

Морской



№4(96)
декабрь
2025
ISSN 1812-3694

Вестник

Morskoy Vestnik

197198 РОССИЯ, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
УЛ. БЛОХИНА, Д. 19
+7 (812) 602-03-52
+7 (812) 233-94-07
INFO@NPFMERIDIAN.RU



МЕРИДИАН
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
КОНЦЕРН МОРИНФОРМСИСТЕМА-АГАТ



КОРПОРАЦИЯ
МОРСКОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

26 декабря 2025 г. отмечает 80-летний юбилей научный руководитель АО «Концерн «Гранит-Электрон», доктор технических наук, профессор, заслуженный конструктор РФ, член-корреспондент Российской академии ракетных и артиллерийских наук, ведущий ученый и специалист в области создания корабельных и бортовых радиоэлектронных систем и комплексов морского радиоэлектронного вооружения (РЭВ) Георгий Анатольевич Коржавин.

Родился Георгий Анатольевич в Ленинграде. После окончания школы и службы в армии в 1972 г. пришел в ЦНИИ «Гранит», который в дальнейшем был преобразован в АО «Концерн «Гранит-Электрон».

В 2022 г. Г. А. Коржавин отметил юбилей – 50 лет работы на предприятии. За эти годы он прошел большой творческий путь от инженера до генерального директора АО «Концерн «Гранит-Электрон», главного конструктора направления информационно-управляющих систем ракетного оружия и радиолокационных комплексов для ВМФ.

Г. А. Коржавин как главный конструктор внес значительный вклад в создание корабельных систем управления оружием, размещаемых на ПЛ и НК 3-го и 4-го поколений, для таких комплексов ракетного оружия, как «Гранит», «Оникс», «Уран».

В 90-е гг. – период тяжелой экономической обстановки, и руководство института при активном участии Г. А. Коржавина способствовало выходу основной продукции предприятия на зарубежный рынок в рамках военнотехнического сотрудничества. Для этой цели в «Граните» был создан филиал НПП «Гранит-спецтехника».

Г. А. Коржавин становится директором этого филиала и заместителем генерального директора предприятия.

Именно этот период напрямую связан с выходом АО «Концерн «Гранит-Электрон» на международный уровень.

В 1998 г. Г. А. Коржавин назначен первым заместителем генерального директора, в 2004 г. он становится генеральным директором ФГУП «ЦНИИ «Гранит», а после преобразования предприятия в АО Георгий Анатольевич избирают генеральным директором АО «Концерн «Гранит-Электрон», которым он руководил 16 лет, вплоть до августа 2020 г. За это время АО «Концерн «Гранит-Электрон» передал ВМФ множество уникальных комплексов, которыми оснащены корабли практически всех классов, в том числе ракетный крейсер «Пётр Великий», авианесущий крейсер «Адмирал Флота Советского Союза Кузнецов», БПК «Адмирал Чабаненко», современные фрегаты и корветы, комплексы берегового базирования «Форт»

К 80-ЛЕТИЮ Г. А. КОРЖАВИНА

АО «Концерн «Гранит-Электрон»,

контакт. тел. (812) 271 4585, office@granit-electron.ru



и «Бал». ПЛ типа «Ясень», «Борей», «Лада», «Варшавянка» оснащены автоматизированными радиолокационными станциями для обнаружения целей на больших дальностях, решения навигационных задач и обеспечения эффективного применения оружия.

Сегодня Г. А. Коржавин – научный руководитель Федерального научно-производственного центра АО «Концерн «Гранит-Электрон». В 2000 г. решением диссертационного совета Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН ему была присуждена ученая степень кандидата технических наук, в 2009 г. решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки – ученая степень доктора технических наук, в 2010 г. присвоено ученое звание профессора.

Результаты его научно-технической деятельности отражены почти в 300 научных трудах, свидетельствах на изобретения и патентах на полезные модели.

Под руководством Г. А. Коржавина в концерне действуют объединенный диссертационный совет по основным профильным дисциплинам института и Научно-методическая комиссия по подготовке кадров высшей научной квалификации.

В 2007 г. авторскому коллективу под его руководством была присуждена Первая премия за успехи в области производства продукции военного назначения «Золотая идея» ФСВТС России, в 2014 г. – Премия Правительства РФ в области науки и техники.

Георгий Анатольевич ведет активную учебно-педагогическую деятельность. В 2012 г. он по конкурсу возглавил кафедру ГУАП «Проблемно-ориентированные вычислительные комплексы». В настоящее время возглавляет кафедру «Прикладной информатики» в Санкт-Петер-

бургском государственном университете аэрокосмического приборостроения. В 2014 г. в концерне была создана базовая кафедра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого «Программно-аппаратные комплексы реального времени», которой он руководит до настоящего времени.

В 2008 г. Г. А. Коржавин удостоен Премии Правительства РФ в области образования, в 2011 г. – Премии Правительства Санкт-Петербурга за выдающиеся достижения в области высшего и среднего профобразования.

Г. А. Коржавин – член Президиума Научно-технического совета при Правительстве Санкт-Петербурга, возглавляемого Губернатором, Научно-координационного Совета по реализации федеральных и ведомственных проектов в сфере развития судостроения, член Центрального правления и председателем секции «Приборное и радиоэлектронное оснащение кораблей и судов» НТО судостроителей им. акад. А. Н. Крылова, председатель секции «Проблемы развития надводного кораблестроения, радиоэлектронных систем и вооружения ВМФ» 5-го научного отделения РАРАН.

Научно-педагогическая и производственная деятельность Георгия Анатольевича отмечена многими правительственными и ведомственными наградами: орденами «За морские заслуги», «Почета», «Дружбы», «За заслуги 1 степени» РАРАН, медалями «За трудовую доблесть», «За заслуги в создании вооружения и военной техники» РАРАН, медалью Ю. А. Гагарина за заслуги перед космонавтикой, медалью им. академика В. Н. Челомея и др., а также многими благодарностями и грамотами.

Ему присвоены почетные звания «Заслуженный конструктор Российской Федерации», «Почетный работник науки и техники РФ», «Почетный судостроитель».

В канун своего 80-летия Георгий Анатольевич Коржавин продолжает свою активную деятельность, оставаясь для коллег образцом преданности делу, неиссякаемой энергии и мудрости.

Сердечно поздравляем Георгия Анатольевича с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, творческого долголетия и дальнейших успехов в его многогранной деятельности на благо Отчизны!

Редакционный совет, редколлегия и редакция журнала «Морской вестник» присоединяются к этим поздравлениям и желают Георгию Анатольевичу долгого здоровья и творческих свершений. ■

Морской Вестник



№4 (96)

декабрь

2025

Morskoy Vestnik

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 СПбГМУ

Члены совета:

А.А. Асланян, генеральный директор
АО «НПФ «Меридиан»

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»

Ю.В. Душкин, генеральный директор
АО «СПО «Арктика»

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»

С.Б. Мироненков, генеральный директор
ООО «Пумори-северо-запад»

И.М. Мухутдинов, генеральный директор
ПАО «СФ «Алмаз»

О.А. Остапко, генеральный директор
АО «Северное ПКБ»

Е.А. Рылов, генеральный директор
АО «НПО Завод «Волна»

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»

О.В. Шаин, генеральный директор ООО «ДиЭлКом»

К.Ю. Шилов, генеральный директор

АО «Концерн «НПО «Аврора»

А.А. Шубин, директор
ЗАО «ЦНИИ СМ»

И.В. Щербаков, генеральный директор
ООО ПКБ «Петробалт»

СОДЕРЖАНИЕ

К 80-летию Г.А. Коржавина 1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

В. Ю. Светова, А. В. Кошелев, А. С. Моданов. Отечественный газозов
для СПГ: предпосылки, рынки, ограничения, характеристики 6

Д. В. Казунин, С. С. Соколов, С. С. Якунчиков. О технологиях морского
и речного транспорта при развитии автономного судовождения до 2050 года 11

В. Н. Илюхин. О развитии роботизированных спасательных средств
для водных объектов 21

П. А. Зубков, О. В. Захарова. Особенности проектирования дизайна
освещения интерьеров жилых и служебных помещений перспективных
кораблей ВМФ 27

А. Е. Васильев, Йе Мин Хмет, Д. Е. Кунгурцев, С. А. Токаренко, Хтут Шайн.
Моделирование геометрии поверхности объектов судостроения с применением
аппарата сетей элементарных нечетких вычислителей. 33

Е. М. Кириллова, А. П. Федотенков. Причины возникновения кавитации
морской воды, обусловленные работой гидроакустических систем поиска 38

Памяти профессора Б. П. ИONOBA 39

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. В. Архипов, В. А. Евсеев, Д. В. Курочкин. Мировой опыт индустриального
сотрудничества в сфере строительства боевых надводных кораблей
классов OPV, корвет и фрегат. Часть 2 41

Д. С. Ракитин, И. Н. Костусев, В. М. Мокрицкий, Д. А. Шушков. Развитие
аддитивного производства на судостроительном предприятии 47

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

А. Г. Мальцев, Е. В. Ульянова. Метод теплофизического расчета системы
кожухотрубных охладителей при стационарных процессах теплоотдачи
и минимизации массогабаритных параметров 51

П. Г. Печковский, В. В. Барановский, Ю. В. Пыльнев, И. А. Кирюхин.
Концепция разработки системы информационной поддержки обоснования
выбора энергетических установок перспективных надводных кораблей. 55

Л. Г. Кузнецов, А. В. Бураков, Д. С. Михайлов, П. А. Белов, Ю. А. Чукичев,
М. Д. Смогарев. Опыт разработки специализированных мембранных
компрессорных установок для технических газов в судостроении. 64

М. Г. Войтович. Мобильный комплекс для тушения корабельных пожаров
и борьбы с обледенением на кораблях и судах Арктической зоны. 69

А. З. Багерман. Сравнительная оценка результатов модельных и натурных
испытаний сплава IN738LC при температурах 700–1000 °С. 71



ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

- С. Н. Ирютин, А. Е. Шаиурин, Д. П. Тетерин, В. Н. Мариян, В. Е. Бондырев, В. К. Дригола.** Новые технологии построения квантово-оптических систем автоматического сопровождения динамичных объектов морского базирования из состава корабельных измерительных комплексов 73
- Б. Ю. Семёнов.** Модификация исполнительных устройств корабельных систем компенсации низкочастотных электромагнитных полей с целью повышения их устойчивости при настройке и эксплуатации. 76
- М. А. Еремеев.** Высокоточные инерциальные системы на основе акселерометров для управления подводными автономными аппаратами 81
- Е. А. Рылов, В. Л. Филимонов, А. В. Долгов, К. В. Яшин.** Серийное производство радиоэлектронной аппаратуры как неотъемлемая часть создания изделий военной техники. 85
- А. В. Ишанин.** Основные технические решения при разработке приборов автоматизированных систем управления технологическими процессами судов и плавучих сооружений с ядерной энергетической установкой 89

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- А. С. Долгополов, В. А. Кружалов, С. А. Львовский, Ю. Ф. Подоплёкин.** Концепция формирования многофункциональных радиоэлектронных комплексов на базе унифицированных функциональных модулей 93
- В. А. Долгих, Д. В. Васильева, С. В. Дворников.** Частная модель радиоэлектронного конфликта на линиях морской радиосвязи 97
- С. И. Биденко, А. В. Дегтярёв, А. В. Сорокин, И. А. Полковников.** Нейросетевая методика обеспечения безопасной навигации в ближней морской зоне 101
- С. С. Быбин, Е. А. Сеницын, А. П. Борина, В. М. Тургалиев, М. Н. Ещенко.** Особенности обработки сигналов первичных когерентно-импульсных РЛС при использовании алгоритмов быстрого преобразования Фурье с адаптивным взвешиванием 103
- К. О. Симонова, Д. В. Васильева, С. В. Дворников.** Применение уточненной функции Ждановой в анализе битовых потоков 106
- Е. А. Поташко, Л. С. Хабаров.** Разработка ЭНИС для функционирования на отечественной операционной системе Astra Linux 109
- С. С. Пустынников, М. А. Ахрестин.** Мультикритериальная дельта-факторная система судовой пожарной сигнализации: апробация эффективности 112
- Б. В. Грек, А. В. Корчанов.** Опыт разработки систем информационной поддержки принятия решений по борьбе за живучесть надводных кораблей 115
- Е. К. Самаров, Я. Ю. Ионченкова.** Измерение спектральной плотности широкополосных радиопомех корабельной радиоприемной аппаратурой 118

ИСТОРИЯ СУДОСТРОЕНИЯ И ФЛОТА

- А. В. Архипов, О. Л. Гилярович, Д. Ю. Силантьев, С. И. Овсянников.** Памяти военного инженера-кораблестроителя А. Ф. Никольского 120
- О. А. Яковлев, В. Н. Торба.** К 235-летию Выборгского морского сражения 123

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

Д. В. Никущенко, д-р техн. наук

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. Фомищев, д-р техн. наук, проф.

В. И. Черненко, д-р техн. наук, проф.

С. Н. Шаров, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН

Редакция

Тел./факс: (812) 600 4586

E-mail: morvest@gmail.com

Редактор

Т. И. Ильичева

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 300 экз. Заказ № 4328

Дата выхода в свет – 10.12.2025

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

№ 4 (96)

December

2025

Morskoy Vestnik

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

V.A. Dolgikh, General Director JSC NTI Radiosvyaz

V.Yu. Dorofeev, General Director

JSC SPMDB Malachite

Yu.V. Dushkin, General Director JSC NPA ARKTIKA

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 C MDB

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

A.V. Kuznetsov, chairman of the board of directors
JSC Armatit

L.G. Kuznetsov, General Designer
JSC Compressor

S.B. Mironenkov, General Director
JSC Pumori-north-west

I.M. Mukhutdinov, General Director
JSC Almaz Shipbuilding Company

O.A. Ostapko, General Director
JSC Severnoye Design Bureau

E.A. Rylov, General Director JSC NPO Zavod Volna

I.V. Scherbakov, General Director JSC PDB Petrobalt

V.A. Seredokho, General Director JSC SNSZ

O.V. Shain, General Director LLC DiElCom

K.Yu. Shilov, General Director
JSC Concern SPA Aurora

A.A. Shubin, Director JSC CRIME

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

P.A. Zubkov, General Director MCS LLC

ABSTRACTS

On the 80th anniversary of G. A. Korzhavin 1

SHIP DESIGN AND CONSTRUCTION

V. Yu. Svetova, A. V. Koshelev, A. S. Modanov. Domestic LNG carrier:
prerequisites, markets, limitations, characteristics 6

D. V. Kazunin, S. S. Sokolov, S. S. Yakunchikov. On sea and river transport
technologies in the development of autonomous navigation up to 2050 11

V. N. Ilyukhin. On the Development of Robotic Rescue Craft for Water Bodies 21

P. A. Zubkov, O. V. Zakharova. Design features of interior lighting for living
and utility spaces on prospective navy ships 27

A. E. Vasil'ev, Ye Min Htet, D. E. Kungurtsev, S. A. Tokarenko, Htut Shain.
Shipbuilding objects surface modeling on the base of elementary
fuzzy solvers networks 33

E. M. Kirillova, A. P. Fedotenkov. Causes of seawater cavitation caused by
the operation of hydroacoustic search systems 38

In memory of Professor B. P. Ionov 39

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANISATION OF SHIPBUILDING

A. V. Arkhipov, V. A. Evteev, D. V. Kurochkin. Global experience of industrial
cooperation in the construction of surface combat ships of the OPV, corvette,
and frigate classes. Part 2 41

D. S. Rakitin, I. N. Kostusev, V. M. Mokritsky, D. A. Shushkov. Development
of additive manufacturing at a shipbuilding enterprise 47

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS

A. G. Mal'tsev, E. V. Ul'yanova. Method of thermophysical calculation
of a shell-and-tube cooler system for non-stationary heat transfer processes
and minimization of weight and size parameters 51

P. G. Pechkovsky, V. V. Baranovsky, Yu. V. Pyl'nev, I. A. Kiryukhin. Concept
of developing an information support system for justifying the selection
of propelling surface ship propulsion 55

**L. G. Kuznetsov, A. V. Burakov, D. S. Mikhailov, P. A. Belov, Yu. A. Chukichev,
M. D. Smogarev.** Experience in the development of specialized membrane
compressor units for industrial gases in shipbuilding 64

M. G. Voitovich. Mobile complex for extinguishing ship fires and combating ice
accumulation on arctic ships and vessels 69

A. Z. Bagerman. Comparative evaluation of the results of model and full-scale
tests of IN738LC alloy at temperatures of 700–1000 °C 71



DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENT MAKING AND RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

- S.N. Iryutin, A.E. Shashurin, D.P. Teterin, V.N. Marian, V.E. Bondyrev, V.K. Drigola.** *New technologies for constructing quantum-optical systems for automatic tracking of dynamic sea-based objects from shipborne measuring complexes* 73
- B.Yu. Semyonov.** *Modification of actuators of shipborne low-frequency electromagnetic field compensation systems to increase their stability during setup and operation* 76
- M.A. Ereemeev.** *High-precision inertial systems based on accelerometers for controlling autonomous underwater vehicles* 81
- E.A. Rylov, V.L. Filimonov, A.V. Dolgov, K.V. Yashin.** *Serial production of electronic equipment as an integral part of military equipment creation* 85
- A.V. Ishanin.** *Main technical solutions in the development of instruments for automated process control systems for ships and floating structures with nuclear power plants* 89

INFORMATION-MEASURING AND MANAGEMENT SYSTEMS

- A.S. Dolgopolo, V.A. Kruzhalov, S.A. Lvovskiy, Yu.F. Podoplyokin.** *A concept for developing multifunctional electronic warfare systems based on unified functional modules* 93
- YV.A. Dolgikh, D.V. Vasil'eva, S.V. Dvornikov.** *A private model of radio-electronic conflict on marine radio communication lines* 97
- S.I. Bidenko, A.V. Degtyaryov, A.V. Sorokin, I.A. Polkovnikov.** *Neural network methodology for ensuring safe navigation in the near-sea zone* 101
- S.S. Bybin, E.A. Sinitsyn, A.P. Borina, V.M. Turgaliev, M.N. Yeshchenko.** *Signal processing for primary coherent-pulse radars with adaptive weighting FFT algorithms* 103
- K.O. Simonova, D.V. Vasil'eva, S.V. Dvornikov.** *Application of the refined Zhdanova function in the analysis of bit streams* 106
- E.A. Potashko, L.S. Khabarov.** *Development of ENIS for operation on the domestic Astra Linux operating system* 109
- S.S. Pustynnikov, M.A. Akhrestin.** *Multicriteria delta-factor ship fire alarm system: performance testing* 112
- B.V. Grek, A.V. Korchanov.** *Experience in developing information support systems for decision-making in surface ships damage control* 115
- E.K. Samarov, Ya. Yu. Ionchenkova.** *Measuring of spectral density of broadband radio interference ship's radio reception equipment* 118

THE HISTORY OF SHIPBUILDING AND FLEET

- A.V. Arkhipov, O.L. Gilyarovich, D.Yu. Silant'ev, S.I. Ovsyannikov.** *In memory of the military engineer-shipbuilder A.F. Nikolsky* 120
- O.A. Yakovlev, V.N. Torba.** *On the 235th anniversary of the Vyborg naval battle ...* 123

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. Fomichov, 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

D.V. Nikushchenko, D. Sc.

of Rocket and Artillery of Sciences of Russia

V.N. Polovinkin, D. Sc., Prof.

