемы измерения.

С помощью данной установки были получены экспериментальные зависимости вероятности сигнала «1» на выходе амплитудно-временного квантователя от длительности импульса временного квантования $\tau_{кв}$ и коэффициента деления k (рис. 2, *а* и *б*), и зависимости вероятности $P_п$ от дальности до исследуемого участка (рис. 3).

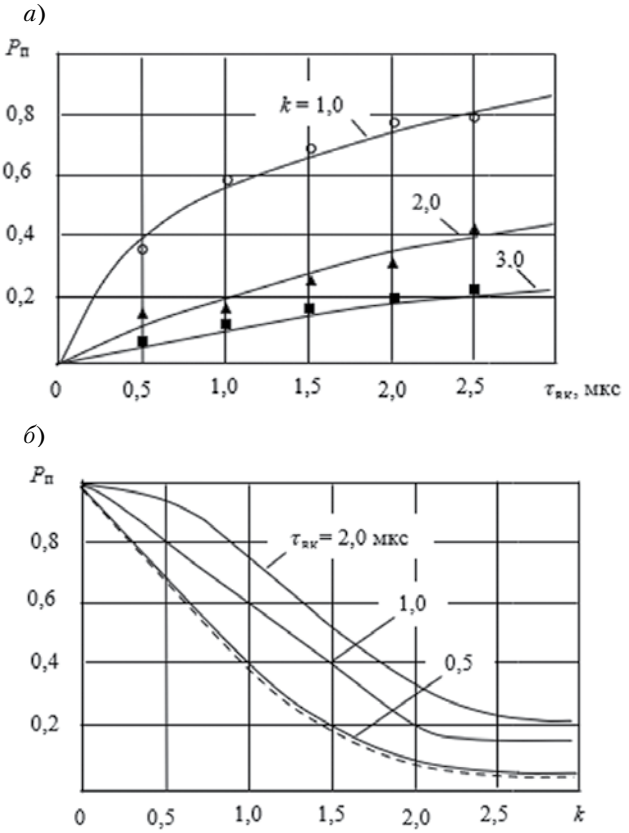


Рис. 2. ***Зависимости вероятности сигнала «1» на выходе амплитудно-временного квантователя от: а – длительности импульса временного квантования $\tau_{кв}$; б – коэффициента деления k***

Графики рис. 2, *а* получены при расположении интервала временного квантования на расстоянии 20 мкс от зондирующего импульса. Полученные кривые соответствуют характеру аналогичных зависимостей для случая квантования с постоянным пороговым уровнем на интервале времени $\tau_{кв}$ при стационарном входном процессе [4].

Сравнение экспериментально полученных зависимостей (рис. 2, *б*, сплошная линия) с теоретической кривой (пунктирная линия), рассчитанной для случая квантования в точке $\tau_{кв}$=0 показывает, что рассматриваемые зависимости полностью совпадают при $\tau_{кв}$=0,5 мкс. Этот результат позволяет выбрать длительность импульса квантования и обосновать правильность теоретического анализа амплитудно-временного АК со случайными пороговыми уровнями.

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости вероятности превышения постоянного порога и случайных порогов (n = 2) помехой, отраженной от различных участков морской поверхности.

Заметим, что средняя частота ложных отметок $\bar{N}$ за период зондирования у АК со стабилизируемым и со случайным порогом устанавливалась одинаковой. Начальный участок рис. 3 (до $\tau_з$=13 мкс) соответствует береговым объектам, находящимся на выбранном азимутальном направлении в зоне действия РЛС.

Из рис. 3 видно, что АК со случайным порогом обеспечивает значительно большее постоянство вероятности ложной тревоги $P_п$, чем АК со стабилизируемым порогом. Это объясняется тем, что система стабилизации производит усреднение отметок за время $\tau_{ст}$= 1 мс и порог в течение времени одного зондирования практически не изменяется. Поэтому в начальной области, до $\tau_з \approx 20$ мкс, этот квазипос-

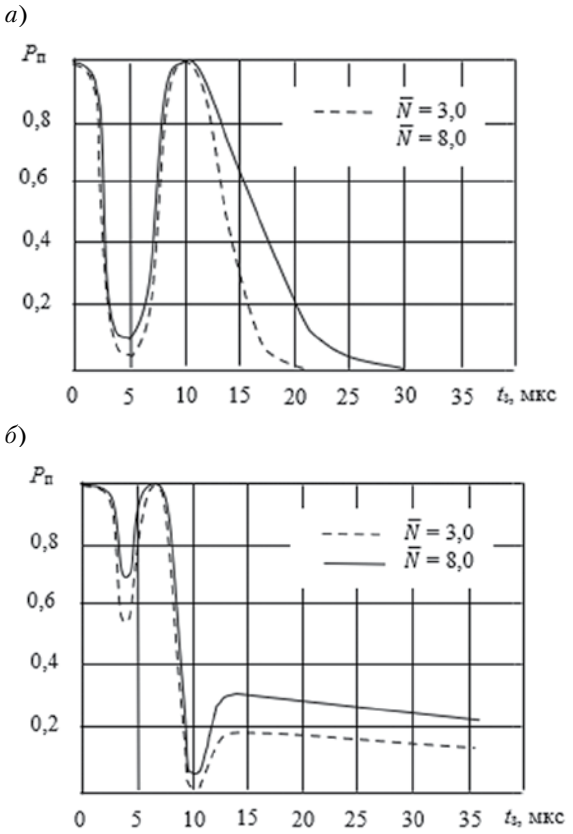


Рис. 3. ***Зависимости вероятности $P_п$ от дальности до исследуемого участка: а – квантование со стабилизируемым порогом; б – квантование со случайным порогом (n = 2)***

тоянный порог превышает помехи от моря с вероятностью, близкой к единице.

Наоборот, при больших дальностях вероятность превышения порогового уровня помехой настолько уменьшается, что даже эхо-сигнал от цели не вызывает появления отметки на выходе АК со стабилизируемым порогом.

Характеристики АК со случайным порогом слабо зависят от мощности помехи и на протяжении всего участка длительность вероятности превышения порога помехой изменяется незначительно, что, в свою очередь, обуславливает большую вероятность обнаружения целей на различных дальностях при достаточном отношении сигнал-помеха, обеспечивающим контраст отметки от цели с соседними наблюдаемыми участками по дальности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование двух способов квантования в условиях реальной радиолокационной обстановки позволило сделать вывод о целесообразности применения амплитудного квантователя со случайными порогами в устройствах автоматического обнаружения сигналов судовых РЛС при воздействии помех от волнения моря.

Выполненные экспериментальные исследования свидетельствуют, что АК с двумя случайными порогами обеспечивает хорошее выделение сигналов от целей и при сильном волнении моря. Визуальная оценка потерь информации при квантовании показала, что при квантовании со случайным порогом наблюдается значительно больше целей, чем при квантовании со стабилизируемым пороговым уровнем, что подтверждает ранее сделанные выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лихарев В.А.* Цифровые методы и устройства в радиолокации. – М.: Советское радио, 1973. – 456 с.
2. *Васильев К.К., Крамущенков В.И.* Анализ систем стабилизации порога бинарного квантования//Изв. вузов «Радиоэлектроника». – 1975. – №4. – С. 99–105.
3. Радиолокационное обеспечение предупреждения столкновений судов: методические указания для студентов очного и заочного обучения специальности 180403.65 «Судовождение» / Федеральное агентство морского и речного транспорта, Федеральное бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Волжская гос. акад. водного транспорта», Кафедра судовождения и безопасности судоходства; сост. В. П. Терехов. – Н. Новгород: ВГАВТ, 2014. – 44 с.
4. *Хансен В, Ользен Б.* Непараметрическое обнаружение сигналов с использованием обобщенного знакового критерия // Зарубежная радиоэлектроника. – 1972. – №9. – С. 38–54.
5. *Диллард Г.М, Энтоньяк С.Е.* Инвариантная относительно распределения входного сигнала, процедура обнаружения для РЛС // Зарубежная радиоэлектроник. – 1971. – №8. – С. 3–14.
6. *Artyushenko V.M., Volovach V.I., Shakursky M.V.* The demodulation signal under the influence of additive and multiplicative non-Gaussian noise. – Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2016. – Yerevan, 2017, с. 7807704.
7. *Artyushenko V.M., Volovach V.I.* Comparative analysis of discriminators efficiency of tracking meters under influence of non-Gaussian broadband and band-limited noise. – 11th International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Dynamics 2017. Proceedings. 2017, с. 1–4.
8. *Artyushenko V.M., Volovach V.I.* Synthesis and analysis of discriminators under influence of non-Gaussian nois// Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – С. 012004. ■

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К НАЗНАЧЕНИЮ УПРАВЛЯЕМЫХ СНАРЯДОВ В ЗАЛП С КОРАБЛЕЙ ТАКТИЧЕСКОЙ ГРУППЫ

О.Г. Мальцев, *д-р техн. наук, начальник НИЛ,*
АО «Концерн «Гранит-Электрон»,
контакт. тел. (812) 271 4585, 271 6774

В настоящее время одним из основных требований, выдвигаемых при проектировании средств, предназначенных для борьбы с корабельными соединениями (КС) вероятного противника, является требование преимущественного поражения главных целей в составе этих соединений. Придание приоритета оснащению кораблей ВМФ высокоточным оружием (управляемыми снарядами – УС), обеспечивающим выполнение указанного требования, – одна из стратегических задач ВМФ.

Современный надводный корабль (НК) – многоцелевой, предназначен для ведения боевых действий в составе тактических групп (ТГ). Отличительная особенность многоцелевых НК – формирование новых организационно-технических образований – информационно-боевых (ИБ) контуров, объединяющих комплексы оружия и комплексы радиоэлектронного вооружения в единую систему для решения определенных боевых задач корабля. Одним из важнейших является ИБ контур ударного управляемого оружия (УУО).

В статье исследуется задача формирования залпа УС в ТГ НК. Задача – определение минимального количества УС в залпе, достаточного для нанесения КС вероятного противника назначенного максимального ущерба, и решается на верхнем уровне ИБ контура УУО флагманского корабля. Для должностного лица, ответственного за принятие решений, организуется автоматизированное рабочее место с системой поддержки принятия решения. Результаты решения задачи формирования залпа УС используются должностным лицом для принятия решения на применение оружия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Имеется N кораблей, на которых находится некоторый ресурс n_Σ средств поражения –УС, однородных по эффективности воздействия и разнородных по возможности выделения ресурса с того или иного корабля (доставки до целей, назначаемых для поражения). На каждом корабле есть некоторый ресурс $n_\Sigma^{(k)}$, $k=1,2,...,N$ УС, готовых выполнить в заданный момент поставленную задачу, $\sum_{k=1}^{N} n_\Sigma^{(k)} = n_\Sigma$. Имеется s целей, каждая из которых в общем случае на момент решения задачи может принадлежать с известной вероятностью к одному из существующих классов. Один из кораблей является флагманским, на нем имеется вся информация о геометрическом расположении кораблей группы и целей, остальные – корабли группы.

В зависимости от расположения кораблей и целей возможны условия, при которых некоторые корабли не могут по техническим или тактическим причинам выделить ресурс на определенные цели, например нахождение цели вне разрешенного диапазона стрельбы. Возможен и ряд других вариантов, которые зависят от типа средств поражения. Учет этих условий для каждого корабля приводит к получению матрицы разрешенных траекторий $\|c_{kj}\|$, $k=1,2,...,N$, $j=1,2,...,s$, в которой ячейка $(k,j)=1$ обозначает возможность назначения средств с k-го корабля по j-й цели, а ячейка $(k,j)=0$ – запрещение назначения. Далее предполагается возможность назначения средств с любого корабля по любой цели.

Поскольку группа кораблей $\mathbf{c}_1$ обстреливает группу целей $\mathbf{c}_2$, то математически это можно сформулировать как морфизм двух множеств $\mathbf{c}_1$ и $\mathbf{c}_2$, т. е. наличие соответствия элементов одного множества элементам другого множества. Морфизм будем описывать матрицей соответствия $\mathbf{c}_{12}$, в качестве которой можно использовать ранее введенную матрицу $\|c_{kj}\|$.

Таким образом, $\mathbf{c}_1=\{c_{1k}\}$, $k=1,2,...,N$; $\mathbf{c}_2=\{c_{2j}\}$, $j=1,2,...,s$; $\mathbf{c}_{12}=\|c_{kj}\|$, $c_{kj}=1$, если k-й корабль обстреливает j-ю цель, и $c_{kj}=0$, если k-й корабль не обстреливает j-ю цель.

Если в каждой строке и в каждом столбце матрицы $\mathbf{c}_{12}$ содержится одна и только одна единица (взаимооднозначная связь), множества $\mathbf{c}_1$ и $\mathbf{c}_2$ гомеоморфны. Если в столбцах и строках стоит по нескольку единиц (каждая цель группы может обстреливаться несколькими кораблями), $\mathbf{c}_1$, $\mathbf{c}_2$ полиморфны. Если в качестве множества $\mathbf{c}_1$ выбраны УС залпа и на каждую цель назначено не менее двух УС (в каждом столбце матрицы $\mathbf{c}_{12}$ имеется несколько единиц), то множества $\mathbf{c}_1$ и $\mathbf{c}_2$ гетероморфны.

Предполагается наличие в системе целеуказания процедуры классификации целей по результатам ведения радиолокационной разведки средствами активной и пассивной локации кораблей группы. Цели классифицируются вероятностью принадлежности к существующим классам. Каждый класс целей характеризуется известным законом поражения данными средствами и противодействием залпу в системе самообороны. На основании анализа сложившейся тактической обстановки, в зависимости от поставленной задачи, а также от полноты полученной информации по действительному КС вероятного противника и результатов классификации каждой цели присваивается важность.

Задача распределения ресурса, размещенного на кораблях группы, состоит в назначении каждого УС по определенной цели. При этом должна быть обеспечена назначенная эффективность поставленной задачи в условиях конкретной тактической обстановки. Математическая постановка задачи состоит в том, чтобы найти матрицу целеназначения (ЦН)

$$\mathbf{B}=\|b_{kj}\|,\ k=1,2,...,N,\ j=1,2,...,s,$$

реализующую оптимальный вектор целераспределения (ЦР), обеспечивющий при минимальном количестве УС в залпе функции, определяющей эффективность поставленной задачи, максимальное значение не ниже назначенной величины. Здесь $b_{kj}\equiv n_j^{(k)}$ – количество УС, направляемых с k-го корабля на j-ю цель; $n_j^{(k)}\le n_\Sigma^{(k)}$, $\sum_{j=1}^{s} n_j^{(k)} = n_з^{(k)}$, $\sum_{k=1}^{N} n_j^{(k)} = n_j$, $\sum_{j=1}^{s} n_j = \sum_{k=1}^{N} n_з^{(k)} = n_з$, где $n_з^{(k)}$ – количество УС k-го корабля, назначаемых в залп; n_j – количество УС залпа, назначаемых по j-й цели; $n_з$ – количество УС в залпе.

Рассматривается задача распределения УС залпа по обороняющимся целям. В обороне современных КС последовательно участвуют следующие активные средства противоракетной обороны: истребительная авиация, зенитные ракетные комплексы (ЗРК) и зенитная артиллерия.

Указанные средства по характеру их использования можно разделить на две группы. Истребительная авиация и ЗРК дальнего и среднего радиуса действия образуют первую группу средств огневого противодействия (ОПД) – группу средств ОПД коллективной обороны, осуществляющей оборону по отражению атаки УС. Кроме участия в организации коллективной обороны каждая атакуемая цель КС имеет потенциал самообороны.

К средствам самообороны, образующих вторую группу средств ОПД, относятся ЗРК ближнего действия и зенитная артиллерия, которая в условиях рассредоточения боевых порядков из-за невозможности заградительного зенитного огня превратилась в средство индивидуальной защиты кораблей.

Перед тем как подойти к назначенным для поражения целям, УС проходят зону действия средств ОПД коллективной

обороны, где подвергаются обстрелу со стороны всех обороняющихся целей. Если в зону действия средств ОПД коллективной обороны входит $n_з$ УС, то среднее количество $n_{сб}$ УС, сбитых этими средствами, выражается формулой

$$n_{сб} = n_з\left[1-\exp\left(-\nu d / n_з\right)\right],$$

где ν – среднее количество средств ОПД коллективной обороны, d – средняя вероятность поражения УС одной единицей этих средств. Тогда νd – потенциал коллективной обороны.

По результатам формирования залпа УС (данная процедура состоит из последовательно решаемых задач ЦР и ЦН) по каждой цели в соответствии с вектором ЦР может быть либо не назначено ни одного УС, либо назначено от одного до нескольких УС. После преодоления зоны действия средств ОПД коллективной обороны в залпе останется $n_{ат} = n_з - n_{сб}$ атакующих УС.

Таким образом, в результате действия средств ОПД коллективной обороны имеют место потери среди $n_з$ УС, в том числе среди УС, назначенных по главным целям.

Задача распределения группы из фиксированного количества $n_з$ УС по группе из s неравноценных целей сводится к одноразовому выбору среди $c_{s+n_з-1}^{n_з}$ возможных векторов оптимального вектора ЦР, каждый компонент n_j которого определяет количество УС, направляемых на j-ю цель. Выбор осуществляется таким образом, чтобы максимизировать принятый показатель наносимого ущерба. Причем, это должно быть выполнено при минимально возможном количестве $n_з$, а значение показателя наносимого ущерба не должно быть меньше назначенной величины.

При залповой стрельбе УС, стартующими с носителей последовательно с некоторым интервалом времени, решается задача сбора УС в залпе по дальности и разведения УС по фронту. Тем самым обеспечивается одновременный подход всеми УС залпа к зоне действия средств ОПД коллективной обороны, что необходимо для надежного ее преодоления.