A.V. Pustoshny, D. Sc., Prof., corresponding member of

of the Academy of Sciences of Russia

A.A. Rodionov, D. Sc., Prof.

K.V. Rozhdstvensky, D. Sc., Prof.

N.V. Savishchenko, D. Sc., Prof.

S.N. Sharov, D. Sc., Prof., corresponding member of the

Academy of Rocket and Artillery of Sciences of Russia

Editorial staff

Phone/Fax (812) 600 4586

E-mail: morvest@gmail.com

Editor

T.I. Ilyichova

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 Certificate

ПН № 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 elektronnyaya

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 300. Order № 4328

Publication date – 10.12.2025

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

Правительство Российской Федерации распоряжением от 9 июня 2020 г. № 1523-р утвердило Энергетическую стратегию Российской Федерации на период до 2035 года [1], которая направлена на расширение географии производства, рынка сбыта и потребления, включая использование сжиженного природного газа (далее – СПГ) в качестве моторного топлива и бункерного топлива для судов. Для достижения поставленных целей предлагается применять субсидирование и региональные программы.

В качестве решения одной из задач Стратегии распоряжением Правительства РФ от 16 марта 2021 г. № 640-р утверждена долгосрочная программа развития производства СПГ для целей автономной газификации и в качестве газомоторного топлива, технологии и др.

Программа развития отражает тенденции мирового энергопотребления, ресурсную базу перспективных проектов по производству СПГ и действующие меры поддержки этого производства, потенциал развития сегмента малотоннажного производства СПГ для целей автономной газификации и в качестве газомоторного топлива, технологии и др.

Критерии отнесения объектов производства, хранения и использования СПГ к малотоннажным объектам у-

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ГАЗОВОЗ ДЛЯ СПГ: ПРЕДПОСЫЛКИ, РЫНКИ, ОГРАНИЧЕНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ

В.Ю. Светова, *вед. конструктор*

по архитектуре группы перспективного планирования,

А.В. Кошелев, *гл. конструктор по перспективному проектированию,*
ООО ПКБ «Петробалт»,

А.С. Моданов, *начальник отдела сопровождения проектирования судов и инфраструктуры ООО «Газпром ТЕХ»,*
контакт. тел. (812) 644 5686

верждены приказом Минэнерго России от 15 октября 2021 г. № 1090 [3]. Согласно документу, к таким объектам относятся заводы с производительностью не более 20 т в час, объекты с общим объемом емкостей СПГ не более 1500 т и давлением в криогенных резервуарах не более 1,6 МПа (рис. 1).

Транспортная стратегия Российской Федерации [4] предусматривает развитие коммерческих перевозок, включая транспортировку газа за счет «энергетического перехода» на альтернативные виды топлива, в том числе СПГ. Рост объемов перевозок предполагается за счет развития использования Северного морского пути (далее – СМП) и восточных портов России.

План развития СМП до 2035 г. предусматривает реализацию проектов про-

изводства СПГ, строительство заводов, перегрузочных терминалов и создание флота для транспортировки СПГ [5].

Снижение количества транспортных средств, работающих на традиционных видах топлива, напрямую связано с международными обязательствами Российской Федерации по снижению выбросов углекислого газа в атмосферу. Для выполнения данных обязательств утвержден комплекс мероприятий по минимизации выбросов в атмосферный воздух, сбросов в водные объекты загрязняющих веществ при осуществлении хозяйственной и иной деятельности в Арктической зоне России [6].

В настоящее время ведется разработка арктического газовоза ледового класса Arc7 вместимостью около 170 000 м³. При этом ниша создания флота для сред-

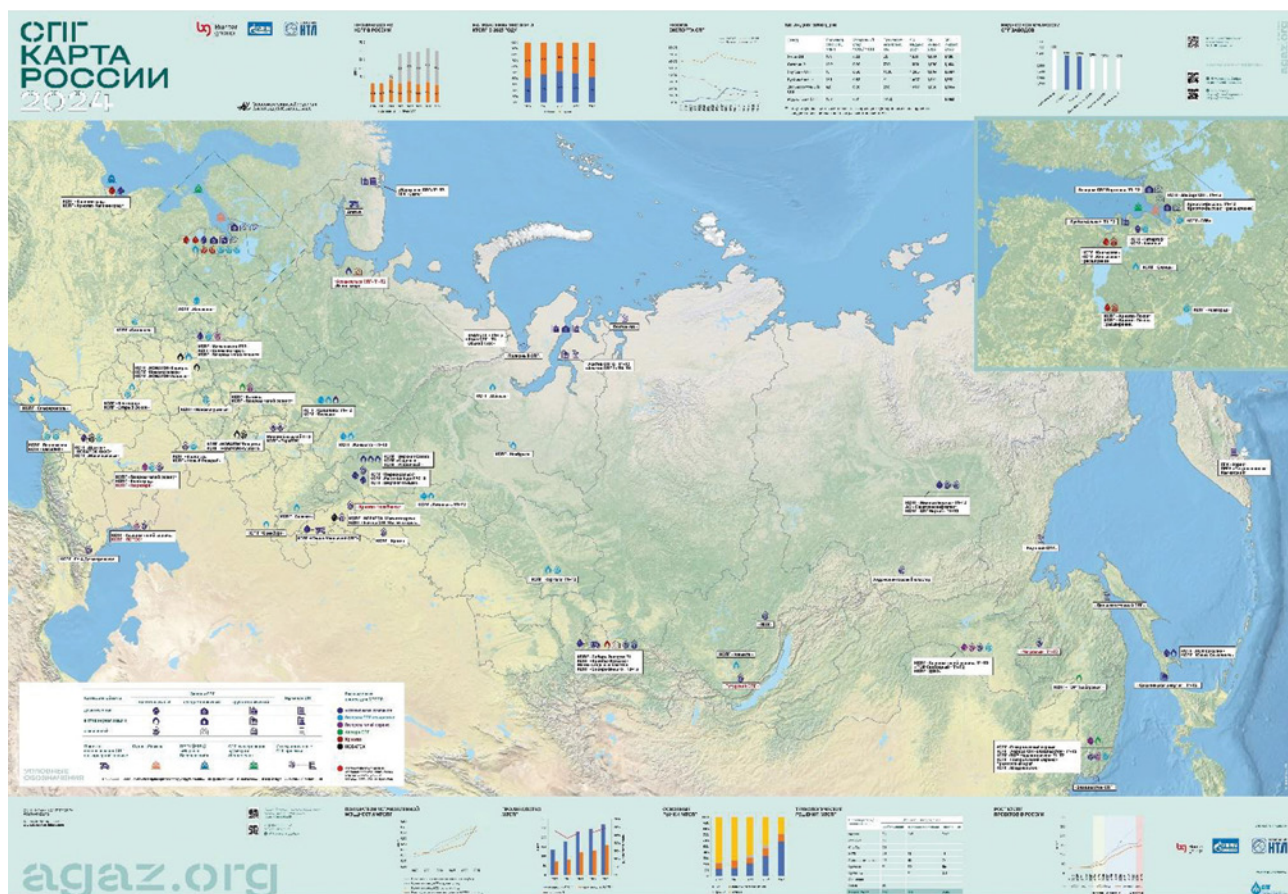


Рис. 1. Карта производства СПГ в России

Источник: URL: <https://www.agaz.org/>

нетоннажной и малотоннажной транспортировки СПГ, а также бункеровки судов остается не охваченной.

ЭКСПЛУАТИРУЕМЫЕ СУДА

По данным SEA-LNG [8], мировой флот эксплуатирует 736 судов, использующих СПГ в качестве топлива, еще 624 заcontractовано. При этом практически 50% судов – это танкеры-газовозы СПГ. По данным на конец 2024 г., для обеспечения СПГ-топливом используются в различных портах мира 60 бункеровщиков и еще 12 находятся на различных стадиях постройки. Российский флот имеет одно такое судно – «Дмитрий Менделеев» (IMO 9888182) [9]. Российский СПГ-флот включает 16 судов, из которых 2 паромы, 1 бункеровщик, остальные – танкеры/газовозы, что составляет всего 2% от мирового флота. В планах к 2027 г. увеличить численность флота до 23 судов.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА

Приведенная выше информация свидетельствует о больших возможностях развития рынка СПГ в России. При этом имеется ряд сдерживающих факторов, таких как недостаток систем хранения и транспортной обработки груза, а также оборудования энергетической установки (далее – ЭУ). Системы хранения и транспортной обработки груза для судов-газовозов рассматриваться в рамках данной статьи не будут.

История развития транспортировки газа на судах включает в себя также и эволюцию их энергетических установок, изменения в которых проводятся с целью повышения энергетических и экономических показателей. Уже с ранних этапов наблюдался отказ от дизельных ЭУ в сторону использования отпарного газа. Получили массовое распространение котлотурбинные установки. Впоследствии были разработаны технологии, позволяющие использовать СПГ в качестве топлива для дизельных двигателей внутреннего сгорания, которые применяются на современных судах.

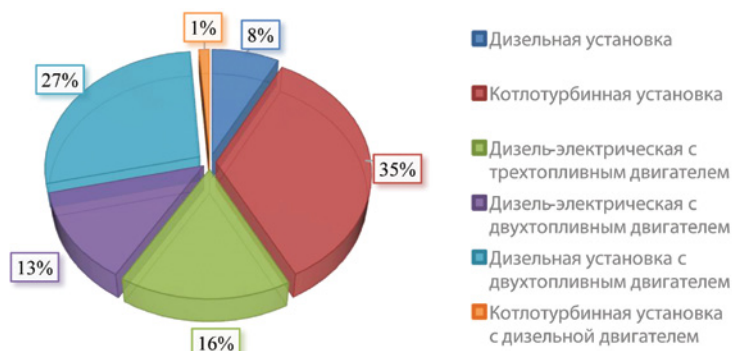


Рис. 2. Типы ЭУ на эксплуатируемых судах для транспортировки СПГ

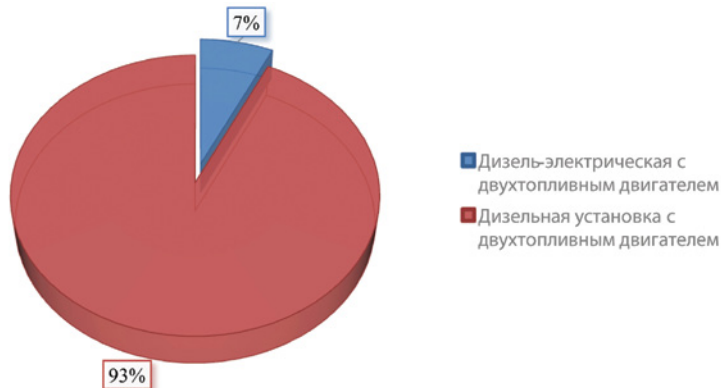


Рис. 3. Типы ЭУ при заказе новых судов

В наши дни на судах, использующих СПГ в качестве топлива, установлены различные энергетические установки, состоящие из малооборотных двухтопливных двигателей, среднеоборотных двух- или трехтопливных двигателей, паровой турбины. На рис. 2 представлено распределение типов ЭУ среди танкеров-газовозов. Диаграмма построена на основании данных, полученных из открытых источников.

С учетом ограничений на использование тяжелого топлива при заказе новых судов на СПГ наблюдается тренд использования двухтопливных ЭУ, преимущественно дизельных.

Распределение типов ЭУ для новых судов представлено на рис. 3.

Таким образом, преобладающим типом ЭУ при создании торгового флота является малооборотный двухтопливный двигатель, альтернативой

которому выступает дизель-электрическая ЭУ с использованием среднеоборотного двухтопливного двигателя. На выбор типа ЭУ влияют стоимость, надежность и ремонтпригодность, расход топлива, условия эксплуатации и модель использования судна, возможность его поставки.

ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ПРОЕКТА МАЛОТОННАЖНОГО ГАЗОВОЗА

Основными факторами, влияющими на формирование облика судна, являются район его эксплуатации и требования к перевозимому грузу. Эксплуатационные ограничения акватории оказывают существенное влияние на размерения судна и его архитектурный тип. Необходимый объем груза, перевозимый судном и обеспечивающий его рентабельность, определяет систему хранения груза.

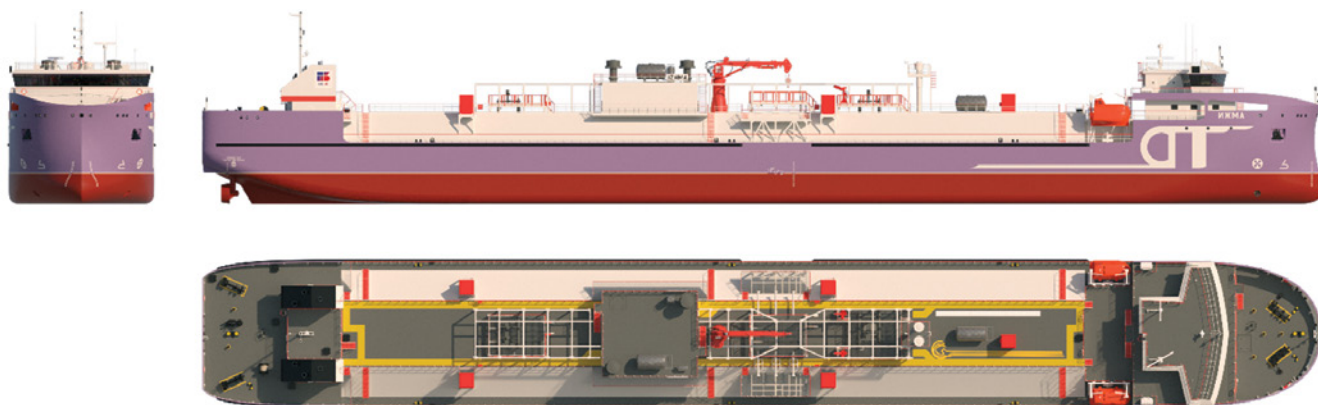


Рис. 4. Визуализация компоновки газовоза

При разработке проекта были проанализированы и учтены инфраструктурные, технологические и эксплуатационные ограничения, определенные предполагаемой моделью эксплуатации нового судна. Результатом работы стал проект газовоза, визуализация которого представлена на рис. 4.

Целью было создание судна для транспортировки СПГ по внутренним водным путям (далее – ВВП) и в прибрежной зоне. Следовательно, габариты судна ограничиваются пропускной способностью основных рек, озер и шлюзов.

Дополнительным фактором, оказывающим влияние на размерения судна, стала высокая загрузка судостроительных заводов России, имеющих выход к морю: в качестве потенциальных заводов-строителей были также рассмотрены верфи, расположенные на реках, озерах и водохранилищах и имеющие существенные ограничения по габаритным размерам судов.

Следующим определяющим параметром при проектировании газовоза является применяемая система хранения груза. В качестве системы хранения была выбрана отечественная мембрана типа GTI-1, внутренние размеры грузовых пространств подбирались, исходя

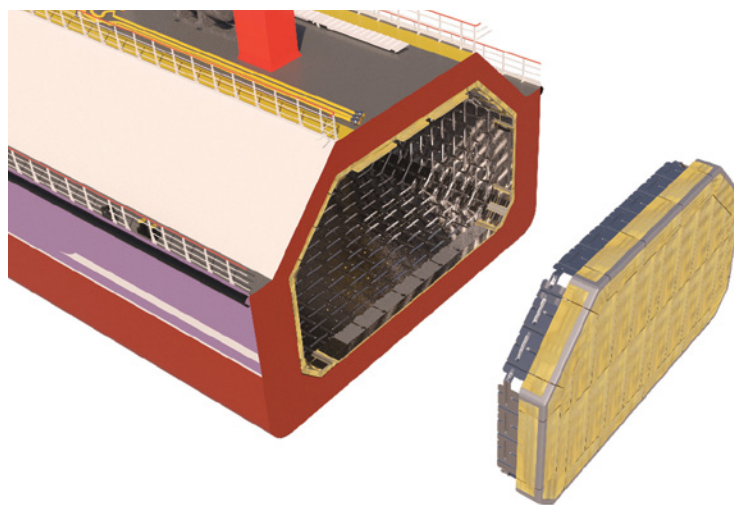


Рис. 5. Система хранения груза

из применения и использования в конструкции мембраны с минимальным количеством номенклатурных типов узлов и размеров деталей. Получившийся результат размещения цистерны представлен на рис. 5.

Система хранения СПГ типа GTI-1 производства компании ООО «ГТИ» позволяет вместить максимальное количество перевозимого груза при наименьших габаритах судна и имеет наименьшее значение массы.

РАЗРАБОТКА ПКБ «ПЕТРОБАЛТ»

В предыдущем разделе были упомянуты основные факторы, определяющие облик судна, его габаритные размеры и архитектуру. Далее приводится информация о результатах исследований.

ООО «ПКБ «Петробалт» разработан проект танкера-газовоза класса «река-море» для транспортировки СПГ грузовой вместимостью более 6000 м³. Характеристики судна приведены ниже, общий вид представлен на рис. 6 и рис. 7.



Рис. 6. Визуализация общего вида газовоза (вид с носа)

Основные характеристики танкера-газовоза СПГ ООО «ПКБ «Петробалт»

Характеристика	Значение
Объем трюмов, м³	6370
Длина, м	130,27
Ширина, м	16,98
Осадка, м	3,6
Энергетическая установка	Дизель-электрическая
Двигатели	2 × ВРК



Рис. 7. Визуализация общего вида газовоза (вид с кормы)

Носовое расположение рулевой рубки и жилой надстройки обеспечивает снижение габаритной высоты при сохранении видимости с ходового мостика.