Введем в рассмотрение вектор **K**, характеризующий классы всех s целей:

$$\mathbf{K} = (K_1, K_2, ..., K_j, ..., K_s),\ 1 \le K_j \le Q,\ j = 1,2,...,s,$$

где K_j – класс цели с номером j; Q – количество классов целей.

Введем также вектор $\mathbf{n} = (n_1, n_2, ..., n_j, ..., n_s)$ ЦР, j-й компонент n_j которого представляет собой количество УС, направляемых на j-ю цель, и подчиним вектор **n** ограничению

$$\sum_{j=1}^{s} n_j = n_з;\ n_j \text{ – целые};\ n_j \ge 0\ \ \forall j = 1,2,...,s, \qquad (1)$$

где $n_з$ – количество УС в залпе.

Рассматриваемая задача в терминах теории оптимального распределения ресурсов ставится следующим образом: распределить УС залпа по целям КС так, чтобы при назначении n_j ракет по j-й цели средний ущерб, наносимый s целям залпом из $n_з$ УС, был максимальным. Для однородных средств поражения при заданном векторе **K** классов целей можно записать [1] выражение для ущерба, наносимого целям данным нарядом УС, в виде

$$U(\mathbf{n}, \mathbf{K}) = \sum_{j=1}^{s} W(K_j, j)\left\{1 - [1 - p(K_j, j)]^{n_j}\right\},$$

где $W(K_j, j)$, $p(K_j, j)$ – относительная ценность цели, имеющей номер j и класс K_j, и вероятность ее поражения одним УС соответственно.

Структура алгоритмов ЦР определяется характером используемой информации [2]. При распределении $n_з$ УС по s целям на основе определения вероятностей их принадлежности к различным классам выражение для среднего апостериорного ущерба может быть записано [2] в виде

$$U(\mathbf{n}) = \sum_{j=1}^{s}\sum_{q=1}^{Q} P(q, j) W(q, j)\left\{1 - \left[1 - p(q, j)\right]^{n_j}\right\}, \qquad (2)$$

где $P(q, j)$ – апостериорная вероятность принадлежности j-й цели к классу $q = 1,2,...,Q$.

Если цели разделяются на два класса – главных и неглавных – и учитывается ущерб, наносимый только главным целям, то при показательном условном законе поражения целей УС и независимом характере попаданий (вероятность попадания УС в одну из целей не зависит от того, были ли попадания в другие цели) выражение (2) приобретает вид

$$U(\mathbf{n}) = \sum_{j=1}^{s} P_j[1 - (1 - p_j / \omega)^{n_j}], \qquad (3)$$

где P_j – вероятность принадлежности j-й цели к классу главных; p_j – вероятность попадания УС в выбранную j-ю цель; ω – математическое ожидание количества УС, необходимое для поражения главной цели.

Вероятность p_j является оценкой защищенности j-й цели и обычно определяется произведением

$$p_j = \sigma \prod_{i \in \mathbf{J}} \gamma_{ji},$$

где σ – вероятность попадания УС в цель при отсутствии противодействия; **J** – множество индексов j; γ_{ji} – вероятность преодоления УС, направленным в j-ю цель, противодействия, организуемого i-й целью атакуемого КС.

Рассмотрим случай, когда средства ОПД распределяются по атакующим УС равновероятно, а количество попаданий этих средств, направленных на атакующий УС, подчиняется закону Пуассона. Допустимы также независимая линеаризация количества стрельб средств ОПД по прямоугольным координатам пространства и предположение о том, что вероятности γ_{ji} не зависят от вектора ЦР, а определяются лишь суммой его компонентов. Пусть (x'_j, z'_j), (x'_i, z'_i) – соответственно координаты атакуемых целей и необнаруженных целей, являющихся носителями средств ОПД, в декартовой прямоугольной системе координат $O'X'Z'$ с началом в центре атакуемого КС. При этом направление оси $O'X'$ противоположно направлению атаки УС, а ось $O'Z'$ дополняет систему координат до левой.

Примем, что необнаруженные цели распределены равномерно в прямоугольной области длиной $2x'_{обл}$ и шириной $2z'_{обл}$ с центром, совпадающим с центром атакуемого КС. Размер области существования необнаруженных целей определяется тактическими характеристиками и, в первую очередь, типом атакуемого КС. Воспользуемся аналитическим представлением вероятностей γ_{ji}, принимая $x'_{обл}$ в качестве единицы измерения для всех величин x' и $z'_{обл}$ для всех величин z'. Тогда

$$\gamma_{ji} = \exp(-w\delta_{ji} / n_з),$$

где $\delta_{ji} = \delta_1(\xi_i - \xi_j)\delta_2(\eta_i - \eta_j)$;

$$\delta_1(\xi_i - \xi_j) = \begin{cases} 0, \text{если} & \xi_{ji} < \xi_0; \\ \delta_0 \dfrac{\xi_{ji} - \xi_0}{\xi_1 - \xi_0}, \text{если} & \xi_{ji} \in [\xi_0, \xi_1]; \\ \delta_0, \text{если} & \xi_{ji} > \xi_1; \end{cases}$$

$$\delta_2(\eta_i - \eta_j) = \begin{cases} 1 - \dfrac{|\eta_{ji}|}{\eta_0}, \text{если} & \eta_{ji} \in [-\eta_0, \eta_0]; \\ 0, \text{ если} & \eta_{ji} \notin [-\eta_0, \eta_0], \end{cases}$$

где $\xi_{ji} = \xi_i - \xi_j$; $\eta_{ji} = \eta_i - \eta_j$; $\xi_\nu = x'_\nu / x'_{обл}$; $\eta_\nu = z'_\nu / z'_{обл}$; w, δ_0, ξ_0, ξ_1, η_0 – обобщенные константы, зависящие от параметров распределяемых УС и средств ОПД.

Если в группе одна главная цель, то средний апостериорный ущерб (3) имеет смысл вероятности поражения главной цели.

Ущерб должен быть максимизирован по **n** при учете ограничения (1)

$$U^* = \max_{\mathbf{n}} U(\mathbf{n}). \qquad (4)$$

Учитывая требование нанесения назначенного максимального ущерба $U_{назн}$ минимальным нарядом УС, в окончательном виде критерий оптимизации запишется как

$$n_з^* = \arg\min_{n_з}\left\{U^*(n_з) \middle| U^*(n_з) \ge U_{назн}\right\}.$$

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАЛПА УС

Поставленная задача нанесения удара УС по КС вероятного противника с заданной (разумно допустимой) эффективностью при минимальном расходе УС может быть отнесена к классу задач исследования операций [3]. Характерные черты таких задач:

– модель, правильно отражающая действительность, – найдена;
– критерий (показатель эффективности) – установлен;
– оптимальное решение – возникает единственно возможным образом.

Всякий определенный выбор зависящих от нас параметров в исследовании операций называется *решением*. Те параметры, совокупность которых образует решение, называются *элементами решения*.

Задачи исследования операций делятся на две категории: прямые (задачи анализа) и обратные (задачи синтеза). Прямые задачи отвечают на вопрос, что будет, если в заданных условиях мы примем такое-то решение? В частности, чему будет равен U – показатель эффективности. Обратные задачи: как следует выбрать элементы решения для того, чтобы показатель эффективности U обратился в максимум?

Предположим, что прямая задача решена и математическая модель позволяет вычислить величину U при любом выбранном решении и для любой совокупности условий. Обозначим $n_1, n_2, ..., n_s$ – зависящие от нас факторы (элементы решения), которые мы можем выбирать в известных пределах по своему усмотрению, т. е. $U = U(n_1, n_2, ..., n_s)$. Считается, что вид этой зависимости нам известен и с помощью математической модели можем вычислить для любых заданных $n_1, n_2, ..., n_s$ значение U (то есть прямая задача решена). Тогда обратную задачу можно сформулировать так:

при заданных условиях (заранее известных факторах) найти такие элементы решения $n_1, n_2, ..., n_s$, которые обращают $U = U(n_1, n_2, ..., n_s)$ в максимум.

Для задачи формирования залпа УС решение – это вариант оптимального распределения определенного количества $n_з$ УС по s целям, а элементы решения – это компоненты оптимального вектора **n** ЦР. Тогда прямая задача (задача анализа) – определение максимального ущерба $U^*(n_з)$, наносимого противнику залпом УС определенного количественного состава $n_з$, а обратная задача (задача синтеза) – определение минимально необходимого количества $n_з^*$ УС в залпе, обеспечивающего при оптимальном ЦР нанесение противнику ущерба не ниже назначенной величины.

Вследствие сравнительной сложности фигурирующих в задаче функций вряд ли имеет смысл пытаться искать решение аналитическим путем. Обратная задача может быть решена путем неоднократного решения прямой задачи при различных количествах УС в залпе. Необходимо будет построить кривую зависимости величины ущерба от $n_з$ и на ней найти точку с требуемым значением ординаты. Ближайшее большее целое к абсциссе этой точки будет представлять собой искомое значение $n_з^*$.

Таким образом, задача формирования залпа УС (оптимизация по параметрам $n_1, n_2, ..., n_s$ и $n_з$) свелась к перебору значений $n_з$, для каждого из которых нужно решить задачу оптимального ЦР и вычислить величину наносимого противнику ущерба.

Задача (4) отличается от обычной задачи на условный экстремум условиями (1). Эту задачу можно решать или в рамках теории нелинейного программирования, или методом динамического программирования [4], предложенным Р. Беллманом.

Более простым является точное решение задачи (4) методом динамического программирования, в основе которого лежит следующее построение и решение системы функциональных уравнений.

Приведенное выше выражение (2), определяющее средний апостериорный ущерб, является целевой функцией аддитивного вида.

Функция, стоящая в правой части выражения (2), является функцией s переменных $n_1, n_2, ..., n_s$. Обозначим ее через $F(n_1, n_2, ..., n_s)$. Введем функцию

$$f_s(n_з) = \max_{n_1+n_2+...+n_s=n_з} F(n_1, n_2, ..., n_s), \qquad (5)$$

представляющую собой максимальный средний ущерб, наносимый s целям при оптимальном распределении между ними $n_з$ УС.

Функцию (5) можно вычислять рекуррентно, а именно:

$$\begin{cases} f_j(l) = \max\limits_{n_1+n_2+...+n_j=l} \left\{ \sum\limits_{q=1}^{Q} P(q,j)\, W(q,j) \left\{ 1 - \left[1 - p(q,j) \right]^{n_j} \right\} + f_{j-1}(l - n_j) \right\}; \\ f_0(l) \equiv 0,\ j = 1,2,...,s;\ l = 0,1,2,...,n_з. \end{cases} \qquad (6)$$

Рекуррентное представление максимального среднего ущерба в виде (6) позволяет применить к решению данной оптимизационной задачи метод, основанный на целочисленном динамическом программировании [4]. Динамическое программирование является методом оптимизации решений, наиболее пригодным для решения задач управления многошаговыми (многоэтапными) операциями. Операции на шаги расчленяются естественно или искусственно. Разбивать на шаги или этапы можно не только операции, развивающиеся во времени, но и не связанные со временем (например, при распределении ресурсов по нескольким объектам выделение ресурсов каждому объекту можно рассматривать как очередной «шаг»).

В основе решения всех задач динамического программирования лежит принцип оптимальности (принцип Беллмана), формализованной записью которого является функциональное уравнение, имеющее в данном случае вид

$$f_j(l) = \max_{n_1+n_2+...+n_j=l} \{ g_j(n_j) + f_{j-1}(l - n_j) \}, \qquad (7)$$

где $g_j(n_j)$ – средний ущерб, наносимый j-й цели, если на нее направлено n_j УС,

$$g_j(n_j) \equiv \sum_{q=1}^{Q} P(q,j)\, W(q,j) \left\{ 1 - \left[1 - p(q,j) \right]^{n_j} \right\};$$

$f_{j-1}(l - n_j)$ – максимальный средний ущерб, наносимый первым $j-1$ целям количеством $l - n_j$ УС, оптимально распределенных между ними.

Таким образом, нахождение вектора оптимального ЦР представляет собой многошаговый процесс, который в соответствии с методом динамического программирования проходится дважды. На первом проходе отыскивается максимум по формуле (7) и запоминаются те значения n_j (обозначим их $n_{j,l}^*$), при которых этот максимум достигается. На втором проходе, после указанных вычислений, в качестве оптимальных компонентов n_j, $j = 1,2,...,s$ нужно взять $n_j = n_{j,n_з - n_s - n_{s-1} - ... - n_{j+1}}^*$, что и дает нам требуемое распределение УС залпа по целям КС, а именно:

$$n_s = n_{s,n_з}^*,\ n_{s-1} = n_{s-1,n_з - n_s}^*,\ ...,\ n_1 = n_{1,n_з - n_s - n_{s-1} - ... - n_2}^*.$$

На этом работу алгоритма оптимального ЦР можно считать законченной. Количество УС, назначаемых по j-й цели, необходимо выбирать в соответствии с вектором ЦР $\mathbf{n} = (n_1, n_2, ..., n_j, ..., n_s)$, причем $\sum_{j=1}^{s} n_j = n_з^*$.

Разбиение залпа УС на группы по n_j штук (реализация вектора ЦР, т. е. ЦН УС залпа) осуществляется с учетом собственных номеров N_c УС, заранее им присвоенных.

Введем стартовую систему координат, в качестве которой выберем декартову прямоугольную систему координат OXZ с началом, совпадающим с местоположением флагманского корабля, и осью OX, направленной на центр атакуемого КС. Ось OZ дополняет систему координат до левой. Вертикальную плоскость, проходящую через ось OX, определим как плоскость стрельбы.

Кораблям, разнесенным по оси OZ, присвоим номера $k = 1,2,...,N$ в соответствии с положением их координат в упорядоченном ряду

$$z_{нк1} < z_{нк2} < ... < z_{нкk} < ... < z_{нкN},$$

т. е. кораблю с координатой $z_{нкk}$ присвоим номер k.

Соответствующим образом присвоены собственные номера $N_c = 1,2,...,n_з^*$ размещенным на кораблях УС, назначенным в залп, т. е. номера:

от 1 до $n_з^{(1)}$ – УС, размещенным на НК1;

от $n_з^{(1)} + 1$ до $n_з^{(1)} + n_з^{(2)}$ – УС, размещенным на НК2,

и так далее до исчерпания всех номеров от 1 до $n_з^*$.

На множестве целей также установлено координатное отношение порядка, т. е. цели упорядочены по возрастанию координаты z и в случае совпадения целей по этой координате – по возрастанию координаты x:

$$(z_{цj_2} > z_{цj_1}) \vee ((z_{цj_2} = z_{цj_1}) \wedge \\ \wedge (x_{цj_2} > x_{цj_1})) \Rightarrow (j_2 > j_1). \quad (8)$$

Цели пронумерованы в соответствии с правилом (8) и соответствующим образом, при необходимости переопределен вектор ЦР.

Тогда определение соответствия собственных номеров УС номерам целей, подлежащих поражению УС залпа, формализуется следующей итерационной процедурой:

1) полагается $N_c := 1$;

2) полагается $l := 1$;

3) вычисляется $M_l = \sum_{j=1}^{l} n_j / n_з^*$;

4) если $M_l \geq N_c / n_з^*$, то УС с номером N_c назначается для поражения цели с номером l в упорядоченном ряду, иначе полагается $l := l + 1$ и осуществляется переход к п. 3;

5) если $N_c < n_з^*$, то полагается $N_c := N_c + 1$ и осуществляется переход к п. 2, иначе назначение УС по целям КС считается завершенным.

Сформированный таким образом вектор ЦН содержит номера целей, назначенных для поражения УС с собственными номерами, совпадающими с порядковыми номерами соответствующих элементов этого вектора. Причем суммарное количество УС, направляемых на j-ю цель, равняется значению j-го компонента n_j вектора ЦР.

Введенная ранее матрица ЦН $\mathbf{B} = \|b_{kj}\|$, $k = 1,2,...,N$, $j = 1,2,...,s$, где $b_{kj} \equiv n_j^{(k)}$ – количество УС, направляемых с k-го корабля на j-ю цель, формируется следующим образом: элементы (по порядку, начиная с первого) вектора ЦН $\mathbf{J} = (j_1, j_2, ..., j_i, ..., j_{n_з^*})$, где j_i – номер цели, по которой назначен i-й УС (с номером $N_c = i$), $j_i \in \{1,2,...,s\}$, распределяются по $\eta \leq N$ группам (также по порядку, начиная с первой – $k = 1$) с количеством $n_з^{(k)} \leq n_\Sigma^{(k)}$, $k = 1,2,...,N$ элементов в каждой группе, причем $\sum_{k=1}^{N} n_з^{(k)} = n_з^*$.

Далее, по результатам анализа номеров целей в каждой из этих групп определяются соответствующие элементы $b_{kj} \equiv n_j^{(k)}$ матрицы $\mathbf{B}$ ЦН, причем $\sum_{k=1}^{N} n_j^{(k)} = n_j$, $\sum_{j=1}^{s} n_j^{(k)} = n_з^{(k)}$.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ЗАЛПА УС

Ограниченность возможностей переработки человеком информации при управлении сложными организационно-техническими системами обусловливает потребность в развитии специальных систем, призванных помогать человеку, принимающему решения. Это вызвало бурное развитие человеко-машинных систем поддержки принятия решений [5].

Появились эффективные средства отображения обстановки с большими информационными возможностями (что упрощает принятие решений). Достижения в радиоэлектронике, в алгоритмизации процессов управления, совершенствование вычислительных средств создали условия для повышения качества управленческих действий. Не являются исключением и сложные системы военного назначения.

Реализация возросших боевых возможностей кораблей и возрастание требований к оперативности принятия решений, соответствующих складывающейся тактической обстановке, обусловили необходимость высокого уровня информационной поддержки, в том числе и при формировании залпа УС.

Задача формирования залпа УС решается должностным лицом (в соответствии с общепринятой терминологией [6] – лицом, принимающим решение, или ЛПР) на автоматизированном рабочем месте (АРМ) флагманского корабля. Используемый на АРМ интерфейс, посредством которого осуществляется человеко-машинное взаимодействие, должен быть простым и интуитивно понятным для ЛПР.

В настоящее время интенсивно развивающейся областью информатики является искусственный интеллект. Это научно-техническое направление позволяет, в частности, разрабатывать вопросно-ответные системы для общения человека с компьютером на естественном языке, что реализуется как интеллектуальный человеко-машинный интерфейс.

Функции между компьютером и ЛПР могут быть распределены в соответствии с системой из восьми уровней полномочий Шеридана [7]. Уровни Шеридана варьируются от уровня 1 «Компьютер не предлагает помощи, все делает ЛПР» до уровня 8 «Компьютер выбирает метод, выполняет задачу и игнорирует ЛПР». На уровнях с 1 по 4 ЛПР принимает непосредственное участие в принятии решения. Например, выбирает одну из нескольких альтернатив, предложенных компьютером, (уровень 2) или одобряет выбранный компьютером способ выполнения задачи (уровень 4). На уровне 5 полномочия разделены между компьютером и ЛПР, а на уровнях с 6 по 8 полномочия переходят к компьютеру. Например, на уровне 6 принятое компьютером решение сообщается ЛПР при его исполнении, а на уровне 7 сообщение об исполнении принятого компьютером решения передается ЛПР только по его запросу.

Решению задачи формирования залпа УС предшествует сбор данных о надводной обстановке от кораблей группы и формирование [8] на флагманском корабле единого информационного поля (ЕИП) НК ТГ, на основе которого уточняются координаты и параметры движения обнаруженных целей, их типы (классы), а также тип атакуемого КС. Кроме указанных данных для решения поставленной задачи используются:

- координаты кораблей ТГ;
- информация о типе УС, боезапасе и технической готовности задействованных комплексов на каждом корабле;
- обобщенные константы, зависящие о параметров УС и средств ОПД коллективной обороны и самообороны целей КС.

Результатом решения поставленной задачи является отображаемая на экране АРМ матрица $\mathbf{B}$ ЦН размером $N \times s$, $k = 1,2,...,N$, $j = 1,2,...,s$ (в строках – корабли, в столбцах – цели), которая при минимальном расходе УС обеспечивает стрельбу с назначенным максимальным ущербом. Ненулевые элементы $(k, j) \neq 0$ этой матрицы определяют количество УС, направляемых с k-го корабля на j-ю цель.

В случае согласия со сформированной компьютером матрицей ЦН должностное лицо утверждает:

- тип атакуемого КС;
- матрицу ЦН и величину наносимого ущерба;
- способ применения УС – «в кратчайший срок» или «одновременно». В последнем случае назначается время подхода УС к атакуемому КС.

Утвержденные данные, а также координаты, параметры движения, типы (классы) целей и их номера из ЕИП НК ТГ по радиоканалам связи передаются на корабли группы.

Если должностное лицо не устраивает решение компьютера по формированию залпа УС, то оно (должностное лицо) может либо инициировать следующий цикл человеко-машинного взаимодействия, введя уточненные исходные данные для повторного решения задачи, либо в ручном режиме откорректировать матрицу ЦН в соответствии со своими предпочтениями.

Таким образом, человеко-машинная процедура принятия решений, которую называют также интерактивной, диалоговой, представляет собой циклический процесс взаимодействия человека (ЛПР) и компьютера. Цикл состоит из фазы анализа и принятия решений (постановка задачи для компьютера), выполняемой ЛПР, и фазы оптимизации (поиск решения и вычисление его характеристик), реализуемой компьютером. Процесс заканчивается, когда компьютер вырабатывает приемлемое для ЛПР решение и при этом ЛПР убеждается в

нецелесообразности дальнейших попыток получить лучшее решение при данной модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПЭВМ

Теоретические исследования дополнены статистическим моделированием на ПЭВМ залповой стрельбы УС по типовому КС из семи кораблей, один из которых – главная цель.

Результаты оценки вероятности $P_{\text{пор.гц}}$ поражения главной цели КС в зависимости от количества $n_з$ УС в залпе для вероятности классификации главной цели $P_{\text{кл.гц}} \approx 0{,}9$ приведены на рис. 1. На этом рисунке кривая 1 получена при отсутствии сбитых УС ($n_{\text{сб}} = 0$) средствами ОПД коллективной обороны, а кривые 2 и 3 – при 20% и 50% сбитых УС соответственно. Кривые отображают исходные зависимости вероятности $P_{\text{пор.гц}}$ от целочисленного значения аргумента $n_з$, а $[a/b]$ обозначает ближайшее целое число отношения a/b.

Полученные зависимости позволяют по назначенной вероятности поражения главной цели определить минимально достаточное количество $n_з^*$ УС в залпе. Так, например, по графикам рис. 1 для назначенной вероятности 0,9 по кривой 1 находим $n_з^* = 9$, по кривой 2 – $n_з^* = 10$, по кривой 3 – $n_з^* = 14$.

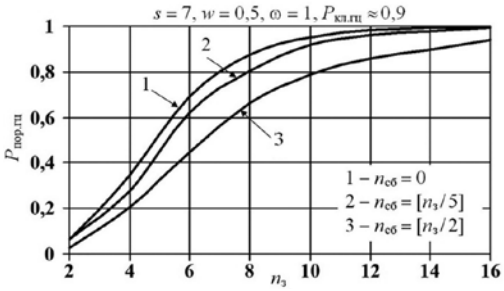


Рис. 1. ***Зависимость вероятности поражения главной цели КС от количества УС в залпе***

Сопоставим теперь полученные результаты с результатами равновероятного выбора целей для поражения. Получим выражения для вероятности $P_{\text{равн}}$ поражения залпом главной цели из $n_{\text{ат}}$ УС (т. е. УС, преодолевших зону действия средств ОПД коллективной обороны) при равновероятном выборе целей для поражения. Используем непосредственный подсчет вероятностей:

1. $n_{\text{ат}} \le s$. Число возможных способов выбрать $n_{\text{ат}}$ целей из s для поражения $n_{\text{ат}}$ УС равно $c_s^{n_{\text{ат}}}$. Благоприятствующими (когда среди $n_{\text{ат}}$ выбранных целей обязательно находится главная цель) являются случаи, когда из оставшихся (после того как выбрана главная цель) $s-1$ целей выбраны $n_{\text{ат}}-1$ (это можно сделать $c_{s-1}^{n_{\text{ат}}-1}$ способами). Тогда $c_{s-1}^{n_{\text{ат}}-1} / c_s^{n_{\text{ат}}} = n_{\text{ат}} / s$, и искомая вероятность $P_{\text{равн}}$ с учетом полной группы событий $n_{\text{ат}} / s + (s - n_{\text{ат}}) / s = 1$ будет

$$P_{\text{равн}} = n_{\text{ат}} / s \cdot [1-(1-p_{\text{гц}} / \omega)^1] + (s - n_{\text{ат}}) / s \cdot [1-(1-p_{\text{гц}} / \omega)^0] = \\ = n_{\text{ат}} / s \cdot p_{\text{гц}} / \omega, \quad (9)$$

где $p_{\text{гц}}$ – вероятность попадания УС в главную цель; ω – математическое ожидание количества попаданий в главную цель, необходимое для ее поражения.

Рассуждая аналогично, получим

2. $s < n_{\text{ат}} \le 2s$.

$$P_{\text{равн}} = (2s - n_{\text{ат}}) / s \cdot p_{\text{гц}} / \omega + (n_{\text{ат}} - s) / s \cdot [1-(1-p_{\text{гц}} / \omega)^2]; \quad (10)$$

3. $2s < n_{\text{ат}} \le 3s$.

$$P_{\text{равн}} = (n_{\text{ат}} - 2s)/s \cdot [1-(1-p_{\text{гц}}/\omega)^3] + (3s - n_{\text{ат}})/s \cdot [1-(1-p_{\text{гц}}/\omega)^2]. \quad (11)$$

Расчеты по формулам (9) – (11) показывают, что при равновероятном выборе целей для поражения назначенная вероятность 0,9 поражения главной цели КС в рассмотренных условиях не обеспечивается. Возможно обеспечение вероятности 0,85 только при $n_{\text{ат}} = 16$.

Поскольку процесс ЦР имеет явно выраженный случайный характер, компонент $n_{\text{ат.гц}}$ вектора ЦР, соответствующий количеству атакующих главную цель УС, является случайной дискретной величиной с законом распределения $R(n_{\text{ат.гц}})$. Эти законы (при разных условиях), определяющие распределение вероятности наведения на главную цель $n_{\text{ат.гц}}$ УС на множестве от 0 до $n_{\text{ат}}$, были получены статистическим моделированием одновременно (при тех же условиях) с результатами, представленными на рис. 1.

В качестве примера законы $R(n_{\text{ат.гц}})$, полученные для фиксированного количества УС в залпе $n_з = 16$ и условий получения результатов на рис. 1, представлены на рис. 2. Ломаные кривые отображают исходные зависимости законов R от целочисленного значения аргумента $n_{\text{ат.гц}}$.

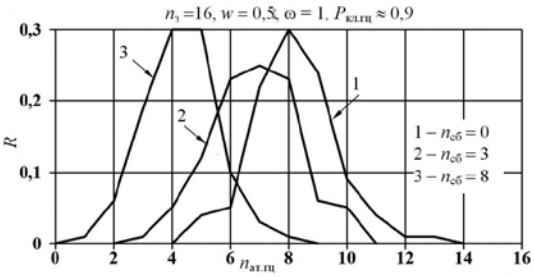


Рис. 2. ***Законы распределения количества УС, атакующих главную цель КС***

Найденные законы $R(n_{\text{ат.гц}})$ позволяют вычислить вероятность поражения главной цели по формуле

$$P_{\text{пор.гц}} = \sum_{n_{\text{ат.гц}}=0}^{n_{\text{ат}}} R(n_{\text{ат.гц}}) [1-(1-p_{\text{гц}} / \omega)^{n_{\text{ат.гц}}}],$$

где $p_{\text{гц}}$ и ω – величины, определенные ранее.

Очевидно, что значения вероятности $P_{\text{пор.гц}}$, рассчитанные по этой формуле, совпадают со значениями соответствующих ординат графиков, представленных на рис. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модель формирования залпа УС в тактической группе надводных кораблей, учитывающая огневой потенциал коллективной обороны атакуемого КС противника.

Результаты статистического моделирования на ПЭВМ задачи залповой стрельбы УС по типовому КС показывают следующее:

- использование для формирования залпа не всего ресурса УС кораблей группы, а только их минимального количества, достаточного для нанесения КС назначенного максимального ущерба, обеспечивает получение экономической выгоды (решение поставленной задачи в соответствии с критерием «стоимость–эффективность» [6]);
- повышение вероятности классификации главной цели в составе КС уменьшает расход УС, необходимый для нанесения КС назначенного максимального ущерба.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Берзин Е.А.* Оптимальное распределение ресурсов и теория игр. – М.: Радио и связь, 1983. – 209 с.
2. *Подоплёкин Ю.Ф., Коржавин Г.А., Мальцев О.Г.* Распределение группы управляемых летательных аппаратов по морским объектам в различных условиях информационной обеспеченности // Изв.РАРАН. – 2008. – Вып. 4 (58). – С. 33 – 38.
3. *Вентцель Е.С.* Исследование операций: Сер. «Математика, кибернетика». – М.: Знание, 1976. – 64 с. (1/1976).
4. *Беллман Р., Дрейфус С.* Прикладные задачи динамического программирования / Пер. с англ. под ред. А.А. Первозванского. – М.: Наука, 1965. – 458 с.
5. *Ларичев О.И., Петровский А.Б.* Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы развития // Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. – Т. 21. – М.: ВИНИТИ, 1987. – С. 131 – 164.
6. *Ларичев О.И.* Системный анализ: проблемы и перспективы // Автоматика и телемеханика. – 1975. – № 2. – С. 61 – 71.
7. *Sheridan T.B.* Humans and Automation// System Design and Research Issues. – John Wiley & Sons, Inc., 2002.
8. *Коржавин Г.А., Подоплёкин Ю.Ф., Мальцев О.Г.* Эффективность радиолокационных комплексов освещения надводной обстановки кораблей группы с радиоканалами взаимного обмена информацией// Изв.РАРАН. – 2016. – Вып. 2 (92). – С. 21 – 26. ■

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, КОТОРЫЕ ПРИНИМАЮТСЯ КОРАБЕЛЬНЫМИ РАДИОПРИЕМНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ, МОДУЛИРОВАННЫХ НОРМАЛЬНЫМИ СЛУЧАЙНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Е.К. Самаров, *д-р техн. наук, зав.кафедрой математики,*
Я.Ю. Ионченкова, *ст. преподаватель кафедры математики,*
СПбГМТУ,
контакт. тел. (812) 757 1911, omega511@mail.ru, ionchenkova_yana@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Очень часто при обработке сигналов в корабельных радиотехнических системах и устройствах встречаются синусоидальные колебания, модулированные по амплитуде и фазе (частоте). Анализу таких колебаний в технической литературе уделено довольно большое внимание. Однако в подавляющем большинстве случаев, как правило, рассматриваются только энергетические характеристики – корреляционные и спектральные функции [1–3].

Рассмотрим и проанализируем двумерную плотность распределения вероятности (ПРВ) и корреляционную функцию гармонического колебания, модулированного по амплитуде и фазе нормальными случайными процессами с произвольной степенью корреляции между собой. Кроме того, определим двумерную ПРВ суммы случайно модулированного колебания и некоррелированного нормального шума.

ДВУМЕРНАЯ ПРВ И КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ, МОДУЛИРОВАННОГО ПО АМПЛИТУДЕ И ФАЗЕ НОРМАЛЬНЫМИ СЛУЧАЙНЫМИ ПРОЦЕССАМИ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ КОРРЕЛЯЦИИ

Пусть мы имеем гармоническое колебание, модулированное по амплитуде (АМ) и фазе (ФМ)

$$y(t)=A(t)\cos\left[\omega_0 t+\Phi(t)+\theta\right], \qquad (1)$$

где $A(t)$, $\Phi(t)$ – нормальные случайные процессы, характеризующие АМ и ФМ соответственно; θ – случайная начальная фаза, равномерно распределенная на интервале $[-\pi, \pi]$ и не зависящая от процессов $A(t)$, $\Phi(t)$; ω_0 – несущая частота исходного гармонического колебания.

Двумерная характеристическая функция процесса (1), согласно [3], равна

$$Q_y(u_1,u_2)=\langle J_0\left[u_1^2A_1^2+u_2^2A_2^2+2u_1u_2A_1A_2\cos(\omega_0\tau+\Phi_1-\Phi_2)\right]^{0,5}\rangle_{A,\Phi}=$$
$$=\sum_{k=0}^{\infty}\varepsilon_k(-1)^k\langle J_k(u_1A_1)J_k(u_2A_2)\cos k(\omega_0\tau+\Phi_1-\Phi_2)\rangle_{A,\Phi}, \qquad (2)$$

где $A_1=A(t_1)$, $A_2=A(t_2)$, $\Phi_1=\Phi(t_1)$, $\Phi_2=\Phi(t_2)$, $\tau=t_1-t_2$, $\varepsilon_0=1$, $\varepsilon_k=2$ при $k>0$, знак $\langle.\rangle$ означает усреднение по совокупности, $J_k(x)$ – функция Бесселя k-го порядка.

Предположим, что нормальные случайные процессы $A(t)$ и $\Phi(t)$ взаимно коррелированы с коэффициентом взаимной корреляции $R_{a,\Phi}(t_1,t_2)$,, причем $A(t)$ – стационарный процесс, для которого среднее значение A_0, дисперсия σ_a^2, коэффициент корреляции $R_a(\tau)$, а $\Phi(t)$ – нестационарный процесс с нулевым средним, дисперсией $\sigma_\Phi^2(t)$ и коэффициентом корреляции $R_\Phi(t_1,t_2)$.