Применение дизель-электрической ЭУ позволяет эксплуатировать главные двигатели в оптимальном режиме как при переходе с грузом, так и в балластном положении. Кроме того, повышается резервирование и вариативность использования двигателей с целью снижения наработки главных механизмов. Мощность главных двигателей позволяет оптимизировать количество одновременно работающих агрегатов, а использование двух ВРК и подруливающего устройства – выполнять маневрирование и швартовные операции с минимальными временем и количеством манипуляцией органов управления.

При проработке проекта выполнялся подбор и анализ возможности применения оборудования в соответствии с требованиями Постановления Правительства № 719 от 17.07.2015 г. [11].

ВЫВОДЫ

Помимо строительства отечественных крупнотоннажных танкеров-газовозов, при разработке которых будут создаваться технологии и необходимое оборудование, накапливаемый опыт следует применять при постройке собственного бункерного флота и для развития среднетоннажной и малотоннажной транспортировки СПГ.

Танкер-газовоз для транспортировки СПГ с использованием мембранной системы хранения позволит апробировать, испытать и устранить возможные недочеты конструкторских решений при проектировании отечественного флота

СПГ, затрачивая меньше материальных ресурсов.

Целесообразно проработать освоение технологий создания судов отечественными судостроительными предприятиями для транспортировки СПГ на малотоннажных судах, полученный опыт масштабировать на создание крупных судов неограниченного и ледового плавания.

Типоразмер предложенного танкера-газовоза позволяет эксплуатировать его на основных судоходных участках ВВП России, в прибрежной зоне и совершать экспортную транспортировку на коротком плече. Кроме того, конструктивно судно может быть дооснащено для эксплуатации в качестве бункеровщика или плавучего хранилища СПГ.

Предложенные размерения позволяют вести строительство на тех же верфях, где ведется постройка транспортного флота класса «река-море». При этом выбор судостроительного завода может быть выполнен с учетом оптимальных логистических маршрутов по доставке оборудования и материалов, тем самым снижая стоимость головного судна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» от 9.06.2020 г. № 1523-р.
2. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении долгосрочной программы развития производства сжиженного природного газа в Российской Федерации, включающую план мероприятий по реализации долгосрочной программы развития производства сжиженного природного газа в Российской Федерации» от 16.03.2021 г. № 640-р.
3. Приказ Минэнерго России «Об утверждении критериев отнесения объектов

производства, хранения и использования сжиженного природного газа к малотоннажным объектам» от 15.10.2021 г. № 1090.

4. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» от 27.11.2021 г. № 3363-р.
5. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении прилагаемого плана развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 г.» от 01.08.2022 г. № 2115-р.
6. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении комплекса мероприятий по минимизации выбросов в атмосферный воздух, сбросов в водные объекты загрязняющих веществ при осуществлении хозяйственной и иной деятельности в Арктической зоне Российской Федерации» от 29.10.2022 г. № 3219-р.
7. Минпромторг рассчитывает получить полностью отечественный танкер-газовоз к 2030 год. – ИАП «Судостроение. инфо» – URL: <https://sudostroenie.info/novosti/44144.html> (дата обращения: 12.11.2025).
8. ИАА «SEA-LNG» – URL: <https://sea-lng.org/bunker-navigator/> (дата обращения: 12.11.2025).
9. ФАУ «Российский морской регистр судоходства»: официальный сайт URL: https://lk.rs-class.org/regbook/vessel?fleet_id=1003600 (дата обращения: 12.11.2025).
10. Судовладельцы отправляют свои СПГ-танкеры в отстой или на слом // ИАА «МедиаПалуба» – URL: <https://paluba.media/news/194485> (дата обращения: 12.11.2025).
11. Постановление Правительства Российской Федерации «О подтверждении производства промышленной продукции на территории Российской Федерации» от 17.07.2015 г. № 719 (с изменениями и дополнениями). ■

Мировая тенденция развития автономного судовождения стремительно набирает обороты, и к 2050 г. эта отрасль обещает внести революционные изменения в морскую индустрию. На сегодняшний день выделяют пять уровней автономности судов – от полностью управляемых экипажем до полностью автономных. Прогнозируется массовый переход к четырем-пяти уровням автономности, когда суда будут способны принимать решения без вмешательства человека, что снизит затраты на экипаж (за счет снижения расходов на заработные платы, питание, проживание), исключит ошибки из-за человеческого фактора и позволит решить ряд экологических проблем.

В случае быстрого появления глобальных норм и принятия международных требований к организации автономного судовождения под эгидой ИМО (Международной морской организации), согласно данным ChatGPT, к 2050 г. автономное судоходство станет неотъемлемой частью мировой логистики, занимая до 25–30% всего морского флота (рис. 1). Это создаст основу для более устойчивой и технологически развитой морской индустрии.

При этом наибольший прогресс ожидается в таких странах, как Китай, Норвегия, Япония и Южная Корея, так как именно эти государства активно внедряют новые прототипы автономных судов.

Примечание: Рис. 1 и выделенный выше курсивом фрагмент созданы

О ТЕХНОЛОГИЯХ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА ПРИ РАЗВИТИИ АВТОНОМНОГО СУДОВОЖДЕНИЯ ДО 2050 г.

Д.В. Казунин, д-р техн. наук, доцент, директор Департамента «Платформа моделирования безэкипажного судовождения» ООО «Стеор-НСБ»,
С.С. Соколов, д-р техн. наук, проф., проректор,
С.С. Якуничков, канд. техн. наук, доцент, начальник НОЦ, РУТ (МИИТ),
контакт. тел. +7 911 114 4834, Dmitry.Kazunin@steor.tech (*)

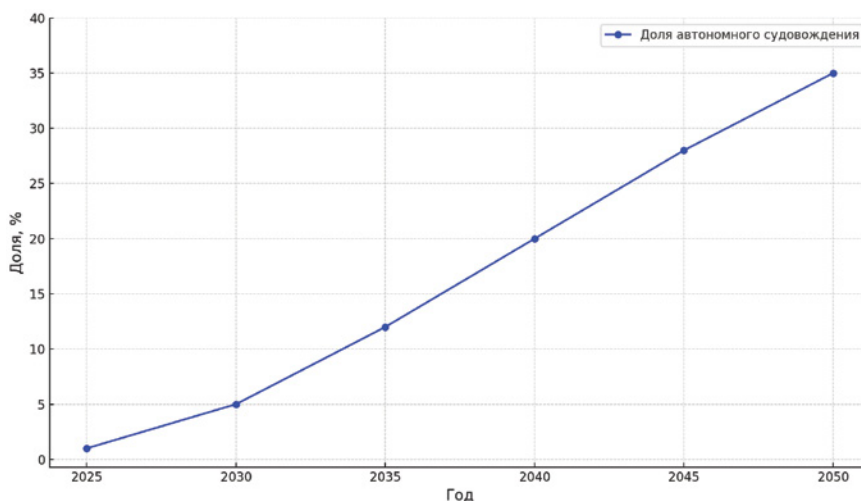


Рис. 1. Рост доли автономного судоходства в морских перевозках в 2025–2050 гг.

ChatGPT и отредактированы авторами (логические переходы и грамматические конструкции предложений) с целью целостного изложения основных задач запроса и для демонстрации возможности применения современных технологий класса ChatGPT в научной деятельности.

В 2025 г. Российская Федерация стоит на пороге перехода от технологической революции четвертого типа к революции пятого типа. Это проявляется в шести основных пунктах происходящих во всем мире событий, за-



Рис. 2. Перемещение систем управления на берег, создание сетцентрической модели управления с навыками адаптивного развития, построение «сильного» искусственного интеллекта

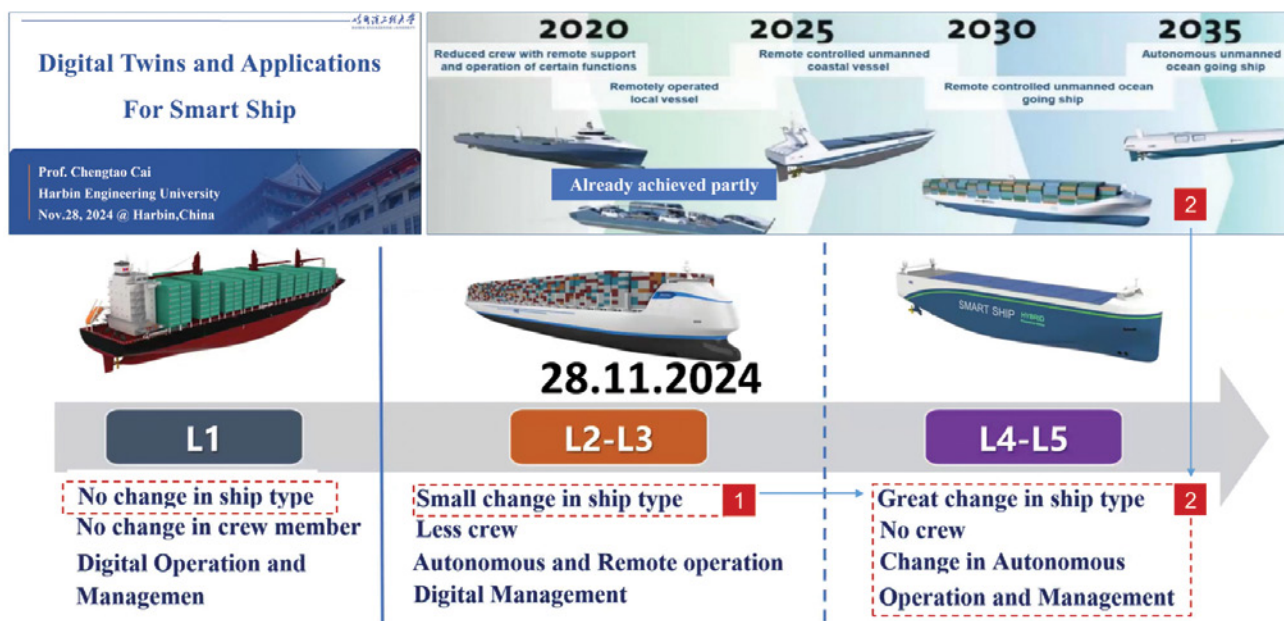


Рис. 3. Этапы модернизации автономного флота, предложенные prof. Changtao на международной конференции в РУТ (МИИТ) 28.11.2024 г. [1]

L1 – незначительные изменения, L2,3 – малые изменения, L4,5 – существенные изменения в судовых конструкциях, в количестве членов экипажей судов

трагивающих нашу страну, которые в конечном итоге приводят к трансформации отрасли грузоперевозок (рис. 2):

1. Во всех странах мира достаточно единообразно от региона к региону происходят качественные технологические изменения, которые в скором времени приведут к количественному росту.

2. Во всем мире идет создание условий для массового тиражирования ранее разработанных технологий и подготовка к этому: стремительно появились промышленные и экспериментальные технологии, которые начинают активно внедряться и распространяться.

3. В ведущих странах происходит стремительное развитие «сильного» искусственного интеллекта (ИИ), что создает условия для внедрения качественных изменений, включая распространение ИИ в повседневной жизни.

4. Создается сетевая модель управления, позволяющая перейти от управления одним объектом к управлению группой и более сложными иерархиями, например, «обществом» технических объектов.

5. В водном транспорте происходит перемещение интеллектуального управления с борта судна на берег, в центры принятия решений (таких как, например, ЦДУ), что требует участия специалистов нового класса.

6. Происходит трансформация обучения, направленного на отработку навыков адаптации в условиях технологических революций и формирование нового класса специалистов, способных быстро адаптироваться к новым условиям работы. Ровно такую задачу решила королевская династия

в Малайзии в условиях пика развития индустрии пальмового масла и вложила сверхприбыль в развитие специалистов страны, которые «будут создавать в их стране через 50 лет тогда, когда станет более понятно, какие именно тенденции будут доминировать в экономике, и когда наступит новый виток технического прогресса».

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ФЛОТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ДО 2050 г.

Российская Федерация находится в условиях беспрецедентного санкционного давления, которое затрагивает также научную среду. Но, несмотря на это, научное взаимодействие продолжается в ходе международных конференций, одна из которых по перспективам автономного судоходства прошла в Российском университете транспорта (МИИТ). На данной конференции представитель Харбинского

технического университета (Китай) изложил тенденции происходящих изменений на флоте при внедрении автономного судоходства (рис. 3 [1]).

На первом этапе (рис. 3) произойдут незначительные преобразования в области судовых конструкций (затрагивающие их архитектурно-конструктивные изменения). Далее (см. рис. 3, фрагменты 1, 2) глубокая трансформация затронет все судно. До 2035 г. тенденции понятны и подробно изложены в литературе. Поэтому остановимся только на тенденциях развития, затрагивающих специфику флота РФ в перспективе с 2035 по 2050 г. (см. рис. 4).

В Российской Федерации также произойдет трехстадийная трансформация морского и речного флота (рис. 4), которая будет происходить в русле основных консервативных мировых тенденций развития судостроительной отрасли. Поэтому в условиях интенсивного развития инновацион-

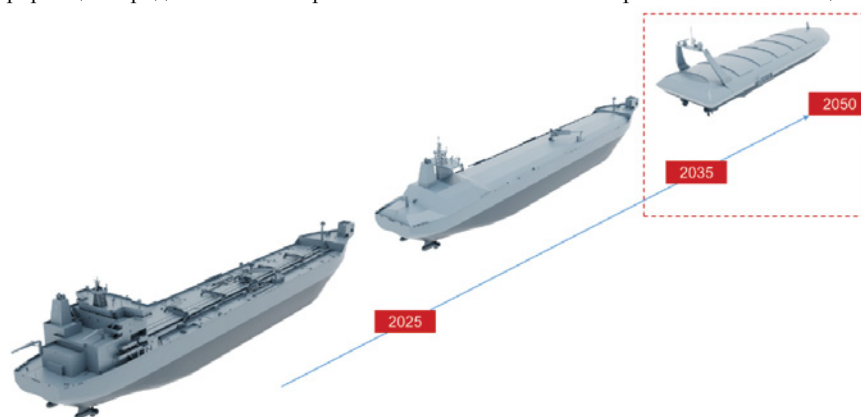


Рис. 4. Трехстадийная трансформация флота при внедрении автономного судоходства с 2025 по 2050 г., которая будет связана с отказом от человеко-ориентированных технологий



Рис. 5. Основные варианты автономных судов в период с 2035 по 2050 г.

ных технологий (которые будут касаться водного транспорта и менять его технические основы и условия работы) потребуются достаточно разумное нормативное регулирование со стороны Администрации флага и классификационных обществ РФ. От работы этих институтов будет в значительной степени зависеть успех развития автономного судоходства в стране.

Согласно рис. 4 в период до 2035 г. будут происходить изменения корпусных конструкций за счет уменьшения количества жилых помещений и систем жизнеобеспечения человека на борту судна. Но с 2035 г. по 50-е гг. (выделено на рис. 4) произойдет переход к судам без экипажа на борту. При этом можно выделить два основных тренда:

- первый – за счет увеличения размеров, скорости движения судов для океанских переходов, с минимальным набором бортовых средств автоматизации грузовых процессов и средств автоматизации на борту. Такие суда будут ходить по фиксированным трансокеанским линиям, и такая тенденция судостроения скорее всего не затронет РФ;
- второй – за счет оптимизации судов средних размеров с высокой насыщенностью бортовыми средствами автоматизации (включая грузовые бортовые средства) для реализации каботажного плавания с трамповой перевозкой грузов (рис. 5). Для РФ более очевиден этот путь развития, при котором произойдет оптимизация размера судов и будут созданы условия для группового движения с целью обеспечения роста грузопотока. При этом суда будут иметь большую ширину, малую осадку и ряд других особенностей.

Если рассмотреть более детально временной интервал с 2035 по 2050 г. (см. рис. 5), то вероятно произойдет трансформация автономных судов по трем основным направлениям:

- *первое направление*, как самое простое, затронет только танкерный и балкерный флот: трансформация грузовых помещений в крупные самостоятельные технологические модули, но аналогичные современным конструкциям (см. рис. 5, 3). Поэтому грузовые операции будут осуществляться на специально оборудованных терминалах со специальными автоматическими швартовными устройствами, работающими без участия человека;
- *второе направление* (см. рис. 5, 2) приведет к появлению судов, разделяющихся на самостоятельно перемещающиеся части. Произойдет возврат к идее лихтерных перевозок, предполагающих взаимодействие с необорудованными или частично оборудованными причалами с помощью самодвижущихся фрагментов корпуса автономного судна. Грузовые операции будут производиться роботизированными устройствами без участия человека;
- *третье основное направление* – трансформация современного флота (см. рис. 5, 1) затронет морские или речные мобильные дронопорты, что позволит выполнять грузовые операции в любой точке береговой линии на «необорудованные» площадки (с точки зрения морской инфраструктуры, но специально оборудованные для летных устройств). Для таких судов появляется возможность проведения грузовых операций в любой точке

маршрута, в том числе во время их движения, что особенно актуально при движении по внутренним водным путям (ВВП).

Согласно текущим тенденциям доминирующими будут контейнерные и пакетные перевозки, для которых появятся соответствующие типы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые будут с помощью «роя» выстраивать «воздушный мост» между мобильным дронопортом и грузовой площадкой на берегу (рис. 6). Такие БПЛА могут быть квадрокоптерного или двухвинтового вертолетного типа (см. рис. 6, 1, 2). Именно такие средства доставки считаются наиболее перспективными при организации «воздушного крыла» для мобильных дронопортов водного базирования. Также в зависимости от решаемых задач мобильные дронопорты водного базирования могут быть оборудованы грузовыми БПЛА самолетного типа (рис. 6, 3) и/или надводными беспилотными устройствами (рис. 6, 4).

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФЛОТА ДО 2050 Г.

Представленный в данной статье анализ инновационных технологий базируется на экспертном мнении шести специалистов, на данных работы [2] и авторской обработке 550 открытых источников информации, включая материалы, предоставленные авторами публикаций и/или организациями, занимающимися автономным судоходством в РФ:

1. ФГБУ ИПУ РАН (М.П. Фархадов), Харбинский технический университет (проф. Chengtao), ФГУП «Крыловский государственный научный центр», АО

Для необорудованных
береговых терминалов

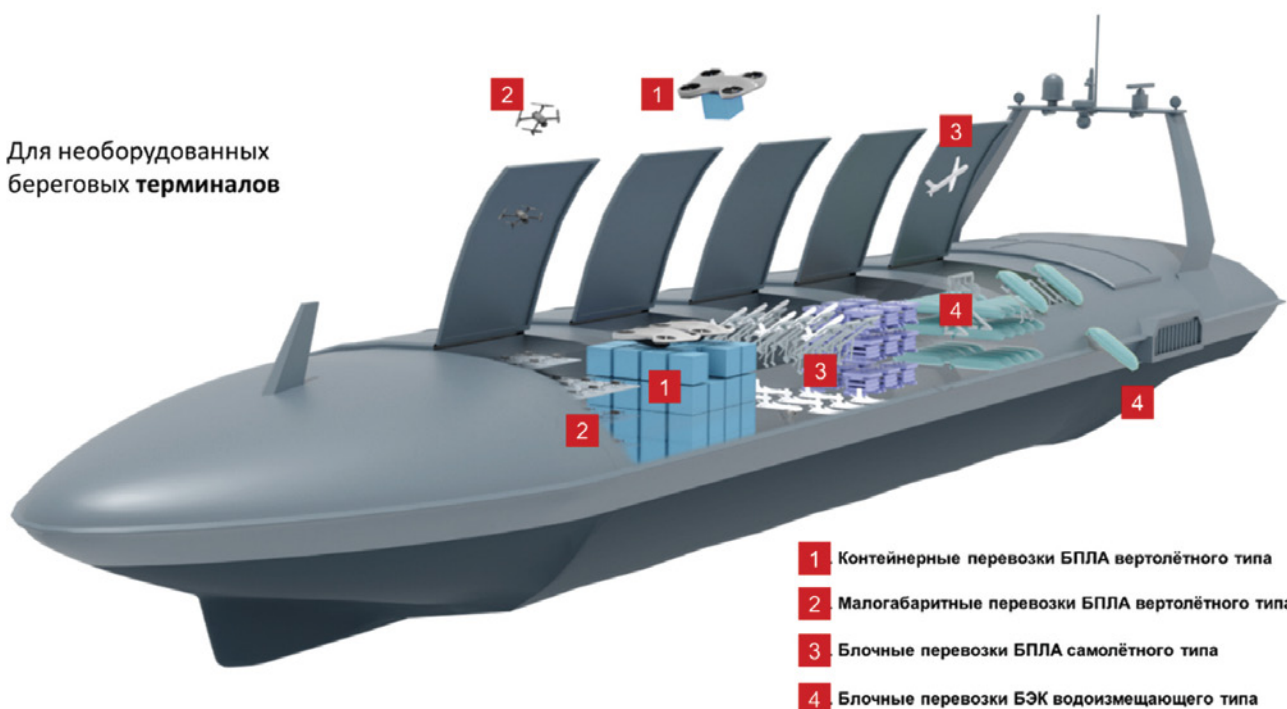


Рис. 6. Примерный вид мобильного дронопорта с грузовыми дронами различных типов

«НПО «Прибор» (П.Б. Рожков), ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова» (А.Л. Боран-Кешишян), ВУНЦ ВМФ (В.Г. Казаков), ФГБУ «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», МФТИ (А.М. Кашин), материалы конференций НТИ (М.С. Баркасов), а также материалы ФГУП «Росморпорт», ФАУ «Российский морской регистр судоходства», АО «ОСК», ООО «Мета-Ком» (Н. Новгород), капитанов В.П. Дмитренко, В.И. Замятина.

2. Компании, работающие в области маломерного флота: ООО «НТК «Морские роботизированные системы» (MarineRS), ПАО «Судостроительный завод «Вымпел», ГК «Мари-нэк», ООО «Кингисеппский машиностроительный завод», ЗАО «НПК «Промэлектроника».

3. Компании, работающие в области москитного флота: ООО «ЕФТ групп», АО «Прин», НПП «Форт XXI».

4. Компании приборостроительного кластера: АО «Ситроникс» (спутниковый АИС), АО «Ситроникс КТ», АО «Концерн «Моринформсистема-Агат», АО «ЦНИИ «Курс», АО «Навис», ООО «Валком», АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», АО «ИЦИ-УС», ООО «НПК «Оптолинк», ООО «НПЦ «Судовые электротехнические системы», ООО «НавМарин», головной филиал «НПО «Винт» АО «ЦС «Звездочка».

В результате обобщения вышеперечисленных материалов экспертами выделено пять основных инновационных технологий, которые будут интенсивно развиваться в автономном

судовождении до 2050 г. (рис. 7). На рисунке показана доля совокупного вклада технологий в развитие инноваций автономного флота и приведена оценка значимости потенциала вклада в инновации их четырех основных компонентов (с экспертной оценкой значимости от «высокой» до «негативной»). Среди пяти наиболее важных инновационных технологий выделены: 1 – технологии создания корпусных конструкций с вкладом ~0,08; 2 – систем связи ~0,12; 3 – энергетические установки ~0,22; 4 – системы управления и автоматизации ~0,28; 5 – программное обеспечение (ПО), включая искусственный интеллект, с вкладом ~0,30.

Для каждого вклада в инновации (рис. 7, 1–5) оценен и их потенциал

- 1 Корпус
- 2 Связь
- 3 Судовая Энергетическая Установка (СЭУ)
- 4 Автоматика
- 5 ПО (включая ИИ)

Потенциал вклада в инновации:

- высокий
- средний
- низкий
- нулевой или негативный

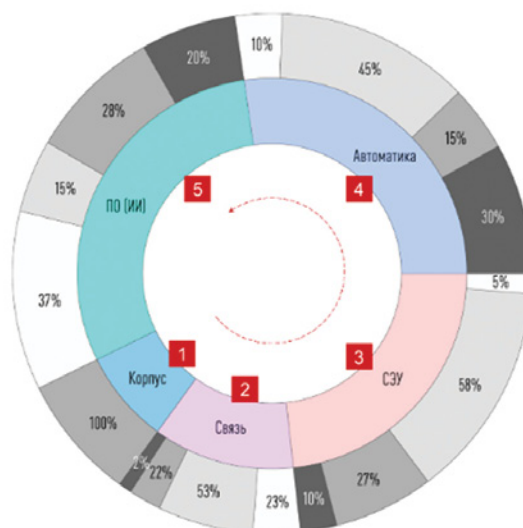


Рис. 7. Пять основных инновационных технологий развития флота до 2050 г. и потенциал вклада четырех компонент с оценкой их значимости

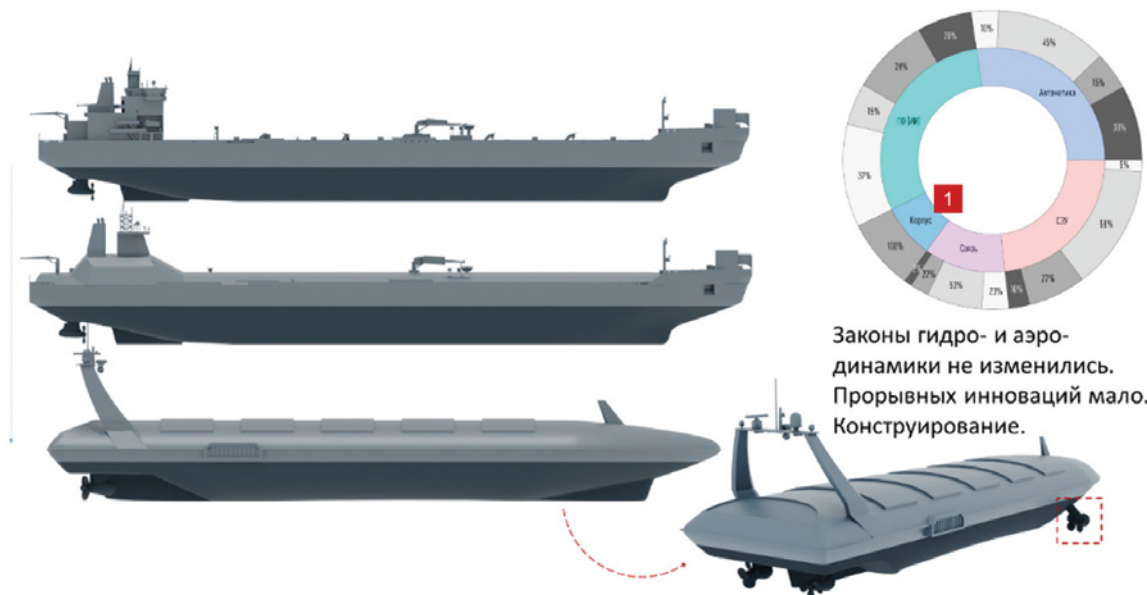


Рис. 8. Инновации в области корпусных конструкций

в процентах (с цветовой индикацией степени значимости влияния): от значимого («высокого»), обозначенного темным цветом, до «негативного» или нулевого, обозначенного белым цветом. Остановимся отдельно на каждой из пяти выделенных технологий.

Тенденции развития корпусных конструкций. Изменения корпусных конструкций будут обусловлены новыми формами выгрузки, швартовки и безопасности доступа к грузовым помещениям (см. рис. 5), а также трансформацией судовых конструкций за счет изменения «условий жизни экипажа».

В этой области все достаточно хорошо проработано и изучено (законы гидромеханики, аэродинамики неизменны), поэтому прорывных инноваций не предвидится. В основном будет выполняться различная конструкторская работа по адаптации ранее полученных решений к новым условиям эксплуатации судов и замене буксиров

различными корпусными устройствами, которые будут увеличивать мобильность судна для осуществления маневрирования, включая швартовку и т. п. (рис. 8).

Тенденции развития систем связи и идентификации. В области радиосвязи идет борьба за создание бесшовных технологий передачи данных. Основная тенденция сводится к тому, чтобы получить устойчиво работающую и общедоступную технологию автоматического перехода, осуществляемого системой связи между различными средствами обмена данными, доступными в данный момент времени и оптимизированными по трафику.

Ровно такая же проблема существовала при внедрении электрических систем, когда в рамках одного жилого квартала могло быть питание разного вида тока и вольтажа, при этом «специальные люди обеспечивали таинство подключения».

Нужно превратить связь в простой, универсальный, общедоступный сервис, когда после подключения к «розетке» не нужно заботиться об особенностях реализации связи. Например, при движении судна вдоль берега доступны разные сотовые операторы связи, из которых можно выбирать оптимальные каналы связи, переходя от одного сотового оператора к другому. При удалении от берега варианты выбора сокращаются до перебора коротковолновых и спутникового вариантов связи, которые система автоматически выбирает сама и распределяет трафик систем управления автономного судна между ними. Подобные пилотные решения в Российской Федерации были реализованы, например, АО «КБ Навис» (Д.Ф. Миляков).

Вторым вектором развития систем, обеспечивающих движения безэкипажных судов, является их точная

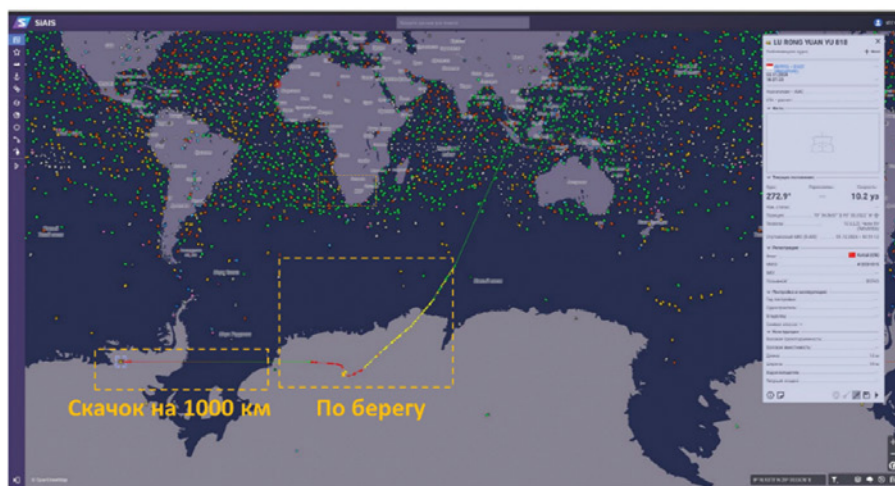


Рис. 9. Инновации в области систем связи и идентификации



Инновации в:

- (1) спутниковых системах;
- (2) повышении частот;
- (3) системах идентификации;
- (4) энергопотреблении.

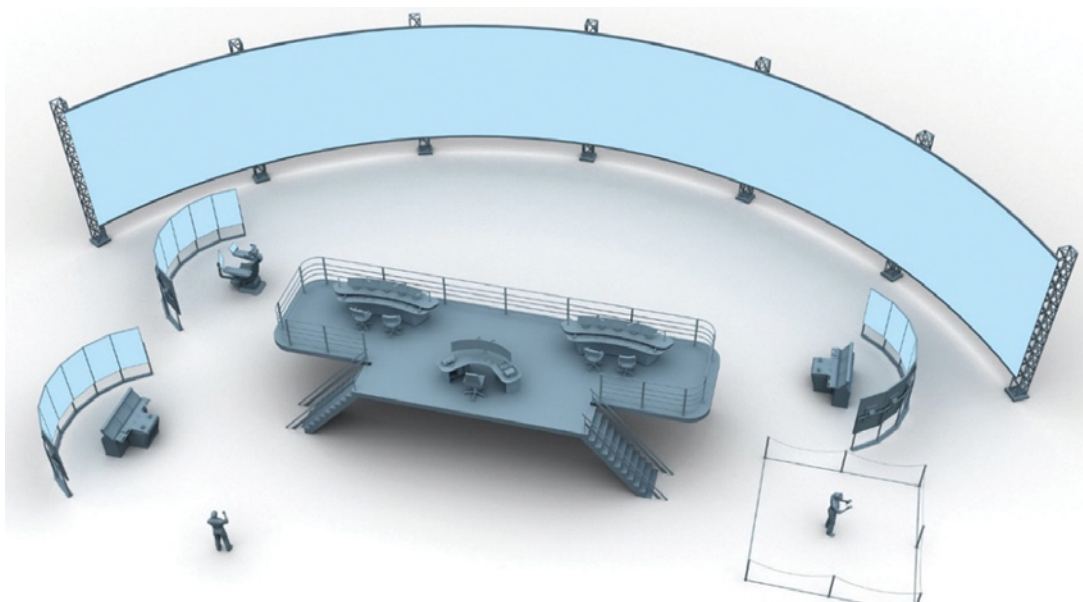


Рис. 12. Примерная компоновка ЦДУ, отвечающего за выделенный регион, включая акваторию портов и подходов к ним (отображаемых на большом экране), и оснащенного средствами контроля группы МАНС (два средства формирования заданий (в центре); четыре ПДУ разных типов и средства управления его инфраструктурой)

с дизелями и турбинами, приемлемой экономичностью, они проще в реализации и адаптации к новым корпусам и имеют меньший набор сопутствующих систем, обеспечивающих их работу, при этом проще и надежнее в управлении. В этой области предлагается использовать винторулевые колонки различных типов, к которым передается электроэнергия от оптимизированных аккумуляторов цилиндрической формы.

При этом все инновации будут нацелены на генерацию и «хранение» электроэнергии (см. рис. 10, красный прямоугольник) по четырем основным направлениям:

1) использование технологий прямого преобразования углеводородов в электроэнергию с помощью электрохимической реакции, выделяемого водорода с воздухом (O_2), происходящего в топливных каталитических элементах. Это по данным Национальной технологической инициативы (для установки «Топаз») обеспечит снятие 4000 Вт·ч с 1 кг веса вместо 260 Вт·ч с 1 кг веса NiCa;

2) использование изотопных технологий: компактных ядерных реакторов для вращения валов генераторов и изотопных Ni69 аккумуляторов со сроком службы до 50 лет;

3) использование солнечных батарей;

4) применение традиционных подходов к различным видам топлива для существующих средств вращения валов генераторов.

Тенденции развития систем управления и автоматизации. Основной тенденцией развития систем управления судами будет их более жесткое деление на упрощенный индивидуальный *бортовой* и интеллектуальный *бе-*

реговой сегмент, в котором произойдет трансформация систем управления в береговые центры принятия решений (рис. 11, 1, выделено красным), из которых осуществляется управление группами объектов с детальным анализом их индивидуального управления, контролем состояния всех их систем и выполняется корректировка параметров настроек. Причины данной трансформации детально изложены в работах [3, 4].

При этом дистанционное управление судном выполняется капитаном, находящимся в береговом центре управления (ЦДУ), представленном на рис. 12. Такой центр создается в соответствии с концепцией, изложенной в работах [5, 6], как основной элемент береговой инфраструктуры (см. рис. 11, 1) и используется для управления не только судами, но и адаптивными средствами навигационного разграничения (см. рис. 11, обозначено зеленым цветом).

Для электронных устройств, используемых при автоматизации процессов управления движением (см. рис. 11, область «УД»), характерно планомерное развитие в направлении упрощения средств идентификации индивидуальных параметров объектов управления и процесса построения таких систем.

Как было описано выше про тенденции развития систем связи и идентификации, для решения задачи ситуационной осведомленности (см. рис. 11, 2, область «СО») остается актуальным развитие различных автоматических систем точного позиционирования за счет однозначной интеграции данных от разных типов устройств: технического зрения, ак-

тивных/пассивных идентификаторов положения с учетом элементов навигационно-разграничительной разметки берегового сегмента.

Происходит трансформация человеко-ориентированного интерфейса управления судном с помощью традиционных приборов навигационного мостика (рис. 13, а), созданных для группового управления людьми во время ходовой вахты, в киберкресла (рис. 13, б) с индивидуальным и эпизодическим несением вахты.

Однако автономные суда не требуют обязательного присутствия на борту человека, следовательно, нет необходимости постоянно «держат» на борту таких судов человеко-ориентированные интерфейсы. Нужны будут интерфейсы, позволяющие эпизодически подключать пользовательские терминалы дистанционно или в случае прибытия швартовой команды/сервисных специалистов. Новый подход к организации ходовой вахты приведет к революционным изменениям в навигационном оборудовании и ПО систем управления МАНС. Для этого потребуются специальные физические и киберзащищенные рековые системы для размещения оборудования мостика (рис. 13, в), произойдет расширение использования приемов виртуализации вычислительных ресурсов, универсализация операционных систем, расширение использования микросервисных решений при реализации алгоритмов управления (полученных от всех заинтересованных производителей) в едином пространстве и т.д.