Заменяя в (2) функцию Бесселя ее интегральным представлением

$$J_k(x)=(-i)^k/2\pi\int_{-\pi}^{\pi}\exp\{ix\cos\varphi\}\cos k\varphi d\varphi,$$

используя формулу Эйлера

$$\cos\alpha=\frac{1}{2}\left(\exp\{i\alpha\}+\exp\{-i\alpha\}\right)$$

и интегрируя по переменным A_1, A_2, Φ_1, Φ_2 методом, изложенным в [4–8], получаем

$$Q_y(u_1,u_2)=-\frac{1}{2(2\pi)^2}\sum_{k=0}^{\infty}\varepsilon_k\iint_{-\pi}^{\pi}\exp[ik(\varphi_1+\varphi_2)+iu_1A_0\cos\varphi_1+$$
$$+iu_2A_0\cos\varphi_2]\left[\exp\left\{ik\omega_0\tau-\frac{1}{2}\delta(k)\right\}+\exp\left\{ik\omega_0\tau-\frac{1}{2}\delta(-k)\right\}\right]d\varphi_1d\varphi_2. \qquad (3)$$

Здесь

$$\delta(k)=\sigma_a^2u_1^2\cos^2\varphi_1+\sigma_a^2u_2^2\cos^2\varphi_2+\left[\sigma_{\varphi_1}^2+\sigma_{\varphi_2}^2-2\sigma_{\varphi_1}\sigma_{\varphi_2}R_\Phi(t_1,t_2)\right]k^2+$$
$$+2\sigma_a^2R_a(\tau)u_1u_2\cos\varphi_1\cos\varphi_2+2\sigma_a\left[\sigma_{\varphi_1}R_{a,\Phi}(t_2,t_1)-\sigma_{\varphi_2}R_{a,\Phi}(t_1,t_2)\right]\times \qquad (4)$$
$$\times ku_1\cos\varphi_1+2\sigma_a\left[\sigma_{\varphi_1}R_{a,\Phi}(t_2,t_1)-\sigma_{\varphi_2}R_{a,\Phi}(t_2,t_2)\right]ku_2\cos\varphi_2,$$
$$\sigma_{\varphi_1}=\sigma_\varphi(t_1),\ \sigma_{\varphi_2}=\sigma_\varphi(t_2).$$

В отсутствии АМ

$$\sigma_a=0,$$
$$R_{a,\Phi}(t_1,t_2)=R_{a,\Phi}(t_2,t_1)=R_{a,\Phi}(t_1,t_1)=R_{a,\Phi}(t_2,t_2)=0,$$

и выражение (3) при помощи (4) преобразуется к виду

$$Q_y(u_1,u_2)=\sum_{k=0}^{\infty}\varepsilon_k(-1)^k\exp\left\{-\frac{k^2}{2}\left[\sigma_{\varphi_1}^2+\sigma_{\varphi_2}^2-2\sigma_{\varphi_1}\sigma_{\varphi_2}R_\Phi(t_1,t_2)\right]\right\}\times$$
$$\times J_k(A_0u_1)J_k(A_0u_2)\cos k\omega_0\tau. \qquad (5)$$

В случае, когда кроме АМ отсутствует ФМ,

$$\sigma_{\varphi_1}=\sigma_{\varphi_2}=0,$$

двумерная характеристическая функция гармонического колебания со случайной начальной фазой, как видно из (5), совпадает с приведенной в [2].

Для определения двумерной характеристической функции аддитивной смеси

$$\eta(t)=y(t)+n(t), \qquad (6)$$

где $n(t)$ – белый гауссовый шум с характеристической функцией

$$Q_n(u_1,u_2)=\exp\left\{-\frac{\sigma_n^2}{2}\left(u_1^2+u_2^2\right)\right\}, \qquad (7)$$

и дисперсией σ_n^2, воспользуемся теоремой о характеристической функции суммы независимых случайных величин [1], согласно которой характеристическая функция $Q_\eta(u_1,u_2)$ смеси (6) равна произведению характеристических функций слагаемых:

$$Q_\eta(u_1,u_2)=Q_y(u_1,u_2)Q_n(u_1,u_2),$$

где $Q_y(u_1,u_2)$ и $Q_n(u_1,u_2)$ определяются формулами (3) и (7).

ДВУМЕРНАЯ ПЛОТНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ СМЕСИ

Двумерная ПРВ смеси (6) получаемтся преобразованием Фурье характеристической функции $Q_\eta(u_1,u_2)$:

$$W(\eta_1,\eta_2)=\frac{1}{(2\pi)^2}\iint_{-\infty}^{\infty}\exp\{-iu_1\eta_1-iu_2\eta_2\}Q_\eta(u_1,u_2)\,du_1du_2. \qquad (8)$$

Подставляя в (8) выражения (3), (4) и (7), интегрируя по переменным u_1,u_2, получаем для системы случайных величин

$$\eta_1^*=\eta_1/A_0,\ \eta_2^*=\eta_2/A_0,$$

совместную ПРВ:

$$W\left(\eta_1^*,\eta_2^*\right)=\frac{1}{A_0^2\left(2\pi\right)^3}\sum_{k=0}^{\infty}\varepsilon_k F_k\iint_{-\pi}^{\pi}V^{-0,5}\left(\varphi_1,\varphi_2\right)\exp\left\{-\frac{1}{2V\left(\varphi_1,\varphi_2\right)}\times\right.$$

$$\times\left[X\left(\varphi_1,\varphi_2\right)-Y\left(\eta_1^*,\eta_2^*;\varphi_1,\varphi_2\right)\right]\cos k\left[\omega_0\tau-\frac{Z\left(\eta_1^*,\eta_2^*;\varphi_1,\varphi_2\right)}{V\left(\varphi_1,\varphi_2\right)}\right]\times \quad (9)$$

$$\times\cos k\left(\varphi_1+\varphi_2\right)d\varphi_1 d\varphi_2,$$

где

$$F_k=\exp\left\{-\frac{k^2}{2}\left[\sigma_{\varphi_1}^2+\sigma_{\varphi_2}^2-2\sigma_{\varphi_1}\sigma_{\varphi_2}R_\Phi\left(t_1,t_2\right)\right]\right\};$$

$$X\left(\varphi_1,\varphi_2\right)=2m_a^4R_a\left(\tau\right)\cos\varphi_1\cos\varphi_2\left[\sigma_{\varphi_1}R_{a,\Phi}\left(t_1,t_1\right)-\sigma_{\varphi_2}R_{a,\Phi}\left(t_1,t_2\right)\right]\times$$

$$\times\left[\sigma_{\varphi_1}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_1\right)-\sigma_{\varphi_2}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_2\right)\right]-m_a^2\cos^2\varphi_1\left(m_a^2\cos^2\varphi_2+q\right)\times$$

$$\times\left[\sigma_{\varphi_1}R_{a,\Phi}\left(t_1,t_1\right)-\sigma_{\varphi_2}R_{a,\Phi}\left(t_1,t_2\right)\right]-$$

$$-m_a^2\cos^2\varphi_2\left(m_a^2\cos^2\varphi_1+q\right)\left[\sigma_{\varphi_1}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_1\right)-\sigma_{\varphi_2}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_2\right)\right];$$

$$Y\left(\eta_1^*,\eta_2^*;\varphi_1,\varphi_2\right)=\left(\eta_1^*-\cos\varphi_1\right)^2\left(m_a^2\cos^2\varphi_2+q\right)+$$

$$+\left(\eta_2^*-\cos\varphi_2\right)^2\left(m_a^2\cos^2\varphi_1+q\right)-2m_a^2R_a\left(\tau\right)\cos\varphi_1\cos\varphi_2\times$$

$$\times\left(\eta_1^*-\cos\varphi_1\right)\left(\eta_2^*-\cos\varphi_2\right);$$

$$Z\left(\eta_1^*,\eta_2^*;\varphi_1,\varphi_2\right)=m_a\cos\varphi_1\left(\eta_1^*-\cos\varphi_1\right)\left(m_a^2\cos^2\varphi_2+q\right)\times$$

$$\times\left[\sigma_{\varphi_1}R_{a,\Phi}\left(t_1,t_1\right)-\sigma_{\varphi_2}R_{a,\Phi}\left(t_1,t_2\right)\right]+m_a\cos\varphi_2\left(\eta_2^*-\cos\varphi_2\right)\left(m_a^2\cos^2\varphi_1+q\right)\times$$

$$\times\left[\sigma_{\varphi_1}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_1\right)-\sigma_{\varphi_2}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_2\right)\right]+m_a^2R_a\left(\tau\right)\cos\varphi_1\cos\varphi_2\times$$

$$\times\left\{\left(\eta_1^*-\cos\varphi_1\right)\left[\sigma_{\varphi_1}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_1\right)-\sigma_{\varphi_2}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_2\right)\right]-\right.$$

$$\left.-\left(\eta_2^*-\cos\varphi_2\right)\left[\sigma_{\varphi_1}R_{a,\Phi}\left(t_1,t_1\right)-\sigma_{\varphi_2}R_{a,\Phi}\left(t_1,t_2\right)\right]\right\};$$

$$V\left(\varphi_1,\varphi_2\right)=\left(m_a^2\cos^2\varphi_1+q\right)\left(m_a^2\cos^2\varphi_2+q\right)-$$

$$-m_a^4R_a^2\left(\tau\right)\cos^2\varphi_1\cos^2\varphi_2;;$$

$m_a=\sigma_a/A_0$ – коэффициент АМ; $q=\sigma_n^2/A_0^2$.

ЧАСТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим некоторые частные результаты, вытекающие из (9). Допустим, что АМ процесса $y(t)$ отсутствует. В этом случае

$$X(.)=Z(.)=0,$$

$$Y(.)=q\left[\left(\eta_1^*-\cos\varphi_1\right)^2+\left(\eta_2^*-\cos\varphi_2\right)^2\right],$$

$$V(.)=q^2$$

и из (9) получим двумерную ПРВ смеси ФМ процесса с нормальным белым шумом:

$$W\left(\eta_1^*,\eta_2^*\right)=\frac{1}{A_0^2\left(2\pi\right)^2q}\sum_{k=0}^{\infty}\varepsilon_kF_k\cos k\omega_0\tau\iint_{-\pi}^{\pi}\exp\left\{-\frac{1}{2q}\times\right.$$

$$\left.\times\left[\left(\eta_1^*-\cos\varphi_1\right)^2+\left(\eta_2^*-\cos\varphi_2\right)^2\right]\right\}\cos k\left(\varphi_1+\varphi_2\right)d\varphi_1d\varphi_2. \quad (10)$$

При $q=0$ из выражения (10) получаем двумерную ПРВ ФМ колебания:

$$W\left(y_1,y_2\right)=\frac{1}{\pi^2A_0^2}\sum_{k=0}^{\infty}\varepsilon_kF_k\cos k\omega_0\tau\frac{T_k\left(\frac{y_1}{A_0}\right)T_k\left(\frac{y_2}{A_0}\right)}{\sqrt{\left(1-\frac{y_1^2}{A_0^2}\right)\left(1-\frac{y_2^2}{A_0^2}\right)}}, \quad (11)$$

где $T_k(x)$ – полином Чебышева первого рода.

При отсутствии ФМ $F_k=1$ и выражение (11) совпадает с двумерной ПРВ гармонического колебания со случайной начальной фазой, приведенной в [2].

Отметим, что выражение для одномерной ПРВ процесса $\eta(t)$, вытекающее из (9), совпадает с полученными в [4, 5].

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ ПРОЦЕССА

Найдем корреляционную функцию процесса (1). Общее выражение для корреляционной функции $B_y\left(t_1,t_2\right)$ процесса $y(t)$ с ненулевым средним значением может быть записано в виде

$$B_y\left(t_1,t_2\right)=-\frac{\partial^2Q_y\left(u_1,u_2\right)}{\partial u_1\partial u_2}\Big|_{u_1=u_{2=0}}. \quad (12)$$

Подставляя в (12) формулу (3), после элементарных преобразований с учетом (4) получаем

$$B_y\left(t_1,t_2\right)=\frac{A_0^2}{2}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\sigma_{\Phi_1}^2+\sigma_{\Phi_2}^2-2\sigma_{\Phi_1}\sigma_{\Phi_2}R_\Phi\left(t_1,t_2\right)\right]\right\}\times$$

$$\times B_m\left(t_1,t_2\right)\cos\left[\omega_0\left(t_1-t_2\right)+\theta_m\right]. \quad (13)$$

Здесь

$$B_m^2\left(t_1,t_2\right)=\left\{1+m_a^2R_a\left(\tau\right)-m_a^2\left[\sigma_{\Phi_1}R_{a,\Phi}\left(t_1,t_2\right)-\sigma_{\Phi_2}R_{a,\Phi}\left(t_1,t_2\right)\right]\times\right.$$

$$\left.\times\left[\sigma_{\Phi_1}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_1\right)-\sigma_{\Phi_2}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_2\right)\right]\right\}^2+m_a^2\left\{\sigma_{\Phi_1}\left[R_{a,\Phi}\left(t_1,t_1\right)+\right.\right.$$

$$\left.\left.+R_{a,\Phi}\left(t_2,t_1\right)\right]-\sigma_{\Phi_2}\left[R_{a,\Phi}\left(t_1,t_2\right)+R_{a,\Phi}\left(t_2,t_1\right)\right]\right\}^2;$$

$$tg\theta_m=B/C,$$

где

$$B=m_a\left\{\sigma_{\Phi_1}\left[R_{a,\Phi}\left(t_1,t_1\right)+R_{a,\Phi}\left(t_2,t_1\right)\right]-\sigma_{\Phi_2}\left[R_{a,\Phi}\left(t_1,t_2\right)+R_{a,\Phi}\left(t_2,t_2\right)\right]\right\};$$

$$C=1+m_a^2R_a\left(\tau\right)-m_a^2\left[\sigma_{\Phi_1}R_{a,\Phi}\left(t_1,t_1\right)-\sigma_{\Phi_2}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_1\right)\right]\times$$

$$\times\left[\sigma_{\Phi_1}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_1\right)-\sigma_{\Phi_2}R_{a,\Phi}\left(t_2,t_2\right)\right].$$

Вытекающие из общей формулы (13) частные результаты согласуются с ранее известными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрены и проанализированы вероятностные и энергетические характеристики гармонических сигналов, поступающих на вход корабельных радиоприемных устройств, модулированных нормальными случайными процессами. Получена двумерная плотность распределения вероятности и корреляционная функция гармонического колебания, модулированного по амплитуде и фазе нормальными случайными процессами с произвольной между собой степенью корреляции. Представлена двумерная плотность распределения вероятностей аддитивной суммы случайно модулированного колебания и некоррелированного нормального шума. Приведены частные примеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
2. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
3. *Крамер Г.* Математические методы статистики: монография / Ред. А.Н. Колмогоров; пер. А.С. Монин, А.А. Петров – М.: Мир, 1975. – 648 с.
4. *Артюшенко В.М., Воловач В.И., Тяжев А.И.* Моделирование непрерывных марковских процессов в дискретном времени на примере радиолокационных сигналов, описываемых стохастическими дифференциальными уравнениями // Радиотехника. – 2016. – №12. – С. 22–28.
5. *Artyushenko V.M., Volovach V.I., Shakursky M.V.* The demodulation signal under the influence of additive and multiplicative non-Gaussian noise. – В сб.: Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2016. – Yerevan, 2017, с.. 7807704.
6. *Артюшенко В.М., Воловач В.И.* Анализ параметров спектра доплеровского сигнала, отраженного от движущегося протяженного объекта // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – №1. – С.5.
7. *Artyushenko V.M., Volovach V.I.* Comparative analysis of discriminators efficiency of tracking meters under influence of non-Gaussian broadband and band-limited noise. – В сб.: 11th International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Dynamics 2017. – Proceedings, 2017, с. 1–4.
8. *Artyushenko V.M., Volovach V.I.* Synthesis and analysis of discriminators under influence of non-Gaussian noise// Journal of Physics: Conference Series. – 2018, –С. 012004. ■

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ СВЯЗНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

С.В. Дворников, *д-р техн. наук, проф.,*
С.А. Якушенков, *д-р техн. наук, проф., доцент,*
ГУАП и ВАС им. С.М. Будённого,
В.К. Снежко, *канд. техн. наук, доцент ВАС им. С.М. Будённого,*
контакт. тел. (812) 247 9400

ВВЕДЕНИЕ

В условиях введения санкций объекты Российской Федерации, в том числе и морского базирования, были исключены из общего контура навигации, управления и связи. Вместе с тем возросший интерес восточных партнеров к наращиванию морского сотрудничества стимулирует дальнейшее развитие безопасности данного кластера. Поэтому вопросы радиотехнического обеспечения судов и береговой инфраструктуры приобретают особую значимость на текущий момент.

При этом следует понимать, что современные радиотехнические системы (РТС) (радионавигационные, телекоммуникационные, радиолокационные и т. п.) являются сложными и многофункциональными системами, содержащими множество элементов и связей между ними.

За счет интеграции РТС и объединения их элементов в сеть реализуются потенциальные возможности полноценного радиотехнического обеспечения. При этом эффективность их применения многократно возрастает [1].

В общем случае сетевая структура содержит вершины (элементы), в качестве которых используются опорные, вспомогательные узлы (станции), узлы связи (коммутации) и ветви между ними (радиолинии). Главная системная характеристика сети – это ее *структурная связность*, под которой в работе понимается взаимосвязь между узлами, образующими цельную структуру системы. Она определяет надежность и качество функционирования системы по предназначению [1]. Количественно структурную связность будем оценивать как усредненное количество связей между элементами РТС.

Вопросам оценки структурной связности посвящено множество работ [1–3]. Объединяющим аспектом этих подходов является постоянное существование межузловых ветвей как факта наличия детерминированной связи между ними. Однако в РТС ветви формируются, как правило, средствами радиосвязи [1, 3], которые в силу их открытости подвергаются деструктивным радиоэлектронным воздействиям, а также нестабильно функционируют при нарушении радиовидимости в городских условиях и сложных физико-географических условиях местности, влияющими на условия распространения радиоволн [1, 4]. При этом возможно как снижение качества связи между элементами (узлами, станциями) РТС, так и прекращение функционирования радиолинии, т.е. разрыв связи. В этом случае уменьшается количество взаимосвязей в системе, а следовательно, ограничиваются функциональные возможности предоставления услуг пользователям, например, по навигации и связи [1, 3, 5]. Поэтому актуальным становится количественная оценка взаимосвязи элементов системы для прогнозирования ее предельных возможностей с учетом вероятностного характера формирования взаимосвязей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ СВЯЗНОСТИ

Постановку задачи сформулируем следующим образом: имеется РТС, состоящая из n элементов (узлов, опорных станций). Заданы вероятности связи между элементами системы. В реальных системах условия распространения радиоволн между опорными станциями (узлами) и расстояния между ними различные, следовательно, вероятности связи (приема сигнала) i-м элементов p_i будут разными в зависимости от степени деструктивных воздействий и физико-географических факторов местности.