Последнее, что следует выделить среди общемировых приоритетов инновационного развития средств автоматизации – это развитие систем

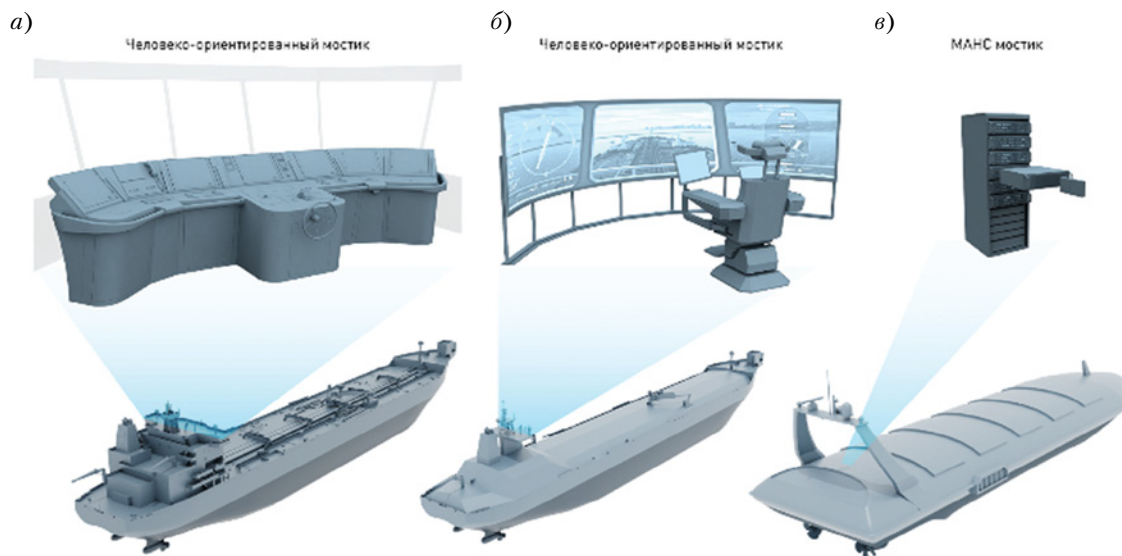


Рис. 13. Трансформация навигационного оборудования ходового мостика: а – для ходовой вахты, состоящей из 2–4 человек; б – для 1 человека; в – без человека на мостике

самодиагностики (см. рис. 11, 4) оборудования МАНС. Развитие этого направления будет одним из важных факторов успеха автономного флота. И если эта проблема не будет эффективно решена, то мы будем узнавать о сбое только тогда, когда он уже произошел, и станем бороться с его последствиями вместо предотвращения появления отказа на ранних стадиях его развития. Поэтому будут приоритетно создаваться средства предупредительной самодиагностики основных электроприводных систем и электронных средств управления и оборудования МАНС.

Тенденции развития ПО и искусственного интеллекта. Развитие ПО и технологий «сильного» ИИ на водном транспорте будет происходить по четырем основным направлениям (рис. 14, 5):

1) оптимизация грузоперевозок и логистики, включая оптимизацию движения и маршрутов, снижение рисков; интеллектуального отслеживания грузов, мониторинга грузопотоков; управления терминалами и систем взаимодействия с пассажирами;

2) развитие систем автономной навигации и систем поддержки принятия решений, ориентированных на: предотвращение столкновений, предиктивное техническое обслуживание судов и инфраструктуры, управляемую безопасность рисками и реагирования на ЧС;

3) развитие «зеленой повестки», которая будет безусловно присутствовать под давлением европейских стран и будет ориентирована на энергоэффективность и сокращение выбросов, мониторинг и управление воздействием МАНС на окружающую среду;

4) развитие систем обучения «интеллекта» электронных устройств и персонала с целью адаптации к «новым (непредвиденно возникающим) условиям работы».

Основные тенденции, озвученные на ведущих международных конференциях в области развития ПО, формулируются в виде тезиса: «У кого в руках появится «сильный» искусственный интеллект – тот получит преимущество в гонке за все сферы экономики (при очевидном двойном назначении этих технологий)». Само развитие ИИ пла-

нируется производить с помощью представления/интерпретации данных в удобном для ИИ виде и с использованием цифровых двойников, рассматриваемых ниже.

РАБОТА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПО ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РЕЕСТРОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДО 2050 Г.

Остановимся только на двух задачах, стоящих перед цифровыми двойниками (ЦД), которые разнонаправленно понимаются различными специалистами, о чем свидетельствуют выступления на международных конференциях.

Первая задача: работа ЦД с использованием технологии распределенных реестров в системах управления позволит исключить возможность подмены «данных» или «сформулированных рекомендаций по управлению» (рис. 15).

Вторая задача: использование ЦД для прогнозирования ситуаций, которые не могут быть созданы для выборки обучения ИИ (собственно, в этот момент ИИ и становится «силь-

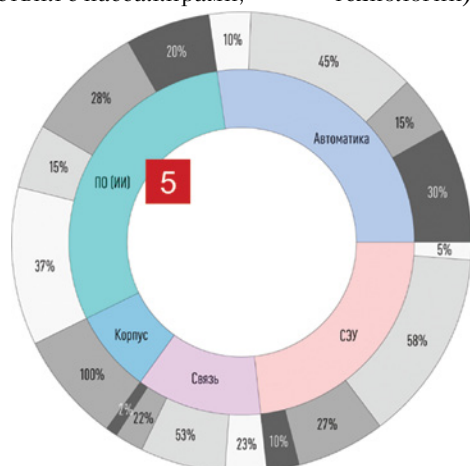


Рис. 14. Инновации в области развития ПО и ИИ

Основные инновации и доля вклада в них:

- 1) оптимизация грузопотока, которая будет наиболее результативным трендом;
- 2) цифровые двойники, внедряемые в управление и интерпретацию / пространственное представление данных (на чем остановимся отдельно ниже);
- 3) кибербезопасность, которая будет затрагивать все аспекты работы ПО;
- 4) хранение и обработка больших объемов данных, создание систем быстрой навигации по ним и их подготовка для обработки искусственным интеллектом.

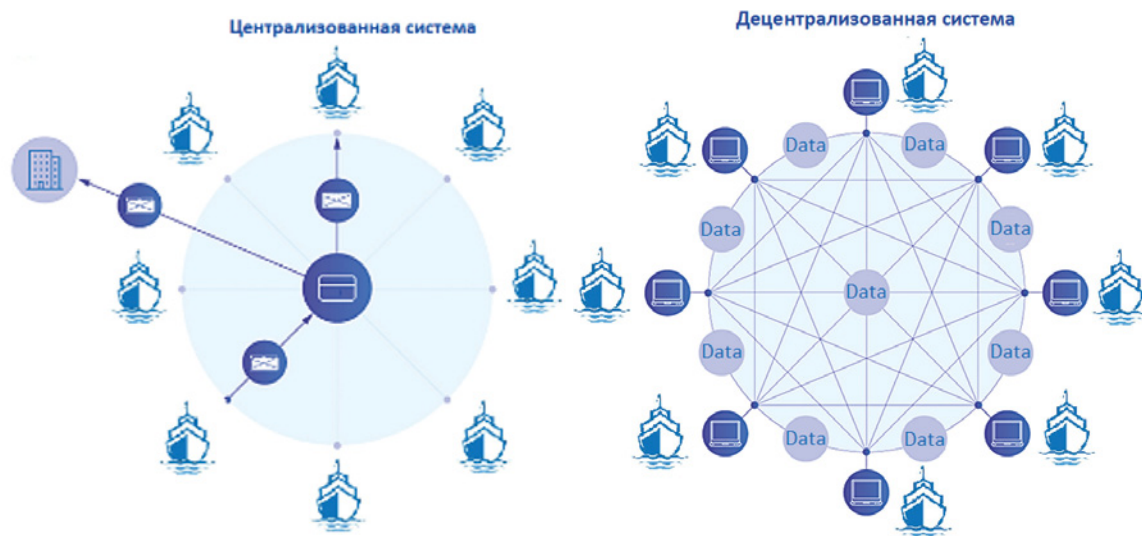


Рис. 15. Переход от централизованной системы использования данных к децентрализованной, где DATA-блок – это набор данных, содержащий координаты и основные параметры судна, груза и работы его систем

ным»). Именно ЦД дает возможность ИИ «доучиваться» и «самообучаться» на основе численно-моделируемых процессов:

- с использованием ранее изученных законов физики;
- с помощью прогрессирующих вычислительных ресурсов компьютерных сетей.

Следует отметить, что для успешного решения ИИ оптимизационных задач и задач интеллектуального управления первоначально с помощью цифровых двойников необходимо ре-

шить известную задачу: «что – если» для всех эксплуатационных и аварийных режимов работы навигационных объектов и для всех их систем (рис. 16) в ранее оцифрованном регионе (по принципам, изложенным в работе [7].

Оцифрованные регионы, как и все исходные данные и запросы, должны быть представлены и интерпретированы в удобном не для человека, а для ИИ виде, что создает запрос на появление нового вида специалистов – класса промт-инженер (например,

электронно-картографические системы создавались для быстрого восприятия человеком окружающей его обстановки, но при этом формат обстановки для ИИ будет отличаться).

Для эффективной эксплуатации ИИ должна быть решена задача его самообучения, определены граничные условия и область его предполагаемого использования. Мы не можем с помощью ИИ сразу решить все задачи, так как для этого потребуются обширный обучающий (прежде всего, статистический) материал, называ-

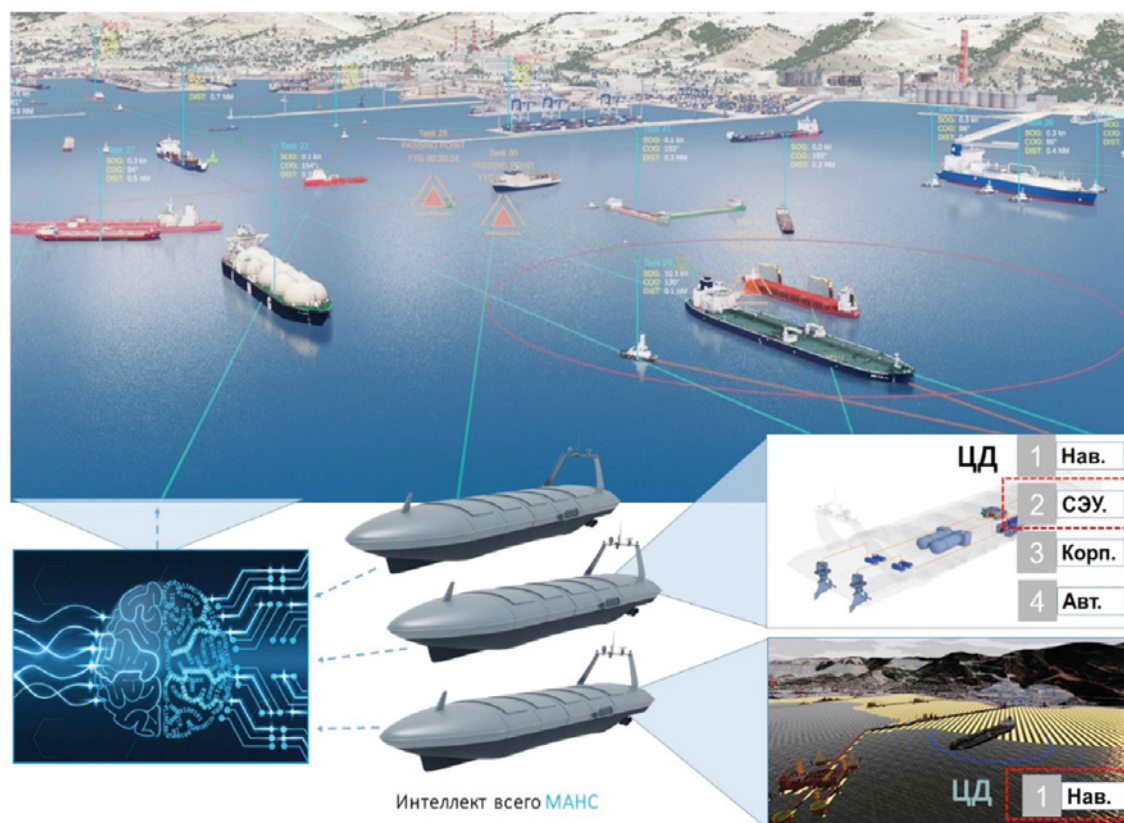


Рис. 16. Представление потоков информации (по объектам, их системам в ассоциированном цифровом регионе), необходимой для работы «сильного» ИИ, и вложенность работы цифровых двойников разных классов, выполненных с разной степенью детализации (1–4). Они обеспечивают высокую степень уточнений информационных запросов, поступающих от ИИ

емый «выборкой обучения». Поэтому *при первых шагах* развития ИИ с помощью ЦД различных типов для каждого объекта будет создаваться «механизм запроса» по уточнению ситуации, с которой в своей работе столкнется ИИ. Именно создание «синтетических данных» с помощью ЦД будет в ближайшее время наиболее приоритетной задачей, поскольку ЦД будут создавать основу для формирования коэффициентов нейромоделей, которая и будет использоваться для принятия последующих решений и формализации выводов ИИ.

Таким образом, ЦД математически «точно» опишут область, в которой будет применяться ИИ, и только после этого можно будет применять ИИ для управления различными объектами, находящимися в выбранном регионе. Такой подход считается наиболее приоритетным и технологичным для решения круга алгоритмически значимых задач в прикладных областях. А далее произойдет поэтапное уточнение работы ЦД, которое будет последовательно расширять границы применения ИИ, что в результате позволит «поэтапно объять необъятное».

ВЫВОДЫ

В заключение можно выделить основные моменты.

Первое: мы однозначно стоим на пороге революционных изменений флота, которые уже начали происходить и будут только нарастать, приводя к деградации набора человеко-ориентированных технологий (таких, как ЭКНИС, СУДС и др.).

Второе: происходящие технологические изменения приведут к появлению нового класса судов, таких как движущийся надводный хаб, являющийся по сути носителем дронопортов водного базирования. На рис. 6 для водного транспорта представлен вид такого мобильного дронопорта, ориентированного на перевозки грузов на необорудованные терминалы с возможностью грузооборота с заинтересованными получателями без остановок судна в условиях движения по внутренним водным путям и при каботажном плавании.

Третье: гонка в развитии всех инноваций выигрывается «за партией» в средней и высшей школе, поэтому происходящее однозначно затронет подготовку кадров и модернизацию технологий, которые были ориентированы на наличие людей на борту. Поэтому в области подготовки кадров мы должны предусмотреть:

1) создание системы подготовки, которая сможет обеспечить выпуск специалистов, способных адаптироваться к изменениям в отрасли за счет формирования сильного профильного высшего образования, в котором от ведущейся сейчас «подготовки по приобретению минимальных навыков (установленных конвенцией ПДНВ-95/monkey push button training)» должен быть совершен переход к базовому образованию, позволяющему адаптироваться не только к «технологиям и конкретным приборам (конкретной установке)», *формирующему способность к самостоятельной организации системной деятельности* при стремительно изменяющимся условиям и переходе от взаимодействия «один с одним» к взаимодействию «множества со множеством» объектов управления.

Для этого необходимо отказаться от идей Г.О. Грефа по деградирующему «обучению» населения в средней школе и болонской системы (формирующей плохо подготовленных специалистов в вузах) *и сформировать у специалистов «привычку учиться»* (И.В. Сталин) с помощью организационных мероприятий государственной политики;

2) универсализацию морского и речного образования, поскольку с точки зрения ИИ «река» – это просто длинный морской порт со специальными требованиями, зафиксированными в документах о правилах плавания в выделенной акватории, которые обработаны специалистами и формализованы до уровня, «понятного» ИИ;

3) формирование нового класса специалистов в области интеллектуальных систем управления, логистики и оптимизационных задач. Они должны будут работать с ИИ, поддерживать и развивать его в интересах судоходных компаний, портов, министерств. На первом этапе появится новая специальность промт-инженер (т.е. инженер, формирующий и вырабатывающий правильные запросы ИИ, занимающийся интерпретацией полученных от ИИ решений/ответов и т.д.);

4) появление новой специальности Marine DevOps для морской IT-индустрии, формируемой вследствие изменения условий эксплуатации и управления судном. Данный специалист будет иметь междисциплинарные компетенции (специалиста по автоматике, радиоинженера, системного администратора), что позволит ему достаточно быстро и оперативно менять инфраструктуру и ПО как береговой инфраструктуры, так и на борту судна,

динамично адаптироваться к IT-преобразованиям в отрасли;

5) появление новой специализации в области эксплуатации СЭУ: робототехников, обслуживающих промышленных роботов (включая роботов грузовых помещений) и электромехаников, работающих в области трансформации СНх, изотопных технологий (изотопных аккумуляторов и компактных ядерных реакторов);

6) появление новых специалистов по дистанционному управлению, эксплуатации береговых центров дистанционного управления, спутниковых систем и морских экологов, обладающих знаниями в области технической эксплуатации флота и конструкций судов.

Российская Федерация благодаря деятельности Минтранса, научных организаций и вузов страны смогла создать целостную систему законодательства в области морского автономного надводного судоходства, поэтому логично следующим шагом совместно с Минобрнауки РФ решить задачу адаптации образования под перечисленные выше вызовы нового времени.