Количественно структурную связность одного элемента системы оценим как вероятность связи с остальными m элементами, с которыми обеспечивается качественный прием. В этом случае структурная связность характеризуется количеством возможных связей между элементами системы с учетом качества связи. Тогда определение структурной связности РТС является сложным событием, которое состоит из заданного или менее (не более) числа раз элементарных событий (определение доступности к каждому элементу). Эти события независимые, что существенно сокращает вычисления и позволяет избежать громоздких символических записей.

В итоге вероятность связи с m соседними элементами системы можно определить по формуле вероятности сложных событий [6, 7]

$$R_{m,n} = \prod_{i=m}^{n} P_{i,n} = 1 - \prod_{i=0}^{m-1} P_{i,n}. \qquad (1)$$

где $P_{i,n} = \sum_{i_1=1}^{n-i+1} \sum_{i_2=i_1+1}^{n-i+2} \dots \sum_{i_i=i_{i-1}+1}^{n} \frac{p_{i_1} p_{i_2} \cdots p_{i_i}}{q_{i_1} q_{i_2} \cdots q_{i_i}} \prod_{j=1}^{n} q_j$ – вероятность того, что произойдет установление связи ровно с m опорными станциями (ОС) из n возможных станций; p_i – вероятности связи в радиолиниях, организуемых от станции с соседним i-ми элементами, в которых надежность связи удовлетворяет требуемому (заданному) значению вероятности p_i^*; $q_i = 1 - p_i$ – вероятность отсутствия связи (неприема сигнала) с i-м элементом системы; m – число ОС, с которыми обеспечивается связь с требуемой надежностью; n – число элементов в сети (ресурс сети) РТС.

Применительно к определению структурной связности РТС необходимо учесть взаимосвязи от всех элементов на заданной акватории между n элементами и усреднить их значения. Тогда для количественной оценки структурной связности РТС выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$C = \sum_{i=1}^{n} \left(\prod_{i=m}^{n-1} P_{i,n} \right) \Big/ n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\prod_{i=m}^{n-1} \sum_{i_1=1}^{n-i+1} \sum_{i_2=i_1+1}^{n-i+2} \dots \sum_{i_i=i_{i-1}+1}^{n} \frac{p_{i_1} p_{i_2} \cdots p_{i_i}}{q_{i_1} q_{i_2} \cdots q_{i_i}} \prod_{j=1}^{n-1} q_j \right). \qquad (2)$$

Условиями и ограничениями являются: $m \geq 1$, $n \geq m$, $0 \leq q_i \leq 1$, $0 \leq p_i \leq 1$. $p_i \geq p_i^*$.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Для определения структурной связности РТС необходимо учитывать вероятности одновременной связи от одной ОС с максимально возможным количеством ОС. Рассмотрим алгоритм определения данных вероятностей связи для радиотехнической системы, состоящей из $n = 4$ элементов (рис. 1).

Вероятность связи элемента системы одновременно ровно с тремя оставшимися элементами как независимыми событиями равна произведению вероятностей с каждой станцией:

$$P_{3,3} = \prod_{i=1}^{n-1} p_i = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3. \qquad (3)$$

На основе выражения (1) вероятность связи одновременно не менее чем с двумя элементами системы из трех сводится к сумме вероятности одновременного приема сигналов ровно от трех элементов (3) и произведений вероятностей приема сигналов от i-х элементов на вероятность i-го неприема для всех возможных комбинаций вероятности одновременного приема ровно от двух элементов из трех:

$$P_{2,3} = P_{3,3} + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3, \qquad (4)$$

где каждое слагаемое вычисляется с использованием выражений (1), (2) путем циклических комбинаций, например, цикл $i_1 = 1$, $i_2 = 2$, тогда $= \frac{p_1 p_2}{q_1 q_2} q_1 q_2 q_3 = p_1 p_2 q_3$ есть вероятность приема от двух элементов системы (1) и(2) и неприема от третьей (от одной).

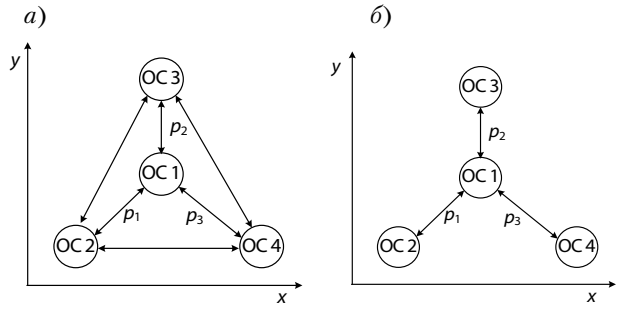


Рис. 1. ***Структура сети радиотехнической системы: а – полносвязная структура; б – структура типа «звезда»***

Аналогично вероятность одновременного приема сигналов не менее чем от одного элемента из трех определяется выражением

$$P_{1,3} = P_{2,3} + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 + q_1 \cdot q_2 \cdot q_3. \quad (5)$$

Выражение (5) сводится к сумме вероятности одновременного приема сигналов не менее чем от двух элементов из трех (4) и произведений вероятностей приема сигналов (доступности) i-х элементов на вероятность i-х неприемов для всех возможных комбинаций вероятности одновременного приема от одного элемента из трех возможных.

Проделав вычисления для каждого элемента системы и усреднив полученные вероятности связи по выражению (3), получим значение структурной связности.

К недостатку представленной модели можно отнести усреднение структурной связности системы, что снижает степень дифференцированной детализации и информативности вклада каждого элемента системы, а также большой объем вычислений при увеличении размерности задачи (количества элементов системы и связей между ними).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С целью оценки эффективности теоретических заключений проведено исследование зависимости структурной связности сети от изменения вероятностей связей между ОС. Исследование структурной связности проводилось для полносвязной сети и сети со структурой типа «звезда», состоящих из четырех ОС при одинаковых вероятностях связи между ними. Результаты представлены на рис. 2.

Анализ полученного графического материала показывает, что структурная связность зависит от количества связей

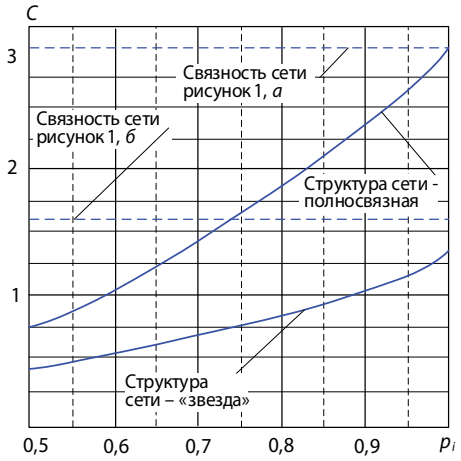


Рис. 2. ***Зависимость структурной связности сети от изменения вероятностей связей между опорными станциями***

сОС и значения вероятностей связи между элементами. При идеальной связи ($p_i = 1$) она стремится к значению, вычисленному классическим способом при стационарных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в работе математическая модель позволяет определять связность сложных систем в условиях воздействия деструктивных факторов, когда связи между ее элементами носят вероятностный характер и могут разрушаться в результате негативных воздействий, недостаточной доступности между элементами и/или из-за влияния сложных физико-географических факторов местности.

Такой подход позволяет отслеживать деградацию системы в динамике развития деструктивных воздействий, а также определять пороговые значения ее нормального функционирования. Модель масштабируема и инвариантна к количеству элементов и связей в системе.

Необходимо отметить, что выбор показателя вероятности связи в трактовке не менее m связей в формуле сложных событий дает гарантированное значение структурной связности, следовательно, результат может использоваться в РТС специального назначения на наихудший случай. Модель также характеризуется оперативностью и точностью вычислений параметра связности сети сложных РТС при динамическом изменении ее состояния (количества связей и вероятности связи) и позволяет прогнозировать его при изменении вероятностных величин в ходе эксплуатации или развития радиоэлектронного конфликта. По сравнению с классическими способами подход информативнее, так как позволяет оценить структурную связность не только по критерию есть связь/нет связи, но и с какой вероятностью они существуют.

Представленная модель оценки структурной связности сложных систем может применяться для оценки существующих и перспективных РТС морского базирования в условиях многофакторных деструктивных воздействий [7–11].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Снежко В.К., Якушенко С.А.* Военные интегрированные системы навигации, связи и управления. – СПб.: Изд.ВАС, 2013.
2. *Воропай.Н.И.* Теория систем. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000.
3. *Бабков В.Ю., Вознюк М.А., Дмитриев В.И.* Системы мобильной связи. – СПб.: СПбГУТ, 1999; СПб.: Изд.ВУС, 1998.
4. Лукавский С. Некоторые аспекты кибертерроризма. – Геополитика.ru. https://www.geopolitica.ru/article/nekotorye-aspekty-kiberterrorizma (дата обращения 25.11.2022).
5. *Якушенко С.А.* Проблемы навигационного обеспечения систем мониторинга и диспетчеризации и оценка его безопасности // Информатика и космос/ГУАП.– 2019. – №2.
6. *Абезгауз Г.Г. и др.* Справочник по вероятностным расчетам. – М.: Воениздат, 1970, 576 с.
7. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
8. *Прасько Г. А., Якушенко С. А.* Методика расчета геометрического фактора в ССПР // Тр. 65 НТК, СПбНТОРЭС им. А.С. Попова. – 2010. – Т.2. – С.64–69.
9. *Якушенко С.А., Малышев А.К.* Прогнозирование точности позиционирования в сложных физико-географических условиях. – Науч. сессия ГУАП: сб.докл. – В 3-х ч. – 2017. – С.154–160.
10. *Дворников С.В., Крячко А.Ф., Пшеничников А.В.* Моделирование радиотехнических систем в конфликтных ситуациях когнитивного характера. – Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сб. ст. XXII Международ. науч. конфер. –В 2-х ч., Санкт-Петербург, 3–7 июня 2019 г. Ч. 2. – СПб.: СПбГУ аэрокосмического приборостроения, 2019. – С. 84–89. – EDN GLQVYA.
11. *Дворников С.В., Дворников С. С., Жеглов К. Д.* Проактивный контроль пригодности радиоканалов в режиме ППРЧ // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2022. – Т. 16. – № 11. – С. 15–20. – DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20. – EDN YLWCFH. ■

ИТОГИ СОБРАНИЯ АССОЦИАЦИИ СУДОСТРОИТЕЛЕЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

В. В. Горелов, *исполнительный директор Ассоциации судостроителей Санкт-Петербурга и Ленинградской области,*
контакт. тел. (812) 786 0530

20 ноября 2024 г. состоялось очередное заседание Ассоциации судостроителей Санкт-Петербурга и Ленинградской области. С предложением о вступлении в ассоциацию Морской технической академии имени адмирала Д. Н. Сенявина выступил ее директор – В. А. Никитин. Он рассказал о работе академии за последние годы и перспективах ее дальнейшего развития. В настоящее время академия – это современное многопрофильное учреждение среднего профессионального образования, которое расположено на семи площадках в административных границах Санкт-Петербурга. Здесь готовят специалистов по более чем 30 направлениям, связанным с судостроением, судоремонтом и эксплуатацией судов. Также академия реализует программы дополнительного профессионального образования для судоводителей, механиков и электромехаников, радиоспециалистов, специалистов для танкерного и пассажирского флота.

В. А. Никитин

В распоряжении академии – учебные классы, специализированные кабинеты, лаборатории, мастерские, компьютерные тренажеры, имитирующие навигационное и энергетическое судовое оборудование; тренажерные полигоны. Кроме того, для учеников оборудованы спортивные и борцовские залы, плавательный бассейн, стадионы с искусственным покрытием, есть шлюпочная база, скоростная моторная яхта и учебное парусное судно «Юный балтиец». Все это позволяют реализовать комплексную систему подготовки специалистов по программам среднего профессионального образования в соответствии с образовательными стандартами Российской Федерации и требованиями Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков, и несении вахты.

Президиум собрания (слева направо): В. В. Горелов и Л. Г. Грабовец

Многие сотрудники отмечены государственными, региональными и отраслевыми наградами: имеют почетные звания «Заслуженный учитель РФ» и «Заслуженный мастер производственного обучения РФ», награждены почетными знаками губернатора «За гуманизацию школы Санкт-Петербурга», «Почетный работник профессионального образования РФ», стали лауреатами Премии Правительства Санкт-Петербурга за достижения в области высшего и среднего профессионального образования.

Ежегодно на первый курс поступает более 450 человек. Численность учащихся – 1600 человек очного бюджетного обучения и 370 человек вечерне-заочного отделения. Обучение по программам профессиональной подготовки, переподготовки рабочих и повышения квалификации специалистов проходят более 6500 человек в год.

Высокая квалификация преподавателей и мастеров производственного обучения, большой практический опыт работы на морских и речных судах и предприятиях профильных отраслей обеспечивают высокое качество подготовки кадров для морской отрасли и гарантируют востребованность выпускников на рынке труда.

Учитывая инновационное образование, ориентированное прежде всего на интересы Санкт-Петербурга, стратегическое партнерство учреждений профессионального образования, бизнеса и государства, на повышение престижа профессий и специальностей морского и речного флота, члены Ассоциации судостроителей Санкт-Петербурга и Ленинградской области решили удовлетворить пожелание Морской технической академии и принять ее в свой состав.

Согласно ранее достигнутым договоренностям на форуме «Армия–2024» между Главой Республики Мордовия А. А. Здуновым и президентом Ассоциации судостроителей М. В. Александровым состоялась презентация ряда мордовских компаний, специализирующихся в судостроительной отрасли.

С докладом о перспективах применения сильфонной и приборной продукции в судостроении выступил заместитель директора Саранского приборостроительного завода В. С. Басыров, который отметил стабильно высокие показатели экономической деятельности предприятия, что является гарантией при заключении контрактов на поставку сильфонов. Кроме того, широкий спектр номенклатуры выпускаемой продукции, а также многочисленные сертификаты соответствия в различных отраслях промышленности и наличие большого числа квалифицированных кадров позволяют удовлетворять спрос

В. С. Басыров

продукции на рынке. Возможно применение сильфонов в судостроении в качестве сильфонных уплотнений и сильфонных компенсаторов. Существует технологическая возможность изготовления сильфонов и сильфонных узлов по чертежам заказчика из специальных материалов.

В докладе «Новые огнезащитные и антикоррозионные составы в судостроении» коммерческий директор НПП «ДЕКО» С. А. Миронишен рассказал о современных огнезащитных составах, которые применяются в том числе при строительстве и капитальном ремонте судостроительных заводов и верфей. Компания успешно заместила многих зарубежных игроков, ушедших с рынка, нарастив объемы собственного производства и создав на складах неснижаемый остаток. Еще одним существенным преимуществом данной компании является широко представленная официальная дилерская сеть, в том числе и в Санкт-Петербурге, где традиционно расположено большое количество судостроительных и судоремонтных предприятий. Продукция компании неоднократно успешно проходила испытания в лаборатории ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ, а также получала самые высокие экспертные оценки ВНИИПО и Академии ГПС МЧС РФ.

Значительным преимуществами составов НПП «ДЕКО» являются высокая укрывная способность – нанесение мокрого слоя толщиной более 2 мм (2000 мкм) в условиях стройплощадки или цеха позволяет сократить сроки и стоимость работ; ровное, прочное и гладкое покрытие без кратеров и посторонних включений, эксплуатация при температуре от –60 °С до +60 °С в течение 20 лет и более; удобство нанесения – составы «Декотерм» могут наноситься при температуре от –20 °С до +50 °С методом безвоздушного распыления, а также кистью или валиком; составы обеспечивают устойчивый факел при распылении, не засоряют оборудование и быстро сохнут; экономный расход – материалы «Декотерм» имеют один из лучших, подтвержденных сертификатами, показателей толщины слоя и расхода.

С. А. Миронишен

Директор по продажам ТПК «Верстакофф» С. В. Вергасов сообщил о возможностях своей компании по оснащению рабочих мест судостроительных предприятий, а также профессиональных училищ и колледжей современной промышленной мебелью с учетом специфики каждого конкретного объекта. Производство было открыто в 2005 г. и в настоящее время выпускает более 700 номенклатурных позиций серийной и специальной продукции в категории промышленная мебель и системы хранения. За последние два года компания стала не только производителем профессиональной промышленной металлической мебели и систем хранения, но и разработчиком решений по оснащению рабочего пространства предприятий и их подразделений, интегратором блоков «бережливого производства» на предприятиях и прямым поставщиком отечественной продукции собственного производства. Она имеет сеть филиалов и сервисную службу, проработана логистика.

Продукции ООО «Саранскка-бель-Оптика» был посвящен доклад заместителя директора по продажам Н. А. Минеева. ООО «Саранскка-бель-Оптика» – одно из ведущих российских предприятий кабельной промышленности и занимает второе место в России по объемам производства оптических кабелей. Компания является поставщиком волоконно-оптических кабелей связи, применяемых для магистральных, внутризоновых и распределительных сетей. В производственном арсенале есть также кабели и провода для воздушных линий электропередачи и LAN-кабели для структурированных компьютерных сетей. Имея свой испытательный центр, компания также разрабатывает и поставляет судовую электротехническую продукцию, отвечающую особо высоким требованиям, предъявляемым к продукции такого рода.

Н. А. Минеев

Придавая большое значение поддержке отечественных предприятий и учитывая создавшуюся экономическую ситуацию в области поставок зарубежного оборудования и материалов для нужд судостроения, члены Ассоциации судостроителей Санкт-Петербурга и Ленинградской области решили разослать данные презентаций компаниям-участникам профессионального сообщества и продолжить практику дальнейшего взаимодействия с предприятиями-смежниками как из Республики Мордовия, так и из других регионов Российской Федерации. ■

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМУ МОРСКОМУ СОБРАНИЮ 115 ЛЕТ СО ДНЯ СОЗДАНИЯ И 30 ЛЕТ СО ДНЯ ВОЗРОЖДЕНИЯ

С. Н. Ирютин, *канд. воен. наук, доцент,*
председатель Санкт-Петербургского Морского собрания,
контакт. тел. (812) 312 7092, morskoe-sobranie@yandex.ru

16 февраля 2025 г. исполняется 115 лет со дня создания и 30 лет со дня возрождения Санкт-Петербургского Морского собрания. В феврале 1910 г. императором Николаем II было принято решение об образовании Морского собрания в Петербурге с целью улучшения работы с адмиралами и офицерами, служащими Морского и других ведомств, которые проживали и служили в городе. В этой связи морским министром вице-адмиралом Степаном Аркадьевичем Воеводским был подписан приказ № 25 от 3 (16) февраля 1910 г., который гласил: «*Предписываю кают-компанию офицеров флотских экипажей, расположенных в Санкт-Петербурге, именовать впредь морским собранием при 2 Балтийском флотском экипаже и принять к руководству прилагаемый при сем устав собрания*». С этого момента ведет отсчет своей истории Санкт-Петербургское Морское собрание.

Возрождение Морского собрания Санкт-Петербурга состоялось в 1995 г. Устав его был принят 29 марта 1995 г. на учредительной конференции.

Сегодня СПбМС объединяет в своих рядах более 500 человек, в их числе – представители высшего командного состава Вооруженных сил, Герои Российской Федерации, Советского Союза и Социалистического Труда. Среди членов собрания – генеральный директор государственного предприятия «Адмиралтейские верфи» (1984–2012), Герой РФ, Почетный гражданин Санкт-Петербурга, доктор технических наук, профессор, почетный старшина СПбМС В. Л. Александров; генеральный директор–генеральный конструктор АО «НПП Радар ммс», доктор технических наук, Герой Труда РФ, Почетный радист РФ, действительный член СПбМС Г. В. Анцев; советский и российский конструктор глубоководных технических средств и комплексов, Герой РФ, лауреат Государственной премии РФ, действительный член СПбМС Ю. М. Коновалов и др.

СПбМС с 1910 г. активно содействует возрождению морских традиций, воспитанию моряков на идеях патриотизма и беззаветного служения Отечеству и народу. За весь прошедший период Собранием были организованы и проведены десятки научно-практических конференций, военно-исторических чтений, научные семинары, презентации книг, «круглые столы». С 1995 г. проведено 56 ассамблей и один Чесменский ужин, приуроченные и посвященные памятным датам и знаковым событиям, имеющим важное значение для морского сообщества страны.

Совет старшин. Сидят (слева направо): А. И. Штепа, Г. В. Вилинбахов, С. Н. Ирютин, Ю. Н. Кормилицин, А. Ф. Савкин, Л. Б. Горохов. Стоят (слева направо): И. С. Суховинский, В. В. Камлюк, С. О. Барышников, С. А. Куликов, С. В. Литвинов, А. В. Иванов

Передача электронного носителя с образовательными ресурсами, созданными в СПбМС, директору Института международного транспортного менеджмента ГУМРФ им. С. О. Макарова А. А. Кочину на торжественной церемонии «Посвящение в студенты» первокурсников

Собрание принимало активное участие в подготовке и проведении празднования 300-летия Российского флота в 1996 г. Прошли четыре ассамблеи, посвященные этой дате, оплачен проект и поставлено 4 т бронзы для памятника в честь 300-летия флота на Адмиралтейской набережной Санкт-Петербурга.

Для проведения реставрационных работ в Николо-Богоявленском Морском соборе и Екатерининском дворце Царскосельского музея-заповедника Собранием передано 120 книжек сусального золота и 10 т бронзы. В Севастополе во Владимирском соборе (усыпальнице адмиралов) восстановлены 70 мемориальных досок (всего их 72) с именами героев Крымской войны 1853–1856 гг.

СПбМС были изготовлены и установлены мемориальные доски морскому министру императорской России адмиралу И. К. Григоровичу (2003), инженеру-судостроителю В. П. Костенко (2006), Е. И. Юхнину (2013). Установлены памятники на могилах русских адмиралов, реставрирован и благоустроен мемориал на Серафимовском кладбище командованию Тихоокеанского флота, погибшему при исполнении служебных обязанностей. Собрание участвовало в разработке памятника генерал-адмиралу Ф. М. Апраксину в Выборге и скульптурной композиции «Полтава», установленной на набережной Невы, восстановлению памятника на могиле А. Н. Крылова.

26 июля 2005 г. на Никольском кладбище Александро-Невской лавры СПбМС при участии ВМФ России был торжественно перезахоронен доставленный из Франции прах последнего морского министра императорского флота адмирала И. К. Григоровича.

В июле 2004 г. СПбМС отметило 100-летний юбилей со дня рождения Адмирала флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова. При нашей материальной поддержке был создан документальный фильм о нем, который в юбилей демонстрировался по центральным телевизионным каналам.

СПбМС выступило инициатором и содействовало возрождению Кронштадтского и Севастопольского Морских собраний, а в 2014 г. выступило еще и инициатором и организатором подготовки и проведения мероприятий в России и за рубежом, посвященным празднованию 300-летия Гангутской победы, участие в которых приняли старшины, члены Собрания и сотрудники различных морских организаций. Были учреждены и изготовлены памятные серебряные медали, которыми награждены все члены Собрания, действующие офицеры, адмиралы и генералы ВМФ РФ, офицеры Преображенского и Семеновского полков сухопутных войск ВС РФ; проведена реконструкция Гангутского сражения на рейде п. Ханко (Финляндия), реставрация памятников русским воинам, погибшим в Гангутском сражении. В серии «Библиотека Морского собрания» издана книга «Гангут – сражение и корабли». В 2020 г. отмечалось 250-летие блестящей Победы Российского императорского флота в Чесменском сражении 26 июня (7 июля) 1770 г.

Награждение кадет Кронштадтского морского кадетского корпуса

Торжественный ритуал производства в инженеры в Высшем военно-морском инженерном училище ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

СПбМС в условиях пандемии провело ряд мероприятий, посвященных юбилею: была выпущена памятная серебряная медаль «В память 250-летия Чесменской битвы»; старшины Собрания приняли участие в торжественной церемонии полуденного выстрела с Нарышкина бастиона Петропавловской крепости; возложили цветы и венки к Чесменской колонне в Екатерининском парке в ГМЗ «Царское Село».

По инициативе СПбМС проведены мероприятия по увековечиванию памяти его членов: имя председателя СПбМС Н. В. Орлова присвоено сухогрузному судну пр. RSD59; имя старшины И. П. Саутова – одной из улиц г. Пушкин; по ходатайству Собрания Главнокомандующий ВМФ принял решение о присвоении имени почетного старшины контр-адмирала Ю. М. Халиуллина вновь строящемуся малому морскому танкеру пр.23630.

Новейшее время определило и новые задачи: с 2014 г. Собранием оказывается помощь Донбассу и участникам специальной военной операции. Были закуплены автомашины и запчасти к ним, комплекты средств связи и средства ЭВТ, дроны, генераторы для полевых госпиталей, медицинские тактические комплекты и многое другое. Оказывается помощь ветеранам боевых действий. Детям участников СВО передаются подарки, в подшефные библиотеки – книги. Перечисленные материальные средства передавались в батальон «Спарта», в части и подразделения морской пехоты Черноморского флота; подарки и книги детям в Санкт-Петербурге и в Новороссии. Так, в апреле 2022 г. более 1600 книг из детской серии «Морская слава России» направлены

Награждение офицеров в связи с 75-летием со дня образования Ленинградского высшего военно-морского инженерного училища имени В. И. Ленина

в ДНР. В сентябре 2022 г. 600 экземпляров книг передано в ЛНР, в сентябре 2024 г. – 290 книг и электронная версия фильма «Вода и воля» об адмирале С. О. Макарове, фильм об адмирале Советского Союза Н. Г. Кузнецове, материалы пяти выставок из истории сражений ВМФ – в филиал Нахимовского военно-морского училища в г. Мариуполь.

С момента своего воссоздания СПбМС продолжает оказывать материальную поддержку ветеранам Великой Отечественной войны и ВМФ, воинским частям и соединениям ВМФ и Ленинградской военно-морской базы, военно-морским и морским учебным заведениям, морским учреждениям.

Северному флоту Собранием были подарены реанимационный автомобиль и микроавтобус. На судостроительном заводе «Северная верфь» был отремонтирован БПК «Адмирал Левченко», на его покраску деньги выделило Собрание. В апреле 2001 г. был подготовлен и отправлен в поход ГИСУ «Сибиряков». Черноморскому флоту переданы в дар комплекты компьютерной техники, факсы и др. Профинансировано издание учебников и учебных пособий для ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова», Государственного университета морского и речного флота им. С. О. Макарова, Военно-медицинской академии. Библиотеки военно-морских, морских учебных заведений, учебных кораблей постоянно пополняюсь книгами из серии «Библиотека Морского собрания».

В 2016 г. Собрание приняло участие в подготовке и проведении празднования 320-летия создания отечественного флота, в 2017 и 2018 гг. – Главных военно-морских парадов, 2013 и 2018 гг. – юбилеев Балтийского, Северного и Черноморского флотов.

В августе 2020 г. Севастопольскому нахимовскому училищу для обеспечения гребли на ялах и походах под парусом подарен катер от СПбМС.

В Собрании создана и работает наградная комиссия, Советом старшин создана стройная система награждения лиц за активное участие в деятельности СПбМС, за высокие достижения в укреплении боевой готовности флота, за существенный вклад в дело развития морского и речного транспорта, за участие в значимых плаваниях и походах, а также за научные достижения. Награды СПбМС (ордена и медали) прошли регистрацию в Федеральном государственном геральдическом совете при Президенте РФ. За прошедшие годы более 10 000 человек были награждены орденами и медалями СПбМС. Кавалерами всех наград СПбМС являются: генеральный директор «Адмиралтейских верфей» (1984–2012), Герой РФ, доктор технических наук, профессор, Почетный старшина Собрания В. Л. Александров, генеральный директор ЗАО «Канонерский судоремонтный завод», доктор технических наук, профессор, старшина Собрания Н. М. Вихров, почетный член Собрания адмирал В. А. Попов и др.

Вручение приза Почетного председателя Санкт-Петербургского Морского собрания победителям гонки парусных яхт, посвященных Дню ВМФ

Отдельно надо сказать об исторической исследовательской работе и издательской деятельности Собрания. Выпущены десятки книг по истории ВМФ. Среди них – монографии доктора исторических наук П. А. Кротова «Гангут. Сражения и корабли» и «Российский флот на Балтике при Петре Великом» и доктора исторических наук Г. А. Гребенщиковой «Россия и Турция. Двенадцать невыученных уроков», «Чесменская победа. Триумф России в Средиземном море». Переизданы труды академика А. Н. Крылова «Мои воспоминания». В 2016 г. к юбилею ВМФ России Собранием по поручения Главного командования ВМФ была выпущена книга «Военно-Морской Флот России. 320 лет», в 2017 г. – «Главный военно-морской парад», а в 2018 г. – юбилейные издания для Черноморского и Балтийского флотов.

С 2014 г. для повышения патриотизма подрастающего поколения принято решение об издании детской серии книг «Морская слава России», посвященных самым ярким победам отечественного ВМФ. За десять лет вышло 13 книг серии: обо всех 13 крупнейших сражениях русских кораблей эпохи парусного флота – от работы «Гангут. 1714» до «Синоп. 1853».

Книги, издаваемые СПбМС, четырежды выдвигались на соискание Премии Министерства обороны РФ в области культуры и искусства в номинации «Литературное творчество и издательское дело» и трижды были отмечены высокими наградами: специальный диплом Премии МО РФ в области культуры и искусства получили книги «Военно-Морской Флот России. 320 лет» (2019 г.), серия книг «Традиции русского флота» (2022 г.) также получила благодарность департамента культуры

Министерства обороны РФ, как и детская серия книг «Морская слава России» (2023 г.). Все книги, издаваемые Начато издание книг для детей серий «Русские флотоводцы», «Корабли-герои» и «Морские форпосты России». В 2023 г. для нахимовских училищ, кадетских корпусов и курсантов морских учебных заведений вышла в свет книга карманного формата «Традиции русского флота», изданная Собранием при участии ассоциации «Клуб Русская морская традиция». Тысяча экземпляров первого тиража этой книги выданы курсантам, нахимовцам и кадетам КМКВК.

СПбМС организовало выпуск уникального трехтомного издания документов выдающегося русского военно-морского деятеля, героя русско-японской войны, полярного исследователя, кораблестроителя, ученого, адмирала С. О. Макарова. Они издавались еще в 1953 г., более 70 лет назад, поэтому назрела необходимость их переиздания, за что на имя председателя Собрания поступила благодарность Федерального архивного агентства.

Большое внимание СПбМС уделяет экспозиционно-выставочной работе. Знаковыми реализованными проектами стали выставки «Гангут – 300 лет» (2014); «Чесма – 250 лет» (2020); «Честь. Флот. Отечество – 110 лет Санкт-Петербургскому Морскому собранию» в ЦВММ им. Петра Великого (2020), «320-лет победы войск Петра Великого на реке Омовже» (2024) и «320 лет основания Кронштадта» (2024).

Большое внимание традиционно уделяется работе с молодежью – нахимовцами, кадетами, курсантам высших военно-морских и морских учебных заведений, курсантам морской академии, учащимися общеобразовательных школ. Собрание сотрудничает с Кронштадтским морским кадетским военным корпусом МО РФ, ГБОУ «Морская кадетская школа» Московского района, ГБОУ школа № 407 им. В. П. Бухтеева (г. Пушкин), клубом юных моряков «Флагман» Василеостровского района, яхт-клубом «Паруса Плещеева озера», администрацией г. Переславль-Залесский, государственными музеями-заповедниками «Царское Село», «Михайловское», «Изборск», Псковским музеем-заповедником, музеем-усадьбой «Ботик Петра I».

В Собрании организованы и работают секции судостроителей, капитанов Балтики, военно-морская, истории Российского флота, парусного спорта и бильярдная. Так, парусной секцией ежегодно организуется регата «Гонки парусных яхт, посвященные Дню ВМФ

Церемония посвящения в курсанты ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова во главе с заместителем министра транспорта А. И. Пошивай

Принятие присяги курсантами Военного учебно-научного центра военно-морского флота «Военно-морская академия имени Адмирала флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова»

России» на Кубок Почетного председателя СПбМС, регата «Санкт-Петербургская Парусная неделя», Псковская парусная регата и др.

В рамках Морского собрания работает экспертный Совет по безопасности мореплавания и морскому праву.

В 2014 г. в создан музей СПбМС, в котором сегодня насчитывается свыше 200 экспонатов. В 2023 г. он принят в Ассоциацию военно-морских музеев и хранителей морских ценностей.

Санкт-Петербургское Морское Собрание уверенно смотрит в будущее. Члены Собрания – это люди с активной жизненной позицией, высокообразованные, мыслящие, анализирующие ситуацию, генераторы идей и предложений, патриоты моря, флота и России, для которых бессмертные слова генерал-адмирала русского флота великого князя Константина Николаевича «За флот России надо бороться» являются призывом к действию. ■

ТРЕБОВАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ СТАТЕЙ И УСЛОВИЯ ИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

1. Автор представляет статью в электронном виде объемом до 20 000 знаков, включая рисунки. Текст набирается в редакторе MS Word под Windows, формулы – в формульном редакторе MathType. Иллюстрации, помещенные в статье, должны быть представлены дополнительно в форматах: TIFF CMYK (полноцветные), TIFF GRAYSCALE (полутоновые), TIFF BITMAP (штриховые), EPS, JPEG, с разрешением 300 dpi для полутоновых, 600 dpi для штриховых и в размерах, желательных для размещения.

2. Статья должна содержать реферат объемом до 300 знаков, ключевые слова и библиографо-библиотечный индекс УДК. Автор указывает ученую степень, ученое звание, место работы, должность и контактный телефон, а также дает в письменной форме разрешение редакции журнала на размещение статьи в Интернете и Научной электронной библиотеке после публикации в журнале. Статья представляется с рецензией.

3. Статьи соискателей и аспирантов принимаются к публикации на бесплатной и безгонорарной основе.

4. Контрольное рецензирование этих статей осуществляет редакционная коллегия с привлечением при необходимости профильных специалистов. Рецензии на статьи хранятся в редакции журнала в течение 5 лет.

5. В случае отказа в публикации автору высылается рецензия. Копии рецензий направляются в Минобрнауки России при поступлении соответствующего запроса в редакцию журнала.

6. Содержание журнала ежеквартально представляется на рассмотрение редакционному совету. Решение о выпуске очередного номера оформляется протоколом.

РЕФЕРАТЫ

УДК 629.5.023.12 **Ключевые слова:** профиль, тавровый, DIN-профиль, транспортное судно, масса, стоимость

К.В. Антонов, А.В. Кошелев, А.И. Кокурин, В.А. Антонов. О целесообразности применения DIN-профилей на транспортных судах. Вопросы снижения массы конструкций, трудоемкости и стоимости постройки судов//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 7

В условиях объективных трудностей с закупкой DIN-профилей зарубежного производства важен анализ возможности применения сварных тавровых профилей в качестве балок основного набора на крупнотоннажных транспортных судах. Т. 2. Ил. 6. Библиогр. 4 назв.

УДК 629.12+629.73 **Ключевыеслова:**устройствотранспортировки корабельного вертолета, система технического обслуживания, взлетно-посадочная площадка, летательный аппарат корабельный

С.Н. Гречин, Н.С. Григорьев. Вертолетные обслуживающие системы на кораблях ведущих стран мира в сравнении с устройствами транспортировки корабельных вертолетов ВМФ РФ. Часть 1//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 11

Рассмотрены основные типы устройств транспортировки корабельных вертолетов ВМФ ведущих стран мира в связке со смежными системами обслуживания палубной вертолетной техники. Ил. 21.