По материалам доклада на Совете по образованию ФАМРТ, 19.12.2024 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Видеозапись III Международной научно-практической конференции «Автономное судоходство-2024» // Минтранс РФ, РУТ (МИИТ) от 28.11.2024, Москва: сайт. – URL: <https://cloud.mail.ru/public/kF7e/agWJa5iL8> действует на 12.02.2025.
2. Состояние дел в автономном судоходстве // Дайджест–2024/НОЦ морского, внутреннего водного транспорта и технологий автономного судоходства, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Минтранс РФ. – М., 364 с.
3. Амбросовский В.М., Казунин Д.В., Смоленцев С.В. Дистанционное управление безэкипажными судами // Морской вестник. – 2021. – №3 (79). – С. 105–108.
4. Амбросовский В.М., Казунин Д.В., Орлов А.П. Система управления автономных и дистанционно управляемых судов // Морской вестник. – 2019. – №3 (71). – С. 87–90.
5. Казунин Д.В., Ефимов В.В. Разработка проекта требований РС к автономным судам // Науч.-техн. сб. РМРС. – 2020. – №60 (61). – С. 4–22.
6. Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых судов (МАНС). НД № 2-030101-037/ РМРС. – 2020. – 96 с.
7. Розенберг И.Н., Соколов С.С., Дубчак И.А. Методы формирования цифрового двойника акватории для навигации беспилотных судов // Мир транспорта. – 2023. – №21(6). – С. 6–13. – URL: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-1>. ■

Создание, развитие и оснащение морских спасательных служб, поисково-спасательных и аварийно-спасательных формирований современными роботизированными средствами поиска и спасания на море в Морской доктрине РФ определено как приоритетное направления развития поисково-спасательного обеспечения (ПСО) морской деятельности. Это положение с полным основанием может быть отнесено в целом к водным объектам: отдельным частям морей (проливы, заливы, бухты, лиманы и другие), водоемам (озера, пруды, водохранилища и др.), а также к водотокам (реки, ручьи, каналы), на которых возникает необходимость спасения людей. Объективная необходимость более широкого внедрения роботизированных спасательных средств (РСС) при проведении морских спасательных операций (МСО) обусловлена тем, что они обладают более высокой эффективностью по сравнению с традиционными спасательными средствами при использовании в экстремальных условиях для оказания помощи людям и аварийным судам, терпящим бедствие. Спасательные операции приходится выполнять, как правило, в сложных гидрометеорологических условиях, в ночное время, при низких температурах воздуха и воды, а также в условиях проведения боевых действий. Такие условия создают значительный риск для спасателей при проведении МСО. Применение РСС позволит не только свести к минимуму риск для спасателей, но и расширить диапазон экстремальных условий, при которых возможно спасение людей. Опыт проведения специальной военной операции показывает эффективность применения тяжелых беспилотных летательных платформ, оборудованных носилками для эвакуации раненых, доставки различных грузов для поддержания жизнедеятельности изолированных от основных сил подразделений. Поэтому применение эффективных РСС – актуальная и перспективная научно-техническая задача.

МЕСТО И РОЛЬ СПАСАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ В СПАСАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Спасательные средства – это составная часть спасательной техники, которая используется как для спасения людей, терпящих бедствие на акватории, так и для поиска, обследования и оказания помощи аварийным морским или речным объектам (далее – аварийным объектам).

Спасательные средства применяются при непосредственном спасении людей, терпящих бедствие на акватории, и включают:

- спасательные средства на морских (речных) объектах;
- бортовое авиационное аварийно-спасательное оборудование пилотируемых воздушных судов;
- десантируемые воздушными судами авиационные спасательные средства.

Спасательные средства подразделяются на индивидуальные (ИСС), коллективные (КСС), средства эвакуации людей с аварийных объектов, подъема (эвакуации) людей с поверхности воды и вспомогательные [1, 2].

Приоритетность развития ИСС и КСС обусловлено прежде всего тем, что гибель экипажа и персонала судов, как правило, происходит до прибытия сил ПСО. Оперативное и своевременное спасение людей силами аварийно-спасательных служб не всегда представляется возможным как из-за удаленности мест дислокации спасательных служб от возможных мест возникновения аварий морских объектов, так и от отсутствия или несвоевременного оповещения об аварии.

О РАЗВИТИИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СПАСАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

В. Н. Илюхин, д-р. техн. наук, проф.,

руководитель секции поисково-спасательной техники и технологий
Российского НТО судостроителей им. акад. А. Н. Крылова,
контакт. тел. (812) 7104011

Под спасательной техникой для поиска, обследования и оказания помощи аварийным объектам понимают средства, применяемые на различных этапах МСО:

- средства оповещения об аварии на судне;
- средства обозначения местоположения людей, терпящих бедствие на акватории, и аварийного объекта;
- средства поиска, обследования людей и аварийного объекта;
- средства поддержания на плаву и снятия с мели аварийного объекта;
- пожарная и водолазная техника.

Из перечисленных видов спасательной техники в наибольшей степени роботизированы средства поиска, обследования людей и аварийного объекта, к которым относятся морские робототехнические средства (МРТС) и морские робототехнические комплексы (МРТК). Согласно [5] под МРТС понимают техническое средство, обладающее свойствами морского робота, способное выполнять задание по назначению автономно или под дистанционным управлением, или в сочетании указанных способов управления. К МРТС относятся: безэкипажный корабль (БЭК), обитаемый подводный аппарат (НПА), беспилотный летательный аппарат (БЛА), каждый из которых может быть РСС.

МРТК состоит из одного или нескольких МРТС и специального оборудования, обеспечивающего их применение по назначению в морской среде, которые объединены общим конструктивным решением.

НОРМАТИВНАЯ БАЗА РОБОТИЗИРОВАННЫХ СПАСАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Целью развития РСС является повышение эффективности использования спасательных средств, расширение их функциональных возможностей. Для реализации этой цели в нормативных документах должны быть предусмотрены требования к РСС, а также к полезной нагрузке МРТС и МРТК, предназначенных для спасания людей. Роботизированную спасательную систему следует рассматривать как совокупность РСС, МРТС и МРТК. Следует отметить, что требования к полезной нагрузке МРТС и МРТК, которой являются ИСС, КСС, средства эвакуации людей с поверхности воды и с аварийного объекта, в национальных стандартах [3–6] отсутствуют, как и в Правилах Российского морского регистра судоходства (РМРС) [7–11]. Вместе с тем в Правилах РМРС [10] есть требования к спасательным средствам и устройствам нового типа, в том числе к РСС, а также к альтернативным проектным решениям. Спасательное средство или устройство нового типа обладают новыми характеристиками, которые обеспечивают равный или более высокий уровень безопасности, однако требования к ним не полностью зафиксированы в настоящей части Правил. Альтернативные проектные решения спасательных средств нового типа могут отклоняться от требований Правил РМРС при обеспечении равноценного уровня безопасности, предусмотренного Правилами. Однако методики оценки этого уровня бе-

зопасности в Правилах не предусмотрены. В большей степени требования к спасанию людей учтены для беспилотных авиационных систем (БАС) [12–17]. Среди восьми основных направлений развития БАС, предусмотренных распоряжением Правительства РФ от 21.06.2023 г. № 1630 р в «Стратегии развития беспилотной авиации РФ на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года» обозначено и создание БАС для проведения спасательных работ. В ГОСТ Р 56122–2014 [15] предусмотрены требования к БАС, которые способны выполнять при проведении операций поиска и спасания полеты повышенной продолжительности даже в удаленных районах и опасных условиях и ретранслировать информацию. Вместе с тем в [15] отмечено, что требуется разработать соответствующие положения, предусматривающие использование БАС и внешних пилотов для проведения таких операций, в рамках нормативов, принятых Международной организацией гражданской авиации. В ГОСТ Р 70802–2023 [17] задача БАС по эвакуации пострадавших определена не как текущая, а как перспективная.

Важно заметить, что стремительное развитие РСС, МРТС и МРТК тормозит отсутствие гармонизации ряда действующих и новых национальных стандартов и других нормативных документов.

РОБОТИЗАЦИЯ – ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ СПАСАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Несмотря на несовершенство и отсутствие нормативных документов, разработка РСС началась около десяти лет назад. Так, например, специалисты спасательной службы Якутии инициативно разработали радиоуправляемое спасательное средство (рис. 1), доставляющее ИСС человеку на акватории на расстоянии до 500 м от берега [18], а также спасательный снаряд с более мощным двигателем и максимальной грузоподъемностью около 130 кг, которое может транспортировать человека к берегу. Планируется разработка РСС, способного в темное время суток самостоятельно находить людей в воде и подплывать к ним. Московская городская поисково-спасательная служба использует БЛА для доставки ИСС (спасательный круг, спасательный жилет и др.) для терпящих бедствие на воде (рис. 2). При ударе о воду жилет надувается газом [19].

Предприятием АО «НПП «Радар ММС» разработано многоразовое роботизированное средство «Кальмар» для доставки различной полезной нагрузки: спасательных средств; средств поиска и поддержания жизнедеятельности человека и др. (рис. 3) [20]. Данное РСС предназначено для оснащения судов и морских сооружений.

АО «НПП «Радар ММС» разработало РСС «Аврора» (рис. 4), способное автономно и при дистанционном управлении с помощью технического зрения в автоматическом режиме вести поиск людей на акватории и доставлять им спасательный плот. Масса РСС составляет около 30 кг. В район поиска РСС «Аврора» может доставлять вертолеты, воздушные суда и БЛА, оснащенные поисковыми локаторами, а также оптиметрическими и радиоэлектронными станциями. РСС «Аврора» можно размещать при помощи специальных ложементов на судах.

Одним из режимов работы комплекса является отслеживание индивидуальных спасательных маяков. Например, если человек, который имеет при себе такой маяк, окажется за бортом, спасательный комплекс отреагирует и отправится на помощь. После того как РСС «Аврора» нашло человека в море, робот разворачивает спасательный плот и включает средства обнаружения. Время автономной работы комплекса составляет около часа, дальность действия радиосвязи до 1 км, а максимальная скорость – 20 уз, мореходность – до 6 баллов [21].

ООО «Каяк Моторс» совместно с АО «Концерн «Моринформсистема–Агат» и другими организациями в рамках национальной технологической инициативы разработало роботизированную поисково-спасательную систему на основе комплекса технического зрения BoatVision и индивидуального спасательного средства ThermoCap-E [22]. Данная система предназначена для самостоятельного реагирования на возникновение ситуации «человек за бортом» и решения основных проблем человека, терпящего бедствие: поддержание на плаву, защита от переохлаждения, обеспечение оперативной сигнализации о происшествии и определение местонахождения человека до момента прибытия спасателей. Если человек с датчиком радиосигнала оказывается за бортом судна, то срабатывает система управления, осуществляющая сброс РСС, после чего оно самостоятельно идет к спасаемому с маршевой скоростью до 25 км/ч. Дальность обнаружения человека – до 3 км. После контакта РСС со спасаемым происходит раскрытие надувного плота. Далее человек может



Рис. 1. Радиоуправляемое спасательное средство



Рис. 2. БЛА со спасательным жилетом



Рис. 3. МРТС «Кальмар» для доставки спасательных средств



Рис. 4. Роботизированный спасательный плот «Аврора»

активировать систему обогрева, связаться с судном, маневрировать и двигаться к ближайшему берегу и т. д.

АО «Концерн «Моринформсистема-Агат» разработало роботизированную спасательную систему «Соломинка-Робот» (рис. 5), в которую входят:

- автоматизированное рабочее место системы управления для судна и берегового центра;
- спасательные жилеты с автоматической идентификационной системой (АИС);
- БЭК для поиска и спасения людей с системой управления с судна и берегового центра;
- БЛА, оснащенный системой GPS/ГЛОНАСС, инфракрасной и видеокамерами для оперативного поиска человека за бортом, ретрансляции данных о найденных людях [23]. Варианты базирования системы – судно, берег, БЭК.

Использование БЛА (БАС) на спасательных судах при МСО имеет ряд преимуществ перед пилотируемыми воздушными судами, что обуславливает их применение для поиска людей и объектов, терпящих бедствие на море. В иници-

иативном плане ФГБУ «Морспасслужба» в 2022 г. провела испытания в Карском море БЛА судового базирования SeaDrone (рис. 6). В процессе поиска и спасения людей БЛА работал в условиях сильного ветра (до 18 м/с) и совершал посадку и взлет с воды при высоте волны до 1,5 м. Также данный тип БЛА может быть посажен на воду в качестве средства, позволяющего человеку держаться на плаву.

ЗАО «Си Проект» на 18-й Международной выставке «Нева-2025» и конференции представляло многофункциональный МРТК «Бриз» (рис. 7), назначение которого не только эвакуация людей при проведении МСО, но и доставка грузов, проведение гидрографических работ и экологический мониторинг акватории. Технология эвакуации людей с поверхности воды требует уточнения. В состав МРТК «Бриз» входят БЭК, система управления и связи, ТНПА, БЛА. Максимальная скорость – 20 уз, грузоподъемность – 50 кг.

Компании «Океанос» и НАЕСО представили на «Неве-2025» многофункциональный МРТК «Лоцман-Н» для поисково-спасательных, гидрографических, геофизических и экологических работ.

Общим для рассмотренных выше РСС и систем является наличие у терпящих бедствие людей персональных аварийных радиомаяков (АИС), обеспечивающих передачу координат их местоположения для своевременного прибытия спасателей. Такие радиомаяки разработаны 10–15 лет назад. Однако их обязательное применение в нормативных документах пока не предусмотрено. Нужно заметить, что будь названные выше РСС у моряков АПЛ «Комсомолец», которым после аварии 7.04.1989 г. были сброшены с Ил-38 спасательные плоты и до которых они не смогли доплыть, многие из них могли бы быть спасены.

ЦНИИ РТК совместно с НГТУ им. Р. Е. Алексеева разработали роботизированное амфибийное эвакуационно-спасательное средство (рис. 8) для доставки до 30 спа-



Рис. 5. Роботизированная спасательная система «Соломинка-Робот»



Рис. 6. БЛА спасательного судна ФГБУ «Морспаслужба» осуществляет поиск пострадавшего при помощи GPS датчика

сенных на расстояние до 300 км к стационарному пункту оказания помощи [24]. Данное средство способно передвигаться по воде, твердому грунту, ледовым и снежным полям на различных базовых шасси – колесных, гусеничных, роторно-шнековых. По оценке разработчиков, эффективность предлагаемого РСС в 1,8 раза выше эффективности альтернативного вертолетного комплекса при спасении одиночных людей, терпящих бедствие в ИСС, и в 1,1 раза выше, чем у вертолетного комплекса при спасении 10 человек из КСС [24].

Отечественный опыт разработки, создания и применения в ходе МСО подводных МРТС и МРТК насчитывает более 50 лет. Основным фактором, послужившего толчком для развития подводной робототехники, стал ряд аварий и катастроф с подводными лодками и самолетами. Подводные МРТС и МРТК участвовали во многих МСО и продолжают использоваться для решения расширяющегося спектра задач, том числе:

- для поиска, обследования и подъема подводных объектов;
- для выполнения различных подводно-технических работ;
- для проведения научных исследований и др.

К сожалению, пока отсутствуют отечественные РСС для эвакуации людей из аварийных ПЛ, лежащих на грунте. Эта задача сегодня решается только обитаемыми спасательными подводными аппаратами. Вместе с тем перспективным является роботизированное подводное спасательное средство Drass SRV (рис. 9). Оно представляет собой ТНПА, жестко связано с барокамерой для ее стыковки с аварийной ПЛ и последующей эвакуации подводников [25].

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СПАСАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

При разработке РСС необходимо учитывать общие требования, предъявляемые к МРТС и МРТК, а именно необходимость:

- создания РСС большого радиуса действия и длительной автономности;
- оснащения РСС системами управления с элементами интеллекта;
- унификации, модульного построения, миниатюризации и интеллектуализации;
- обеспечения надежности, стойкости к внешним воздействующим факторам и живучести;
- сочетания непосредственного, супервизорного, автоматического и группового управления;
- обеспечения возможности действий в районах, труднодоступных для традиционных средств – на больших и предельно малых глубинах; в условиях радиационно-химического заражения; в неблагоприятных метеоро-



Рис. 7. Многофункциональный морской робототехнический комплекс «Бриз»



Рис. 8. Роботизированное амфибийное эвакуационно-спасательное средство

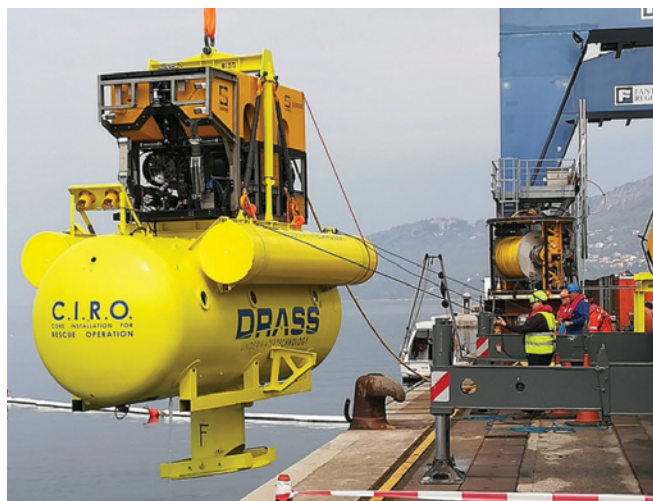


Рис. 9. Подводное спасательное средство Drass SRV

логических и гидрологических условиях, в том числе подледных и др.

При разработке РСС необходимо учитывать особенности различных водных объектов. По данным Ространснадзора [26], в 2024 г. на судах торгового мореплавания погибло 17 человек, а на судах рыбопромыслового флота – 9 человек. За тот же год, по данным МЧС России [27], на водных объектах (части морей, водоемы, водотоки) погибло более 3,6 тыс. человек. Основной причиной происшествий здесь является купание в необорудованных для этого местах. За 2017–2021 гг. на водных объектах (рис. 10) погибло людей на два порядка больше, чем на морях [28].

Имеющиеся в настоящее время количество спасательных станций и спасательных постов на водных объектах и их расположение не в полной мере отвечают современ-

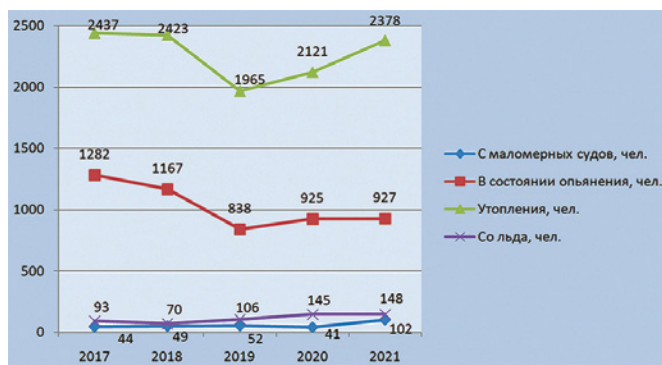


Рис. 10. Динамика гибели людей на водных объектах 2017–2021 гг.

ным требованиям, поэтому одним из путей решения требований федерального закона № 4-ФЗ от 03.02.2025 г. «О безопасности людей на водных объектах» может стать более широкое использование РСС в аварийно-спасательных формированиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, можно сделать следующие выводы:

1. В отсутствии межведомственной программы развитие РСС носит, как правило, инициативный характер. Отсутствует единая система взглядов на РСС. Уровень практического применения этих средств, несмотря на ряд выполненных разработок, недостаточен.

2. Требования к РСС в действующих национальных стандартах и других нормативных документах по МРТС и МРТК не конкретизированы и не затрагивают все аспекты их применения. Соответствующие национальные стандарты следует гармонизировать и обновить.

3. Целесообразны актуализация Правил РМРС о спасательных средствах, в частности ввод обязательности наличия персональных радиомаяков и АИС на ИСС, и разработка методики оценки уровня безопасности спасательных средств нового типа.