УДК 620; 691 **Ключевые слова:** живучесть корабля, безопасность системы, опасное состояние системы, логико-вероятностный метод, сложные технические системы, схема функциональной целостности, моделирование корабельного пожара

П.А. Зубков. Оценка влияния инновационных технических решений ООО «МКС» на живучесть корабля с использованием логико-вероятностных методов//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 23

Раскрыты основные этапы применения программных средств логико-вероятностных методов (ЛВМ) при оценке влияния инновационных технических решений на противопожарную безопасность корабельных помещений. Т. 1. Ил. 5. Библиогр. 5 назв.

УДК 623.4.011 **Ключевые слова:** метод аналитических сетей, погрешность, стохастическая суперматрица, комплексная оценка

О.В. Третьяков, М.В. Шебуняев, П.И. Щукин, А.И. Гайкович. О влиянии приближений элементов суперматрицы на решение задач методом аналитических сетей//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 26

Рассмотрены особенности использования метода аналитических сетей при принятии решения, а также влияние погрешностей вычисления на итоговый результат. Статья ориентирована на комплексную оценку боевых свойств кораблей ВМФ. Т. 7. Ил. 2. Библиогр. 3 назв.

УДК 629.5.035:532.32 **Ключевые слова:** швартовный режим, гидродинамическая эффективность, лопастные движители

А.Р. Тогуняц, С.Л. Анчиков, Л.И. Вишневский. О работе лопастных движителей на швартовном режиме//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 29

Представлен обзор показателей гидродинамической эффективности лопастных движителей на швартовном режиме, применяемых при их проектировании. Дан прогноз показателя эффективности лопастного движителя типа соосные гребные винты в насадке на швартовном режиме. Т. 4. Ил. 2. Библиогр. 19 назв.

УДК 629.5.06 **Ключевые слова:** судостроение, макетирование, изделие, прототипирование, трехмерная модель, реверс-инжиниринг

А.А. Крюков. Цифровое макетирование судовых систем//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 33

Рассмотрены перспективы реверс-инжиниринга при создании судовых систем. В современном судостроении применяются зарубежные и отечественные программные продукты, позволяющие создавать цифровые объекты и судовой техники, и всего судна. Ил. 3. Библиогр. 10 назв.

УДК 656.61 **Ключевые слова:** транспортная стратегия РФ, морское автономное надводное судно, Кодекс безопасности МАНС, МП-ПСС–72, безопасность и эффективность автономных судов, государственная программа «Автономное судоходство»

В.В. Ефимов, А.С. Скрыпка, Е.В. Шишенин. Автономное судоходство в России: состояние, проблемы, предложения//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 35

Предложено разработать государственную программу «Автономное судоходство» и решить ряд первоочередных задач до ее появления. Т. 2. Библиогр. 11 назв.

УДК 004.946, 621.7.01, 378.147.88 **Ключевые слова:** цифровизация, учебный процесс, САПР, технологический процесс, цифровой двойник

Л.В. Гукова, Е.А. Логинова, А.В. Протасов, Л.Л. Соколов, В.Г. Юрьев. Опыт разработки и применения цифровых двойников устройств абразивной обработки изделий судового машиностроения//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 42

Рассмотрены результаты разработки и применения виртуальных моделей устройств для абразивной механообработки в судовом машиностроении. По мнению авторов, использование виртуализированных технических объектов на должных стадиях исследовательского процесса является эффективным дополнением к существующим методам. Ил. 3. Библиогр.8 назв.

УДК 629.128 **Ключевые слова:** цифровизация, судоремонтное предприятие, доковый ремонт, подготовка производства, цифровая платформа, судовая арматура, закономерности и цикличность, единая база знаний

Д.И. Гомонов, Г.Я. Кремлёв. Цифровизация судоремонтного предприятия//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 44

Сформулированы основные задачи цифровизации судоремонтного предприятия. Рассмотрен пример конструкторской, технологической, материально-технической и организационно-плановой подготовки производства. Ил. 2.

УДК 629.5 **Ключевые слова:** автономный необитаемый подводный аппарат большой дальности, электрохимический генератор (ЭХГ), литий-ионная аккумуляторная батарея, энергетическая установка, батарея топливных элементов, энергетический отсек, забортная вода, алгоритм расчета, математическая модель, температура, скорость

А.Н. Дядик, В.А. Дядик, Д.С. Маловик. Определение характеристик энергетического отсека с электрохимическим генератором для автономного необитаемого аппарата большой дальности//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 49

Приведен алгоритм расчета, по которому написана программа на языке Matchad-15 и рассчитаны характеристики энергетического отсека с электрохимическим генератором для гибридной установки применительно к автономному необитаемому подводному аппарату большой дальности. Определено, что подобный режим является наиболее тяжелым для батареи топливных элементов из-за высокой температуры воздуха энергетического отсека. Ил.8. Библиогр. 11 назв.

УДК 621.436:621.438 **Ключевые слова:** инновация, многоцелевые корабли, газотурбинные двигатели, корабельные энергетические установки, схемное исполнение энергетических установок, частичное электродвижение, гребные электродвигатели

К.Г. Голубев, В.В. Барановский, К.А. Ефремов. Перспективы развития энергетики кораблей будущего. Анализ технических решений//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 56

Проведен анализ развития корабельных энергетических установок ведущих морских держав, а также опыта разработки и создания энергетической установки корвета «Меркурий», обоснован облик унифицированной энергетической установки перспективных кораблей основных классов. Т. 1. Ил. 7. Библиогр. 7 назв.

УДК 621.64 **Ключевые слова:** подводная лодка, кингстон, цистерна главного балласта, система погружения и всплытия, повышение надежности

Д.Л. Аверьянов, А.В. Сихимбаев. Кингстоны цистерн главного балласта со встроенным пневмопружинным приводом//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 61

Предлагается решение актуальной проблемы подводного кораблестроения – повышения надежности системы погружения и всплытия, снижение сложности и стоимости ее изготовления за счет изменения конструкции кингстонов балластных емкостей, установленных в качестве запорного органа нижних приемно-отливных отверстий цистерн главного балласта подводных лодок. Ил. 9. Библиогр. 3 назв.

УДК 621.512.3 **Ключевые слова:** диагностика, поршневой компрессор, системы управления, анализ, робастный метод, прогнозирование

Р.Р. Хотский, А.В. Бураков. Разработка и внедрение устройства робастного экспоненциального прогнозирования технического состояния судовых поршневых компрессоров//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 65

Проанализированы различные способы робастного экспоненциального прогнозирования и диагностики компрессоров для применения в системе автоматизации судовых компрессорных установок. Ил. 8. Библиогр. 8 назв.

УДК 621.17 **Ключевые слова:** технологический конденсатор, Ansys Fluent, HTRI, конденсация пара, VoF, двухфазные течения, пленочная конденсация

А.Е. Усов, Г.С. Коленько. Численное моделирование конденсации пара в технологическом конденсато-

ре энергетической установки с помощью CAE-пакетов//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 71

В работе рассмотрены и сравнены аналитические и численные методы теплового расчета процессов конденсации пара в энергетических и технологических конденсационных установках на примере уже успешно реализованной конструкции технологического конденсатора производства ООО «Винета». Выполнено численное моделирование процесса конденсации потока пара на горизонтальном трубном пучке с помощью пакета ANSYS Fluent. Оценена погрешность расчетов и определены границы применимости аналитических и численных методов. Т. 1. Ил. 5. Библиогр. 2 назв.

УДК 629.5.025.74 **Ключевые слова:** груз, практический эксперимент, спуск-подъем, метод определения угла скручивания сменного элемента подъема, методика проведения испытаний

Н.А. Грибенюк, А.Н. Осин. Метод определения угла скручивания сменного элемента подъема//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 73

Описан проведенный в рамках научно-исследовательской работы практический эксперимент, при помощи которого определен тип сменного элемента подъема груза обеспечивающий и его спуск без изменения исходного положения. Т. 1. Ил. 1

УДК 621.039.512 **Ключевые слова:** судовой ядерный реактор, активная зона, тепловой расчет, нейтронно-физический расчет

В.Р. Ефремов, А.А. Иванов. Разработка программы проведения теплового и нейтронно-физического расчетов судовых водо-водяных ядерных реакторов//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 76

Описано разработанное программное обеспечение для проведения тепловых и нейтронно-физических расчетов судовых водо-водяных ядерных реакторов. Приведены результаты расчетов, выполнено сравнение полученных результатов с имеющимися данными по существующим ядерным реакторам. Рассмотрены перспективы дальнейшей доработки программы. Т. 2. Ил.2. Библиогр. 8 назв.

УДК 532.528 **Ключевые слова:** кавитация, холодильник, поверхность трубки теплообменника, кумулятивная струя, диаметр пузыря, кинетическая энергия, микрообъем жидкости, вскипание жидкости, захлопывание пузыря, граница раздела, двухфазный поток

А.Н. Дядик, В.А. Дядик, Д.С. Маловик. Особенности работы холодильника в одноконтурной схеме ядерной газотурбинной установки//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 78

Приведена математическая модель поведения морской воды в межтрубном пространстве забортного холодильника ядерной газотурбинной установки, предназначенной для малогабаритного морского подводного объекта. Ил. 5. Библиогр. 14 назв.

УДК 623.973 **Ключевые слова:** низкочастотное электромагнитное поле, источник, система компенсации, электромагнитная индукция, измеритель индукции магнитного поля

Б.Ю. Семёнов. Контроль магнитных моментов низкочастотного электромагнитного поля корабельного электрооборудования с использованием дифференциальной методики компенсации помехи//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 83

Проанализирована методика контроля магнитных моментов низкочастотного электромагнитного поля корабельного электрооборудования, предложены методические и схемотехнические решения, позволяющие с минимальной трудоемкостью исключить влияние внешней помехи с частотой 50 Гц. Ил. 2.

УДК 621.396.67 **Ключевые слова:** АО «НТИ «Радиосвязь», передающие и приемные коротковолновые и приемопередающие ультракоротковолновые антенны, антенный коммутатор коротковолнового и ультракоротковолнового диапазонов, автоматизированный комплекс связи (АКС)

А.Ю. Степкин, В.А. Казначеев, Я.А. Демидов, Развитие антенной техники надводных кораблей//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 87

О деятельности АО «НТИ «Радиосвязь» с 1991 г.– разработке, изготовлении и поставке антенн и антенных коммутаторов различного назначения для надводных кораблей (НК) ВМФ. Даны краткие описания и изображения антенн, коммутаторов, согласующего устройства. Ил. 6

УДК 621.37 **Ключевые слова:** анализ моделей, распространение радиоволн, узкополосный и широкополосный декаметровый канал связи, модель Ваттерсона

А.С. Батурин, А.Н. Киченко, В.Э. Гель. Анализ моделей распространения радиоволн в декаметровом диапазоне, применяемых при проектировании средств радиосвязи//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 89

Анализ рассмотренных моделей позволяет сделать вывод о том, что для моделирования узкополосного декаметрового канала связи чаще всего достаточно и целесообразно использовать модель Ваттерсона, а для моделирования широкополосного декаметрового канала связи интерес представляет модель, разработанная сотрудниками МТУСИ. Т. 1. Ил.6. Библиогр. 9 назв.

УДК 656.078: 656.62 **Ключевыеслова:**морскаятранспортная система, территориальность, контролируемость, рисковость, логистическая активность, контролинговый дуализм

С.М. Доценко, Д.В. Звездарёв, А.А. Бенгерт, С.И. Биденко, Д.И. Якушев, Е.А. Рылов, И.А. Полковников. Моделирование морской транспортной системы в условиях многофакторных рисков//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 95

Выявлены общие характеристики компонентов морских транспортных систем (ТС) – их территориальность, контролируемость и рисковость. Показана всеобщность категории «риск» как описательной и оценочной метрики объектов и процессов морской транспортной логистики. Проанализированы базовые концепции риска. Сформулированы рекомендации по учету контролингового дуализма категории «риск» в процедурах управления морской транспортной активностью. Т. 1. Ил. 10. Библиограф. 31 назв.

УДК 621.391 **Ключевые слова:** терминалы VSAT, технологии стандарта DVB-S2X, аномалии демодулированного трафика, модель энергетической оценки

И.М. Жданова, С.С. Дворников, С.В. Дворников. Модель возникновения аномалий в демодулированном трафике абонентских терминалов VSAT//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 101

Представлены результаты исследования ситуаций, связанных с построением сетей на базе терминалов VSAT, использующих технологии стандарта DVB-S2X. Рассмотрены технические особенности технологии стандарта DVB-S2X, приводящие к возникновению аномалий в демодулированном трафике. Приведены энергетические соотношения, характеризующие возникающую ситуацию. Разработана модель оценки энергетических соотношений, при которых возможна такая ситуация. Т. 2. Ил. 2. Библиогр. 29 назв.

УДК 625.5 **Ключевые слова:** имитационное моделирование, тренажёр, телеуправляемый необитаемый подводный аппарат

К.С. Дементьев, В.Н. Кондратьев, К.А. Смирнов. Имитационное моделирование в системе обучения пилотов телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 105

Проанализированы требования к тренажёрам телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА). Описана структура поставляемых АО «МНС» тренажёров ТНПА. Приведен объем имитируемых сценариев подводно-технических работ. Ил. 8

УДК 621.396 **Ключевые слова:** радиомониторинг, сигнал, контроль, радиообстановка, автоматизация, обработка, мониторинг

А.Н. Киченко. Типы сигналов, исследуемые системами радиомониторинга//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 107

В настоящее время не разработаны методы обнаружения, фильтрации и классификации случайных сигналов, необходимые для создания систем автоматического радиоконтроля. В статье показано, что изучение новых методов цифровой обработки позволяет использовать их не только для контроля радиотехнических средств, но и для повышения качества связи как в обычных условиях, так и в сложной радиоэлектронной обстановке. Ил.1. Библиогр. 6 назв.

УДК 621.396 **Ключевые слова:** амплитудный квантователь, цифровые устройства обработки радиолокационных сигналов, воздействующие помехи, вызванные волнением моря, судовые радиолокационно-вычислительные системы, лоцируемые цели

Е.К. Самаров. Экспериментальные исследования амплитудного квантователя со стабилизированным порогом при воздействии помех, вызванных волнением поверхности моря//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 109

Выполнено экспериментальное исследование двух способов квантования в условиях реальной радиолокационной обстановки. Показано, что применение амплитудного квантователя со случайными порогами наиболее целесообразно в устройствах автоматического обнаружения сигналов судовых радиолокационных станций при воздействии помех от волнения моря. Ил. 3. Библиогр. 8 назв.

УДК 629.7.017.1 **Ключевые слова:** системный подход, управляемые снаряды ВМФ, необходимый ущерб, критерий «стоимость–эффективность», информационная поддержка принятия решения, статистическое моделирование на ПЭВМ

О.Г. Мальцев. Системный подход к назначению управляемых снарядов в залп с кораблей тактической группы//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 113

Исследован системный подход к формированию залпа управляемых снарядов (УС) с кораблей тактических групп ВМФ. Суть подхода состоит в назначении для залпа минимального количества УС, достаточного для нанесения противнику необходимого ущерба (в соответствии с критерием «стоимость–эффективность»). Эффективность подхода иллюстрируется результатами статистического моделирования на ПЭВМ. Ил. 2. Библиогр. 8 назв.

УДК 621.391. 2 **Ключевыеслова:**синусоидальноеколебание, энергетические характеристики, случайный процесс, корреляционные и спектральные функции, двумерная плотность, преобразование Фурье

Е.К. Самаров, Я.Ю. Ионченкова. Вероятностные и энергетические характеристики гармонических сигналов, которые принимаются корабельными радиоприемными устройствами, модулированных нормальными случайными процессами//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 118

Рассмотрены и проанализированы вероятностные и энергетические характеристики гармонических сигналов, поступающих на вход корабельных радиоприемных устройств, модулированных нормальными случайными процессами. Представлена двумерная плотность распределения вероятностей суммы случайно модулированного колебания и некоррелированного нормального шума. Приведены частные примеры. Библиогр. 8 назв.

УДК 621.391 **Ключевые слова:** радиотехническая система, структурная связность, доступность, вероятность связи

С.В. Дворников, С.А. Якушенков, В.К. Снежко. Математическая модель оценки структурной связности радиотехнических систем морского базирования//Морской вестник. 2024. № 4 (92). С. 120

Предложена математическая модель оценки структурной связности элементов радиотехнических систем при воздействии внешних факторов. Особенностью модели является учет вероятностного характера связей, определяемых их наличием между элементами системы морского базирования, что позволит отслеживать деградацию связей в динамике развития деструктивных воздействий. Ил. 2. Библиогр. 11 назв.

REQUIREMENTS FOR THE PREPARATION OF ARTICLES AND THE TERMS OF THEIR SUBMISSION

1. Authors shall submit articles of up to 20,000 characters, including figures, in electronic form. The text shall be typed in MS Word under Windows, formulas – in the equation editor «MathType.» Illustrations present in the article shall be submitted additionally, in the following formats: TIFF CMYK (full color), TIFF GRAYSCALE (grayscale), TIFF BITMAP (dashed), EPS, JPEG, with resolution of 300 dpi for grayscale figures and 600 dpi for dashed ones and in sizes desired for placement.

2. Articles shall contain an abstract of up to 300 characters, keywords, and bibliographic library UDC identifier. Authors shall indicate their degree, academic status, place of employment, job position, and telephone number, as well as provide a written permission of the Editor to place articles on the Internet and in the Scientific Electronic Library after publication in the journal. Articles shall be submitted with reviews.

3. The articles of postgraduate and degree-seeking students shall be accepted for publication on a free and royalty-free basis.

4. The control review of these articles shall be performed by the editorial board, with the assistance of dedicated experts, if necessary. Reviews of articles are stored in editorial office of the magazine within 5 years.

5. In case of refusal to publish articles, reviews shall be sent to authors. Copies of reviews go to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation at receipt of the corresponding inquiry in editorial office of the magazine.

6. The contents of the journal shall be submitted to the editorial board quarterly. The decision concerning the next issue of the journal shall be formally established with the protocol.

ABSTRACTS

UDC 629.5.023.12 **Keywords**: profile, T-shaped, DIN-profile, transport vessel, weight, cost

K.V. Antonov, A.V. Koshelev, A.I. Kokurin, V.A. Antonov. On the feasibility of using DIN-profiles on transport vessels. Issues of reducing the weight of structures, labor intensity and cost of building ships//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 7

In the context of objective difficulties with the purchase of DIN-profiles of foreign manufacture, it is important to analyze the possibility of using welded T-profiles as beams of the main set on large-tonnage transport vessels. T. 2. Fig. 6. Bibliography 4 titles.

UDC 629.12+629.73 **Keywords**: shipborne helicopter transportation device, maintenance system, takeoff and landing pad, shipborne aircraft, operation, technical analysis

S.N. Grechin, N.S. Grigor'ev. Helicopter maintenance systems on ships of the world's leading countries in comparison with devices for transporting shipborne helicopters of the Russian Navy. Part 1//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 11

The main types of devices for transporting shipborne helicopters of the Navy of the world's leading countries are considered in conjunction with related systems for servicing deck helicopter equipment. Fig. 21.

UDC 620;691 **Keywords**: ship survivability, system safety, hazardous system state, logical-probabilistic method, naval surface ships, complex technical systems, functional integrity diagram, ship fire modeling

P.A. Zubkov. Evaluation of the impact of innovative technical solutions of MCS LLC on ship survivability using logical-probabilistic methods//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 23

The article reveals the main stages of applying software tools of logical-probabilistic methods in assessing the impact of innovative technical solutions on the fire safety of ship premises. The article illustrates the main stages of using the apparatus of logical-probabilistic methods, which allow for a quantitative assessment of the probabilistic characteristics of fire safety of residential and service premises depending on the materials used. T. 1. Fig. 5. Bibliography 5 titles.

UDC 623.4.011 **Keywords**: analytical network method, rounding error, stochastic supermatrix, comprehensive assessment

O.V. Tret'yakov, M.V. Shebunyaev, P.I. Shchukin, A.I. Gaikovich. On the influence of supermatrix element approximations on solving problems using the analytical network method//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 26

The article considers the features of using the analytical network method in decision-making, as well as the influence of calculation errors on the final result. The topic of the article is focused on a comprehensive assessment of the combat properties of Navy ships. T. 7. Fig. 2. Bibliography 3 titles.

UDC 629.5.035:532.32 **Keywords**: mooring mode, hydrodynamic efficiency, blade propulsors

A.R. Togunjac, S.L. Anchikov, L.I. Vishnevsky. On the operation of blade propulsors in mooring mode//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 29

A review of the hydrodynamic efficiency indicators of blade propulsors in mooring mode, used in the practice of their design, is presented. A computational assessment of the parameters of the hydrodynamic efficiency of open propellers, propellers in a nozzle, counter-rotating propellers in mooring mode was carried out based on data from diagrams of serial tests of their models. A forecast of the efficiency indicator of counter-rotating propellers in a nozzle in mooring mode is given. T. 4. Fig.2. Bibliography 19 titles.

UDC 629.5.06 **Keywords**: modeling, product, prototyping, 3D model, reverse engineering, shipbuilding

A.A. Kryukov. Digital modeling of ship systems//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 33

The article considers the prospects of reverse engineering in the creation of ship systems. Important sections of reverse engineering are prototyping and modeling. The process of modeling consists in creating an exact copy of the future product. In modern shipbuilding, both foreign and domestic software products are used, allowing the creation of digital objects of both ship equipment and the entire vessel. Fig. 3. Bibliography 10 titles.

UDC 656.61 **Keywords**: Transport Strategy of the Russian Federation, autonomous marine surface vessel, IANS Safety Code, Autonomous Navigation project, Russian Maritime Register of Shipping, Russian Classification Society, COLREG-72, safety and efficiency of autonomous vessels, state program «Autonomous Shipping»

V.V. Efimov, A.S. Skrypka, E.V. Shishenin. Autonomous shipping in Russia: status, problems, proposals//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 35

The article considers international and Russian factors associated with the implementation of one of the goals of the transport strategy of the Russian Federation for the development of autonomous water transport. T. 2. Bibliography 11 titles.

UDC 004.946, 621.7.01, 378.147.88 **Keywords**: digitalization, educational process, CAD, technological process, digital twins

L.V. Gukova, E.A. Loginova, A.V. Protasov, L.L. Sokolov, V.G. Yuryev. Experience in the Development and Application of Digital Twins of Abrasive Machining Devices for Marine Engineering Products//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 42

The article considers the results of the development and application of virtual models of devices for abrasive machining in marine engineering. According to the authors, the use of virtualized technical objects to the proper extent and at the proper stages of the research process is an effective addition to existing methods and means and is promising, among other things, for the development of the educational process of engineering universities. Fig. 3. Bibliography 8 titles.

UDC 629.128 **Keywords**: digitalization, ship repair enterprise, dock repair, production preparation, digital platform, ship fittings, patterns and cyclicality, unified knowledge base

D.I. Gomonov, G.Ya. Kremlyov. Digitalization of a ship repair enterprise//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 44

The main tasks of digitalization of a ship repair enterprise are formulated. An example of design, technological, logistical and organizational-planning preparation of production is considered. The search for patterns in the application of digitalization and the principle of forming a unified knowledge base (information) for ship repair enterprises are defined. Fig. 2.

UDC 629.5 **Keywords**: autonomous long-range unmanned underwater vehicle (AUV BD), electrochemical generator (ECG), lithium-ion battery (LIAB), power plant, fuel cell battery, power compartment, seawater, calculation algorithm, mathematical model, temperature, speed

A.N. Dyadik, V.A. Dyadik, D.S. Malovik. Determining the characteristics of the power compartment with an electrochemical generator for an autonomous Long-Range Unmanned Vehicle//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 49

The article presents a calculation algorithm, according to which a program was written in the Matchad-15 language and the characteristics of the power compartment with an electrochemical generator for a hybrid installation were calculated as applied to an autonomous long-range unmanned underwater vehicle. The developed calculation program allows to determine the real speed of the device at any given speed by the method of successive approximations. Based on the calculation results, it was determined that such a mode is the most difficult for the battery of fuel cells due to the high air temperature of the power compartment. Fig. 8. Bibliography 11 titles.

UDC 621.436:621.438 **Keywords**: innovation, navy, naval forces, combat surface ships, multipurpose ships, gas turbine engines, marine power plants, circuit design of power plants, partial electric propulsion, propulsion electric motors

K.G. Golubev, V.V. Baranovsky, K.A. Efremov. Prospects for the Development of Energy for Future Ships. Analysis of Technical Solutions//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 56

The article analyzes the development of marine power plants of the leading maritime powers, as well as the experience of developing and creating the power plant of the corvette «Mercury», substantiates the appearance of a unified power plant for promising ships of the main classes. T. 1. Fig. 7. Bibliography 7 titles.

UDC 621.64 **Keywords**: submarine, kingston, main ballast tank, diving and surfacing system, improving reliability

D.L. Aver'yanov, A.V. Sikhimbayev. Kingstons of main ballast tanks with built-in pneumatic spring drive//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 61

A solution to a pressing problem in submarine shipbuilding is proposed – increasing the reliability of the diving and surfacing system, reducing the complexity and cost of its manufacture by changing the design of the kingstons of ballast tanks installed as a shut-off device for the lower inlet and outlet openings of the main ballast tanks of submarines. Fig. 9. Bibliography 3 titles.

UDC 621.512.3 **Keywords**: diagnostics, piston compressor, control systems, analysis, robust method, forecasting

R.R. Khotskiy, A.V. Burakov. Development and implementation of a device for robust exponential forecasting of the technical condition of marine piston compressors//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 65

The article presents the enterprise's experience in the field of creating compressor equipment with control systems that provide functions for monitoring the current state of compres-

sor equipment and forecasting changes in its parameters, analyzes various methods of robust exponential forecasting and diagnostics of compressors for use in the automation system of marine compressor units.. Fig. 8. Bibliography 8 titles.

UDC 621.17 **Keywords**: process condenser, Ansys Fluent, HTRI, steam condensation, VoF, two-phase flows, film condensation

A.E. Usov, G.S. Kolenko. Numerical modeling of steam condensation in a process condenser of a power plant using CAE packages//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 71

The paper considers and compares analytical and numerical methods for thermal calculation of steam condensation processes in power and process condensation units using the example of a successfully implemented design of a process condenser manufactured by Vineta LLC. Numerical modeling of the steam flow condensation process on a horizontal tube bundle was performed using the ANSYS Fluent package. The calculation error was estimated and the applicability limits of the analytical and numerical methods were determined. T. 1. Fig. 5. Bibliography 2 titles.

UDC 629.5.025.74 **Keywords**: cargo, practical experiment, descent-ascent, method for determining the twist angle of a replaceable lifting element, testing methodology

N.A. Gribenyuk, A.N. Osin. Method for Determining the Twist Angle of a Replaceable Lifting Element//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 73

A practical experiment conducted as part of a research project is described, with the help of which the type of replaceable lifting element for a cargo that ensures its descent without changing its initial position is determined. T. 1. Fig. 1

UDC 621.039.512 **Keywords**: marine nuclear reactor, core, thermal calculation, neutron-physical calculation

V.R. Efremov, A.A. Ivanov. Development of a program for conducting thermal and neutron-physical calculations of marine pressurized water-moderated nuclear reactors//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 76

The developed software for conducting thermal and neutron-physical calculations of marine pressurized water-moderated nuclear reactors is described. The calculation results are presented, the obtained results are compared with the available data on existing nuclear reactors. The prospects for further development of the program are considered.T.2. Fig. 2. Bibliography 8 titles.

UDC 532.528 **Keywords**: cavitation, steam bubble, refrigerator, surface, heat exchanger tubes, cumulative jet, bubble diameter, kinetic energy, liquid microvolume, liquid boiling, bubble collapse, interface, two-phase flow

A.N. Dyadik, V.A. Dyadik, D.S. Malovik. Features of the refrigerator operation in a single-circuit scheme of a nuclear gas turbine plant//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 78

The article presents a mathematical model of the behavior of sea water in the inter-tube space of the overboard refrigerator of a nuclear gas turbine plant intended for a small-sized underwater marine object. The probability of overboard water boiling on the surface of the refrigerator tubes in microdepressions during the flow of hot helium inside the tubes after leaving the gas turbine is shown. Fig. 5. Bibliography 14 titles.

UDC 623.973 **Keywords**: low-frequency electromagnetic field, compensation system, electromagnetic induction, magnetic field induction meter, low-frequency electromagnetic field source

B.Yu. Semyonov. Monitoring magnetic moments of the low-frequency electromagnetic field of ship electrical equipment using a differential interference compensation technique//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 83

The article analyzes the methodology for monitoring magnetic moments of the low-frequency electromagnetic field of ship electrical equipment, proposes methodological and circuit solutions that allow eliminating the influence of external interference with a frequency of 50 Hz with minimal labor intensity. Fig. 2.

UDC 621.396.67 **Keywords**:NTIRadiosvyazJSC,transmitting and receiving shortwave and receiving-transmitting ultrashortwave antennas, antenna switch of shortwave and ultrashortwave ranges, automated communication complex (ACS)

A.Yu. Stepkin, V.A. Kaznacheev, Ya.A. Demidov. Development of antenna technology for surface ships//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 87

About the activities of NTI Radiosvyaz JSC since 1991 – development, manufacture and supply of antennas and antenna switches for various purposes for surface ships (NK) of the Navy. Fig. 6.

UDC 621.37 **Keywords**: model analysis, radio wave propagation, narrowband decameter communication channel, Watterson model, wideband decameter communication channel

A.S. Baturin, A.N. Kichenko, V.E. Gel. Analysis of radio wave propagation models in the decameter range used in the design of radio communication equipment//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 89

The article analyzes the models of radio wave propagation in the decameter range of waves, taking into account the different width of the spectrum of the transmitted signal, used in the development of radio equipment. The analysis of the considered models allows us to conclude that for modeling a narrowband decameter communication channel, it is most often sufficient and advisable to use the Watterson model, and for modeling a wideband decameter communication channel, the model developed by the MTUCI employees is of interest. T. 1. Fig. 6. Bibliography 9 titles.

UDC 656.078:656.62 **Keywords**:maritimetransportsystem, territoriality, controllability, risk, logistics activity, controlling dualism

S.M. Dotsenko,D.V. Zvezdaryov,A.A. Bengert,S.I. Bidenko, D.I. Yakushev, E.A. Rylov, I.A. Polkovnikov. Modeling of the maritime transport system in the context of multifactor risks//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 95

The general characteristics of the components of maritime transport systems (TS) are identified – their territoriality, controllability and risk. A formalized description of the subject area of transport logistics activity is provided. The system-forming role of the category «situation» in the procedures for supporting TS management is established. The article demonstrates the universality of the category «risk» as a descriptive and evaluative metric of objects and processes of maritime transport logistics. Basic risk concepts are analyzed. T. 1. Fig. 10. Bibliography 31 titles.

UDC 621.391 **Keywords**: VSAT terminals, DVB-S2X standard technologies, demodulated traffic anomalies, energy assessment model

I.M. Zhdanova, S.S. Dvornikov, S.V. Dvornikov. Model of occurrence of anomalies in demodulated traffic of VSAT subscriber terminals//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 101

The article presents the results of the study of situations related to the construction of networks based on VSAT terminals using DVB-S2X standard technologies, in which hidden unintentional destructive impact of third-party radio-electronic means may occur if they violate EMC requirements. A model for assessing energy relationships under which such a situation is possible has been developed. T. 2. Fig. 2. Bibliography 29 titles.

UDC 625.5 **Keywords**: simulation modeling, simulator, remotely operated unmanned underwater vehicle, ROV

K.S. Dement'ev, V.N. Kondrat'ev, K.A. Smirnov. Simulation modeling in the training system of pilots of remotely operated unmanned underwater vehicles//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 105

The article analyzes the requirements for simulators of remotely operated unmanned underwater vehicles (ROV). The structure of the ROV simulators supplied by MNS JSC is described. The volume of simulated scenarios of underwater technical work is given. Fig. 8.

UDC 621.396 **Keywords**: radio monitoring, radio environment control, automation, adaptive signal processing

A.N. Kichenko. Signal types studied by radio monitoring systems//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 107

Currently, there are no developed methods for detecting, filtering and classifying random signals necessary for creating automatic radio monitoring systems. The article shows that the study of new digital processing methods allows them to be used not only for monitoring radio equipment, but also to improve the quality of communication both under normal conditions and in a complex radio-electronic environment. Fig. 1. Bibliography 6 titles.

UDC 621.396 **Keywords**: amplitude quantizer, digital devices for processing radar signals, interference caused by rough seas, shipborne radar computing systems, located targets

E.K. Samarov. Experimental studies of an amplitude quantizer with a stabilized threshold under the influence of interference caused by rough seas//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 109

An experimental study of two quantization methods was carried out under real radar conditions. It was shown that the use of an amplitude quantizer with random thresholds is most appropriate in devices for automatic detection of signals from shipborne radar stations under the influence of interference from rough seas. The experimental studies showed that an amplitude quantizer with two random thresholds ensures good signal detection from targets even in rough seas. Fig. 3. Bibliography 8 titles.

UDC 629.7.017.1 **Keywords**:systemsapproach,Navyguided missiles, required damage, cost-effectiveness criterion, information support for decision-making, statistical modeling on a PC

O.G. Mal'tsev. System approach of designation of controllable projectiles of Navy fleet in volley from ships of a tactical group//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 113

The article examines a systems approach to forming a salvo of guided missiles (GM) from ships of tactical groups of the Navy. The essence of the approach consists in assigning a minimum number of GM for a salvo, sufficient to inflict the necessary damage on the enemy (in accordance with the cost-effectiveness criterion). The article considers issues of information support for a flagship official when making a decision to form a salvo of GM. The effectiveness of the approach is illustrated by the results of statistical modeling on a PC. Fig. 2. Bibliography 8 titles.

UDC 621.391. 2 **Keywords**:sinusoidaloscillation,energy characteristics, random process, correlation and spectral functions, two-dimensional density, Fourier transform

E.K. Samarov, Ya.Yu. Ionchenkova. Probability and energy characteristics of harmonic signals received by ship radio receivers, modulated by normal random processes//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 118

The probability and energy characteristics of harmonic signals arriving at the input of ship radio receivers, modulated by normal random processes, are considered and analyzed. A two-dimensional probability distribution density and a correlation function of a harmonic oscillation modulated in amplitude and phase by normal random processes with an arbitrary degree of correlation between themselves are obtained.Bibliography 8 titles.

UDC 621.391 **Keywords**: radio engineering system, structural connectivity, availability, probability of connection

S.V. Dvornikov, S.A. Yakushenkov, V.K. Snezhko. Mathematical model for assessing the structural connectivity of sea-based radio engineering systems//Morskoy Vestnik. 2024. No. 4 (92). P. 120

A mathematical model for assessing the structural connectivity of elements of radio engineering systems under the influence of external factors is proposed. A feature of the model is that it takes into account the probabilistic nature of the connections determined by the presence between the elements of the sea-based system, which will allow tracking the degradation of connections in the dynamics of the development of destructive impacts. Fig. 2. Bibliography 11 titles.