4. Для существенного снижения гибели людей необходимо создание РСС (в том числе десантируемых с самолетов) и систем, предназначенных для их спасения прежде всего на водных объектах – озерах, прудах, обводненных карьерах, водохранилищах и т. п.; в отдельных частях морей – в проливах, заливах, бухтах и др.; в Арктической зоне РФ и др.

5. Для создания РСС необходимы системный подход и интегратор, способный объединить все заинтересованные стороны, а также межведомственная программа развития этих средств на базе концепции, обозначенной в федеральном законе № 4-ФЗ от 3.02.2025 г. «О безопасности людей на водных объектах».

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ Р 52265–2020. Спасательные средства экипажей инженерных сооружений, эксплуатируемых на акваториях. Классификация.
- ГОСТ 22949–78. Оборудование аварийно-спасательное авиационное. Термины и определения.
- ГОСТ Р 60.7.0.1–202. Роботы и робототехнические устройства. Робототехнические комплексы морского назначения. Классификация.
- ГОСТ Р 60.7.0.2–2022. Роботы и робототехнические устройства. Комплекс телеуправляемого необитаемого подводного аппарата рабочего класса.
- ГОСТ Р 60.7.0.3–202. Роботы и робототехнические устройства. Аппараты необитаемые подводные. Классификация.
- ГОСТ Р 54344–2011. Мобильные робототехнические комплексы для проведения аварийно-спасательных работ и пожаротушения.

Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний.

- Правила освидетельствования и классификации маломерных судов. – Ч. 3: Классификация маломерных необитаемых судов. НД № 2–020–101–147/РМРС. – СПб., 2025.
- Положение о классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов. НД № 2–030101–037/РМРС. – СПб., 2020.
- Правила классификации и постройки необитаемых подводных аппаратов. НД № 2–020201–023/РМРС. – СПб., 2023.
- Правила по оборудованию морских судов. НД № 2–020101–171. – Ч. 2: Спасательные средства/РМРС. – СПб., 2024.
- Правила классификации и постройки морских судов. – Ч. 17. НД № 2–020101–104. Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные характеристик судна/РМРС. – СПб., 2018.
- Постановление Правительства РФ от 30.11.2024 г. № 1701 «Об утверждении требований к оснащению пилотируемых воздушных судов и беспилотных авиационных систем оборудованием связи».
- ГОСТ Р 57258–2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения.
- ГОСТ Р 59517–2021. Беспилотные авиационные системы. Классификация и категоризация.
- ГОСТ Р 56122–2014. Беспилотные авиационные системы. Общие требования.
- ГОСТ Р 59518–202. Беспилотные авиационные системы. Порядок разработки.
- ГОСТ Р 70802–2023. Беспилотные авиационные системы для обеспечения пожаротушения, аварийно-спасательных и других работ, выполняемых в целях предупреждения ЧС и ликвидации их последствий. Общие требования.
- Спасательный радиоуправляемый снаряд. – URL: <https://old.spas-sakha.ru/component/content/article/1/286–2013–12–25–13–12–19> (дата обращения 21.10.2025).
- Московская городская спасательная служба. Беспилотный летательный аппарат. – URL: <https://kgh.moscow/projects/spasenie-utopayushchikh-delo-ruk-spetsialistov-kak-rabotaet-moskovskaya-služba-spaseniya-na-vode> (дата обращения 21.10.2025).
- Многоразовое роботизированное средство доставки полезной нагрузки. – URL: <https://radar-mms.com/product/kompleksy-morskogo-bazirovaniya/rpsn-avrora/mnogorazovoe-robotizirovanoe-sredstvo-dostavki-poleznoy-nagruzki-kalmar/> (дата обращения 21.10.2025).
- Роботизированный спасательный плот «Аврора». – URL: <https://radar-mms.com/product/kompleksy-morskogo-bazirovaniya/rpsn-avrora/?ysclid=mhazhx5lgn892230410>. (дата обращения 21.10.2025).
- Роботизированная поисково-спасательная система на основе системы технического зрения BoatVision и индивидуального спасательного средства Thermo Cap. – URL: <https://ctt.smtu.ru/page58569595.html> (дата обращения 21.10.2025).
- Чуй С.А., Вавилов Д.В. Роботизированная судовая система спасения людей по тревоге «Человек за бортом» // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. – 2018. – № 1 (14). – С. 27–34.
- Создание наземного роботизированного комплекса универсальных спасательных средств для Арктики и Крайнего Севера/Шахрамьян М. А., Нестеров И. В., Павлов Е. В., Шубин П. К. и др. – Сб. тр. 32-й Международ. науч.-техн. конфер. «Экстремальная робототехника», ЦНИИ РТК, 2021, с. 303–311.
- Подводное спасательное средство Drass SRV – URL: <https://www.drass.tech/deep-rescue-vehicle-drv/> (дата обращения 21.10.2025).
- Сборник характерных аварий судов на море и транспортных происшествий на внутренних водных путях РФ, произошедших в 2024 г. /Ространснадзор. Управление государственного морского и речного надзора. – М., 2025, с. 6–7.
- МЧС России: в 2024 г. на водоемах погибло более 3,6 тысяч человек. – URL: <https://mchs.gov.ru/devatelnost/press-centr/novosti/5433702> (дата обращения 21.10.2025).
- Бабусенко М.С., Долгов А.А., Зиновьев С.В., Тузов Ф.К. Оценка состояния защиты людей на водных объектах Российской Федерации. Безопасность в чрезвычайных ситуациях // Технологии гражданской безопасности. – 2023. – Т. 20. – № 1 (75). – С. 61–67. ■

Проектирование освещения на кораблях и судах – сложная инженерно-техническая задача, требующая учета условий эксплуатации, соблюдения строгих нормативных требований и оценки влияния различных факторов на состояние личного состава.

Корабль представляет собой сложную техническую систему, управляемую человеком, при этом созданные для этого командные пункты и боевые посты расположены внутри, хорошо защищены и имеют сложную архитектуру, поэтому освещение данных помещений играет ключевую роль в создании комфортного и безопасного пространства, позволяющего эффективно и в течение длительного времени выполнять боевые задачи.

В процессе проектирования дизайна освещения жилых и служебных помещений корабля важнейшими факторами являются качество света, его интенсивность, спектральный состав и степень распределения. При этом главными особенностями проектирования освещения являются учет специфики эксплуатации кораблей в открытом море, длительного отсутствия естественного света и высоких требований к надежности, живучести и безопасности осветительных установок.

Проектирование освещения следует осуществлять, исходя из нормативных документов, регламентирующих санитарные нормы освещенности, и эксплуатационных характеристик корабля, поэтому специалисты ООО «МКС» уделяют особое внимание созданию оптимальной системы освещения, удовлетворяющей всем гигиеническим, эстетическим и техническим требованиям.

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ВЛИЯНИЯ ОСВЕЩЕНИЯ НА ФИЗИКО-ПСИХОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИЧНОГО СОСТАВА КОРАБЛЯ

Недостаточное или неправильно спроектированное освещение оказывает негативное влияние на физическое и психологическое состояние личного состава. Это может приводить к снижению работоспособности, нарушению циркадных ритмов, ухудшению зрения и повышению уровня стресса [1, 2]. Рассмотрим основные факторы воздействия освещения на организм человека.

Интенсивность освещения непосредственно связана с активностью мозга и нервной системой. Чем ниже освещенность, тем сильнее снижается концентрация внимания и увеличивается вероятность ошибок в работе.

Спектральные характеристики света определяют общее ощущение комфорта. Температура света измеряется в градусах Кельвина (К). Теплый свет (низкая температура) создает желтоватый оттенок, тогда как холодный свет (высокая тем-

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИЗАЙНА ОСВЕЩЕНИЯ ИНТЕРЬЕРОВ ЖИЛЫХ И СЛУЖЕБНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОРАБЛЕЙ ВМФ

П. А. Зубков, канд. техн. наук, ген. директор

ООО «Морские комплексные системы»,

О. В. Захарова, ген. директор

ООО «Лучшие Русские Проекты»,

контакт. тел. (812) 368 3951, +7 (964) 330 3805

пература) выглядит синеватым. Каждый тип света меняет наше восприятие цвета:

- теплое освещение смягчает яркие краски, делая их теплее и приятнее для взгляда;
- холодное освещение подчеркивает контрасты и добавляет глубины изображениям.

Контрастность. Высокий контраст облегчает распознавание формы и структуры предмета, тогда как низкий контраст размывает границы и усложняет восприятие.

Психологический фактор. Цвета вызывают определенные эмоции и ассоциации. Красный ассоциируется с энергией и опасностью, зеленый – с природой и покоем, синий – с прохладой и доверием. Следовательно, правильный выбор освещения позволяет подчеркнуть нужные эмоциональные акценты в интерьере.

Качество освещения сильно влияет на циркадные ритмы. Ночью недостаточная освещенность затрудняет засыпание, днем чрезмерная нагрузка ведет к быстрому утомлению. Исходя из указанных эффектов, эргономика освещения играет ключевую роль в поддержании здоровья и боеспособности экипажа, что особенно важно в условиях длительных морских походов и ограниченного доступа к естественному свету [3].

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ОСВЕЩЕНИЯ НА ЦВЕТОВОСПРИЯТИЕ ЧЕЛОВЕКА

Световые волны различной длины воспринимаются человеком по-разному.

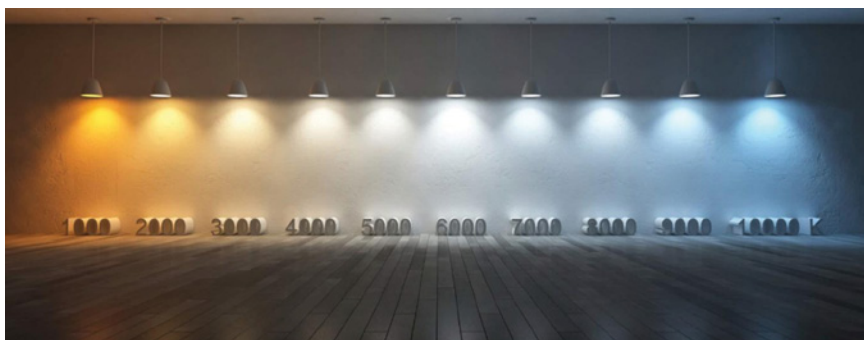


Рис. 1 Цветовая температура света. Чем выше значение цветовой температуры, тем цвет ближе к синему

Наиболее благоприятны для восприятия белый и желтый цвета спектра, создающие ощущения тепла и комфорта. Контрасты оттенков усиливают детализацию объектов, облегчая выполнение задач. В жилых помещениях используются осветительные приборы с разной цветовой температурой света, которые измеряются в Кельвинах:

- 2700 К, или температура «лампочки Ильича», – это теплый свет, расслабляющий и уютный.
- 3000 К – наиболее оптимальная температура для жилых помещений, комфортный нейтральный теплый свет.
- 4000 К – свет уже холоднее, обычно он используется в зонах, где необходимы сосредоточение и зрительная работа, например, на рабочих местах. Холодный свет психологически собирает.

Важной особенностью является влияние температуры света на цвет отделки и предметов в помещении, поэтому смешивание цветовых температур от приборов разных типов может вызвать впечатление хаоса. Это может быть уместно только в тех случаях, когда есть веская причина для использования разных температур: например, в каюте основное освещение может быть теплым, а рабочее освещение, над столом, которое включается для комфортной работы, – с более холодным светом (рис. 1).

Указанное выше спектральное распределение излучения влияет на четкость восприятия форм и цветов предметов. Например, белые и голубые оттен-

ки усиливают концентрацию внимания, стимулируют активность и бодрость, в то время как оранжевые и красные улучшают эмоциональное состояние и снижают стресс (рис. 2).

Следующей особенностью является создание сценариев освещения, в которых большое значение имеет применение различных значений цветовых температур в одном помещении, особенно в каютах без естественного освещения, а также использование специализированного освещения в ночное время суток («красный режим», «ночной режим»), снижающего воздействие на сетчатку глаза и сохраняющего ночное зрение (рис. 3).

Другой важной особенностью, помимо цветовой температуры, на восприятие цвета предмета влияет индекс цветопередачи [4].

Индекс цветопередачи показывает, насколько хорошо источник освещения передает естественные цвета предметов, которые он освещает. Он обозначается как CRI – Color Rendering Index. Ra – общий индекс передачи цвета согласно стандарту CIE. Это среднее значение для восьми стандартных тестовых цветов (TCS01 – TCS08), результат расчета стандарта CRI, разработанного Международной комиссией по освещению (CIE)

[5]. Дополнительно существуют индексы Ri (R1 – R14), которые оценивают цветопередачу цветов, не вошедших в основную тестовую палитру. Их используют реже, но они полезны для специфических применений, где важна точность восприятия оттенков. Так, R9 важен для передачи красного цвета. Его значения выше 50 считается хорошим.

Именно из-за неверного подбора или просто невнимания к индексам цветопередачи часто обнуляются результаты отделки помещений. Освещение просто нивелирует естественный цвет материалов: дорогие отделочные материалы смотрятся посредственно, фигурные элементы на мебели выглядят плоскими, текстуры теряются (рис. 3).

Источники света с низким уровнем цветопередачи заметно искажают реальный цветовой спектр. Поэтому, например, внешнее освещение с оранжевым свечением и очень низким индексом цветопередачи как бы ярко не светило, людей видно плохо, любая одежда, даже контрастная, выглядит желтовато-серой.

Один из методов измерения цветопередачи представлен ниже. Он основан на измерении того, насколько смещаются (изменяются) восемь стандартных тестовых цветов (R1–R8) при освеще-

нии тестируемым источником по сравнению с эталонным. Ra – среднее арифметическое значений цветопередачи для этих восьми цветов:

$$Ra = (R1 + R2 + \dots + R8)/8.$$

Ra принимает значения от 0 до 100. Чем ближе Ra к 100, тем точнее источник света передает цвета объектов по сравнению с эталоном:

Ra = 100 – идеальная цветопередача (эталон);

Ra > 90 – отличная цветопередача (применяется там, где важна точность цветов: машинные отделения, служебные помещения (боевые посты), госпиталь, музеи, полиграфия, магазины);

Ra = 80–90 – очень хорошая цветопередача (подходит для большинства жилых и рабочих помещений);

Ra = 70–80 – хорошая цветопередача (приемлема для подсобных помещений, уличного освещения, где точность не критична);

Ra < 70 – плохая цветопередача (цвета будут выглядеть неестественно и тускло).

Основные характеристики цветопередачи наиболее распространенных источников света представлены в табл. 1, влияние индекса цветопередачи при одной и той же цветовой температуре на восприятие показано на рис. 4.

CRI и Ra – важные инструменты для оценки цветопередачи источников света. Понимание их значений и ограничений позволяет сделать осознанный выбор осветительного оборудования, обеспечивающего реалистичное восприятие цветовых оттенков. При выборе рекомендуется не ограничиваться только значением Ra, а также обращать внимание на менее распространенные индексы R9 и другие значения Ri.

Специалисты ООО «МКС» используют различные типы источников света в своих проектах при выборе освещения для конкретных целей с учетом показателей индекса цветопередачи.

ОЦЕНКА ОСВЕЩЕННОСТИ

Эффективная оценка освещенности – решающий этап проектирования освещения. Она включает в себя не только предварительный расчет, но и измерение уровней освещенности в разных точках помещения. Используются люксметры и специальные программы расчета. Измерение проводят на уровне пола, рабочего стола и вертикальных поверхностей стен. Полученные значения сравниваются с установленными нормами и рекомендациями.

Оценка освещенности должна проводиться в разных условиях, в том числе при изменении уровня естественного света, так как корабли могут находиться в различных климатических зонах и под разными углами воздействия сол-

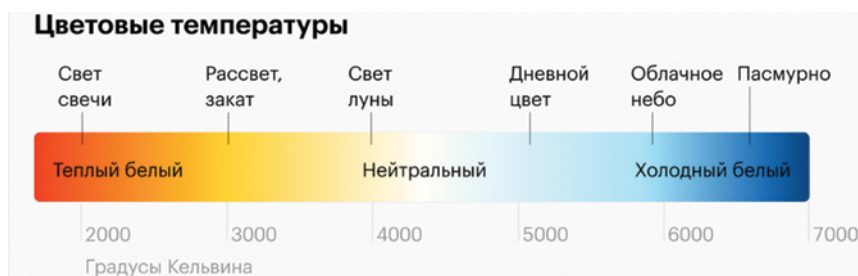


Рис 2. Пример спектрального распределения излучения

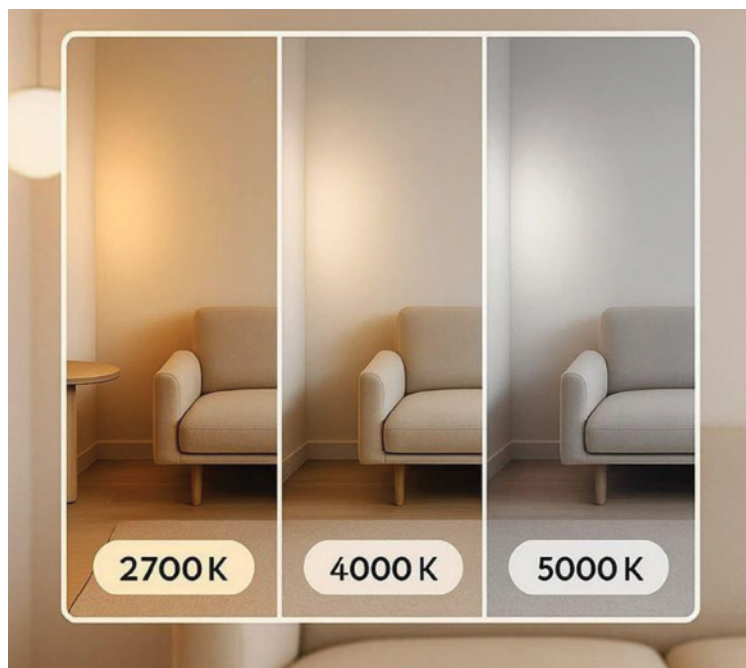


Рис 3. Пример восприятия одного и того же предмета при разных значениях цветовых температур

Индекс цветопередачи CRI

При одной и той же цветовой температуре разные индексы цветопередачи дают разные оттенки



Рис 4. Пример разных значений индекса цветопередачи при одинаковой цветовой температуре

Таблица 1

CRI различных источников света

Лампы	CRI различных источников света
Накаливания	Подходят для передачи цветов с высокой точностью, близкой к показателям солнечного света. CRI = 90–100 приближается к максимальному значению на шкале, что делает лампы хорошими для передачи истинных оттенков
Галогенные	В большинстве случаев CRI = 90 и выше. Эти лампы обеспечивают высокую цветопередачу при большем световом потоке по сравнению с лампами накаливания
Люминесцентные	Имеют разные значения CRI в зависимости от типа люминофора. Например, трехкомпонентный люминофор обеспечивает 80Ra и выше, пятикомпонентный – 90Ra. Бюджетные варианты могут иметь индекс ниже 80Ra
Светодиодные	CRI = 70–90 и выше у лучших моделей. Светодиоды, смешивающие красные, зеленые и синие спектры света, обеспечивают лучшее качество света по сравнению с галогенными лампами и лампами накаливания с высоким CRI
Натриевые	CRI = 25Ra, что ограничивает передачу цвета и искажает оттенки предметов. Они редко используются в помещениях из-за низкой цветопередачи
Дуговые ртутные	CRI = 45–60, это низкий показатель, схожий с показателем натриевых ламп, они часто используются в теплицах

нечных лучей. Дополнительно оценивают однородность освещения, определяющую равномерность распространения света по всей зоне. Критерии оценки зависят от назначения помещения и характера выполняемой деятельности. Регулярная оценка освещенности помогает выявить недостатки системы освещения и своевременно устранить проблемы, возникающие в процессе эксплуатации корабля.

СТАНДАРТЫ ОСВЕЩЕННОСТИ

Наиболее распространенные стандарты освещенности для ключевых помещений на кораблях приведены ниже:

Российские нормативы:

- ГОСТ Р 54984–2012 «Воздушно-космическая техника. Требования к освещению внутренних помещений пилотируемых космических аппаратов». Хотя этот документ ориентирован на авиационно-космические объекты, некоторые положения применяются и к кораблям ВМФ.
- Санитарные нормы и правила (СанПиН) регулируют общие принципы гигиены и освещенности в закрытых помещениях, используемых людьми длительно или кратковременно.
- Международные нормативы: Международная морская организация (ИМО) установила ряд обя-

зательных стандартов для освещенности на палубах и внутренних помещениях кораблей, поскольку военно-морские суда нередко выполняют совместные операции международного флота.

СТАНДАРТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ПОМЕЩЕНИЙ НА КОРАБЛЯХ

Комбинированные, пост наблюдения (ходовая рубка): минимальная освещенность должна составлять 300 лк* – это уровень освещенности поверхности, при котором световой поток, падающий на 1 м² площади, равен 300 люменам.

Помещения отдыха экипажа (жилые каюты, столовые команды): рекомендуется поддерживать уровень освещенности порядка 150–200 лк.

Машинные отделения: рекомендовано держать минимальный уровень освещенности 200 лк.

Коридоры и проходы: рекомендуется обеспечивать минимум 100 лк.

Медицинские кабинеты и операционные: требуются повышенные показатели освещенности, начиная от 500 лк.

*Люкс (лк) – единица измерения освещенности, 1 люкс равен освещенности поверхности площадью 1 м² при световом потоке, равном 1 люмену.

Эти нормы освещенности разработаны с учетом специфики морского дела и длительности нахождения экипажа на борту, где недостаток освещения или избыток ярких лучей могут вызвать ухудшение зрения, усталость и потерю концентрации. Однако каждый корабль может иметь особые помещения и устройства, нуждающиеся в индивидуальном подходе к освещению. Именно поэтому разработка проектов освещения ведется отдельно для каждого класса и типа кораблей, учитывая профиль их эксплуатации и действующие нормативные документы.

Стандарт освещенности для жилых и служебных помещений на кораблях действительно варьируется в зависимости от продолжительности нахождения экипажа на борту, которая влияет на характер нагрузок, испытываемых организмом моряков, и определяет подходы к организации освещения. Рассмотрим основные категории продолжительного присутствия экипажа и соответствующие им стандарты освещенности.

Краткосрочные выходы в море (до одной-двух недель). Для коротких выходов в море характерно наличие постоянных смен работы, поддержание нормального режима отдыха и минимальное воздействие монотонной обстановки. Стандарт освещенности здесь ориентируется преимущественно на общепринятые нормы жилого фонда:

- жилые помещения – 150–200 лк;
- рабочие помещения – 300–500 лк;
- проходы и лестницы – 100–150 лк.

Среднесрочные выходы в море (от двух недель до месяца). Средняя продолжительность плавания увеличивает длительность нахождения экипажа в замкнутых пространствах, что накладывает дополнительную нагрузку на психику и здоровье. При проектировании освещения рекомендуется усилить близкое к природному освещение, приближенное к солнечному спектру, чтобы минимизировать негативные эффекты изоляции:

- повышение средней освещенности до уровня 200–300 лк в жилых помещениях;
- увеличение доли рассеянного мягкого света в рабочем освещении;
- периодическое включение импульсного динамического освещения для повышения внимательности.

Длительные походы, боевая служба (более месяца). Продолжительное пребывание на борту подразумевает значительные изменения в восприятии реальности, развитие симптомов хронической усталости и нарушения биоритмов. Предлагается ввести специализированные режимы освещения, имитирующие суточные циклы:

Коэффициенты запаса и сроки чистки светильников

Помещения	Коэффициент запаса		Сроки чистки светильников, не реже
	Люминесцентные лампы/LED	Лампы накаливания	
Грузовые	2,0	1,7	1 раз в месяц
Котельные, камбузные, санитарно-бытовые и т. п.	1,8	1,5	6 раз в год
Энергетические отделения, мастерские, агрегатные, рубки, жилые и служебные помещения и т. п.	1,5	1,3	4 раза в год
Палубы	1,3	1,15	4 раа в год

- поддержание пониженной освещенности (около 100–150 лк) в ночное время для полноценного восстановления сил;
- утро – увеличение интенсивности освещения до 300–400 лк для стимуляции выработки кортизола;
- день – повышение до 500–700 лк для поддержки физической активности;
- вечер – постепенное уменьшение интенсивности до комфортной вечерней освещенности (~200 лк)

Таким образом, изменение стандартов освещенности обусловлено необходимостью компенсировать негативное воздействие длительной изоляции и сохранять высокий уровень готовности экипажа к выполнению боевых задач. Для этого используют различные сменные режимы освещенности (сценарии освещения).

ОСНОВНЫЕ СЦЕНАРИИ ОСВЕЩЕНИЯ, ХАРАКТЕРНЫЕ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

Режим дневного света: данный сценарий предназначен для создания максимальной видимости и удобства передвижения по каюте в течение дня. Включены все источники света, направленные на достижение достаточной освещенности и минимальной тени. Уровень освещенности составляет примерно 150–200 лк.

Рабочий режим обеспечивает локальное освещение рабочих зон, таких как письменный стол или полка для книг. Обычно реализуется посредством встроенных светильников или настольных ламп. Основной фоновый свет приглушается, сохраняя общий уровень освещенности порядка 100–150 лк.

Вечерний релаксирующий режим применяется в конце дня для подготовки ко сну. Свет мягкий, теплый и умеренный, предназначенный для снятия стресса и расслабления. Общая освещенность уменьшается до 50–100 лк, создаются приятные полутени.

Ночной дежурный режим или режим тихого часа означают минимальное освещение, необходимое для ориентации в темноте. Работают исключительно слабые индикаторы или небольшие светодиоды, создающие едва заметный световой поток. Освещенность снижается до 10–30 лк.

Красный режим используется в особых ситуациях, когда экипаж находится в состоянии боевой готовности. Все обычные светильники выключаются, заменяются красным мягким свечением, которое не ослепляет глаза и сохраняет ночное зрение.

Автоматический сценарий предусматривает смену сценариев в зависимости от времени суток или расписания.

Например, утреннее пробуждение сопровождается плавным увеличением яркости, имитируя естественный рассвет.

Преимущества реализации сценариев освещения:

- возможность индивидуального управления освещением каждой отдельной койки или зоны, что позволяет каждому члену экипажа настроить удобное освещение лично для себя;
- наличие датчиков движения и человека в помещении позволяет экономить электроэнергию и повышать удобство пользования;
- резервные автономные источники питания гарантируют бесперебойную работу освещения даже при аварии на корабле;

Реализация этих сценариев освещения в каютах личного состава способствует созданию комфортных условий проживания, укреплению дисциплины и сохранению работоспособности в любых обстоятельствах. На основе детального проработанных сценариев освещения проводятся расчеты освещенности в соответствии с нормативными документами (например, РД 31.08.30–87) и с учетом отражающих свойств поверхностей. Используются методы точечного расчета и методы расчета среднего коэффициента использования светового потока (CIE, 2018). Исходят из норм освещенности, установленных ГОСТ Р 54984–2012, СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03) [6, 7].

Расчет освещенности в помещениях можно выполнить с помощью следующих методов:

- *упрощенный метод (по удельной мощности)* подходит для быстрой оценки необходимой мощности, но не дает точных значений освещенности в люксах:

$$P = \rho \cdot S,$$

где P – суммарная мощность ламп, Вт; ρ – удельная мощность, Вт/м², для определенного помещения и типа ламп (эта величина варьируется, например, для жилых помещений с ярким светом это может быть 20 Вт/м²); S – площадь помещения, м².

- *точный метод (по световому потоку)* дает более точный результат, основанный на нормах освещенности:

$$\Phi = E \cdot S \cdot K_z,$$

где Φ – требуемый общий световой поток в люменах, лм; E – нормативная освещенность в люксах для данного типа помещения, лк; K_z – коэффициент запаса (табл. 2).

Пример расчета светового потока для жилых и служебных помещений.

Исходные данные: каюта площадью 6 м², нормативная освещенность – 200 лк, коэффициент запаса – 1,5:

$$\Phi = 200 \text{ лк} \times 6 \text{ м}^2 \times 1,5 = 1800 \text{ лм}.$$

Следовательно, все светильники в каюте должны в сумме давать не менее 1800 лм.

Пример расчета светильников, нужно яркое освещение (20 Вт/м²):

$$P = 20 \text{ Вт/м}^2 \times 23 \text{ м}^2 = 460 \text{ Вт}.$$

Общая мощность светильников должна составлять около 460 Вт.

ВЫВОДЫ

Проектирование освещения на кораблях представляет собой сложную задачу, требующую глубоких знаний в области инженерии, психологии и архитектуры. Освещение должно учитывать физические и психические потребности личного состава, а также уникальные условия эксплуатации на море.

Правильный выбор типов освещения, своевременные расчеты, внимание к цветовому восприятию и систематическая оценка освещенности помогут создать оптимально обстановку, способствующую созданию наиболее благоприятных условий для эффективного решения боевых задач экипажами кораблей ВМФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Boyce P. R. Human factors in lighting. – CRC press, 2014.
2. Волков А. А. Влияние освещения на психоэмоциональное состояние человека. – М.: Изд-во МГТУ, 2020.
3. Столяров И. Н. и др. Освещение и здоровье: современные аспекты. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2018.
4. Иванов П. С. Цветопередача в системах освещения. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2021.
5. International Lighting Vocabulary/CIE, 2018.
6. Круглов В. И. Расчет и проектирование осветительных установок. – Киев: Изд-во КПИ, 2019.
7. РД 31.08.30–87. Правила технической эксплуатации судового электрооборудования. ■

Теоретическое обоснование геометрических моделей поверхности объектов судостроения и судового машиностроения и построение этих моделей – существенная по сложности задача. Научным и практическим разработкам в этой области продолжает уделяться значительное внимание. Известны работы, посвященные исследованиям аналитического аппарата описания судовых корпусов [1, 2]. Значимое место занимают работы в области автоматизации геометрического моделирования: корпусов судов [3–5], элементов конструкции турбинных двигателей [6, 7], элементов судовых механизмов [8–12]. Проводятся исследования в области автоматизированной оптимизации геометрических моделей [13–15], в том числе с применением средств искусственного интеллекта [16].

Неослабевающая актуальность задач геометрического моделирования объектов судостроения и судового машиностроения, рост степени их автономности, значимость проблемы создания их цифровых двойников, потребность использования адекватных методов и средств искусственного интеллекта приводят к очевидному выводу о необходимости дальнейшего развития соответствующих подходов, инженерных решений и технологий.

АППАРАТ СЕТЕЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ НЕЧЕТКИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ

Учитывая значительный потенциал методов теории нечетких (fuzzy) множеств в области аппроксимации, в том

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ СУДОСТРОЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА СЕТЕЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ НЕЧЕТКИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ

А.Е. Васильев, д-р техн. наук, зав. кафедрой TCM,

Йе Мин Хтет, аспирант,

Д.Е. Кунгурцев, ассистент,

С.А. Токаренко, ассистент,

Хтут Шайн, аспирант,

СПбГМТУ,

контакт. тел. (812) 713 8405

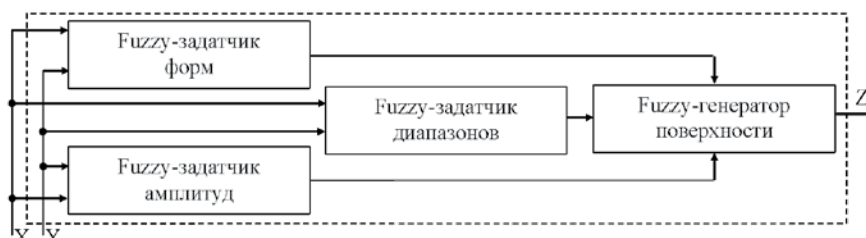


Рис. 1. Обобщенная структура нечеткой сети для задач аппроксимации 3D-поверхностей

числе аппроксимации вычислительно-сложных функций [17–21], предлагается использовать в задачах геометрического моделирования поверхностей объектов судостроения и судового машиностроения аппарат нечетких вычислений, который описывает функцию, задающую положение точки на трехмерной поверхности объекта, совокупностью логико-лингвистических правил.

В работах одного из соавторов данной статьи показано [22], что в значительном количестве практических случаев эффек-

тивно по совокупности достигаемых точностных характеристик аппроксимации, вычислительной ресурсоемкости нечеткого аппроксиматора и трудоемкости его разработки применять графовые композиции нечетких вычислителей – так называемые сети нечетких вычислителей, агрегирующие узлы нечеткой обработки информации («элементарные нечеткие вычислители», ЭНВ). При этом в элементарных нечетких вычислителях используются в общем случае функции принадлежности произвольного нелинейного

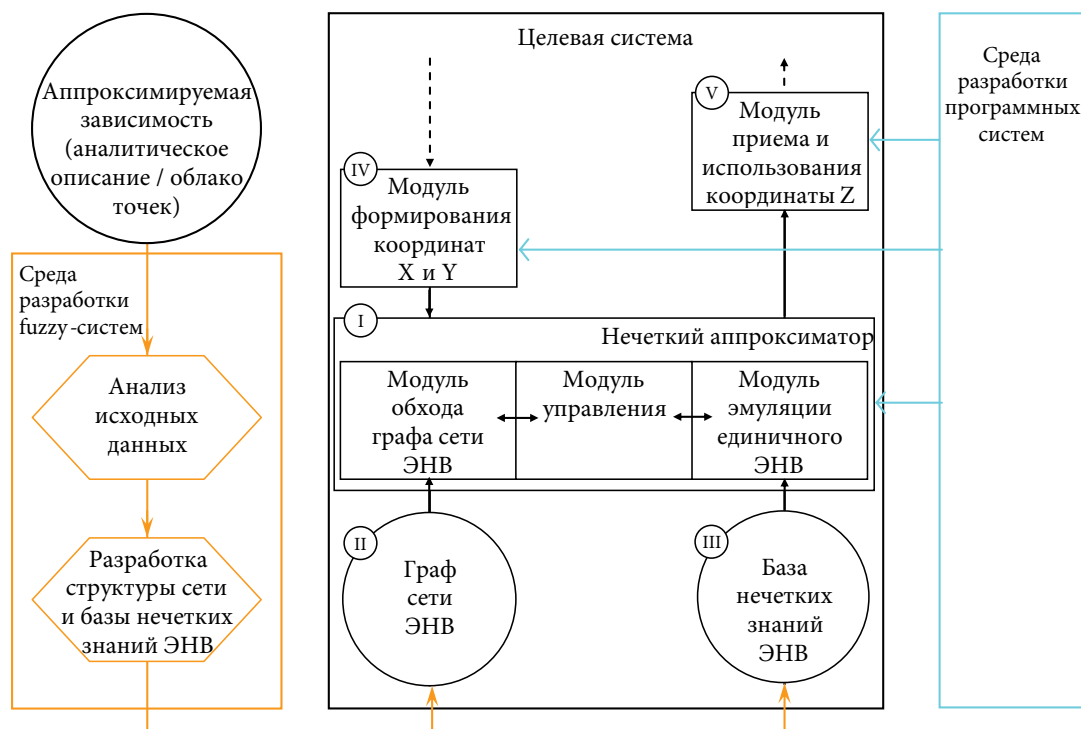


Рис. 2. Проектирование и применение аппроксиматора на основе сети ЭНВ

вида, задаваемые разработчиком. Таким образом разработчик может создавать аппроксимирующие системы, обладающие необходимыми свойствами, а база нечетких знаний элементарного вычислителя может быть создана оптимальной для решения конкретной задачи аппроксимации (рис. 1).

Последовательность действий при разработке таких аппроксиматоров и структурная организация целевой системы, использующей аппроксиматор на основе сети элементарных нечетких вычислителей, показаны на рис. 2. Отметим, что технически процесс функционирования сети нечетких вычислителей может быть реализован как программными, так и аппаратными средствами, в том числе на основе встраиваемых микроконтроллеров и программируемых логических интегральных схем.

ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕТЕЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ НЕЧЕТКИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ

Предлагаемый авторами способ организации системы моделирования геометрии поверхностей посредством нечетких аппроксиматоров с описанной выше структурой показан на рис. 3. В

среде MathCad подготовлены прототипы скриптовых решений для поддержки анализа аппроксимируемой функции, генерации данных для формирования базы нечетких знаний ЭНВ, генерации тестовых векторов координат X и Y , регистрации, визуализации и анализа результатов геометрического моделирования. Модуль обхода задаваемого разработчиком графа сети реализован на основе системы MathConnex, входящей в состав MathCad.

С помощью системы MathConnex в среду Fuzzy51 передаются значения входов очередного моделируемого ЭНВ, а получаемые в результате нечетких вычислений значения выходов ЭНВ возвращаются обратно в среду MathConnex и поступают на входы следующих ЭНВ согласно графовой модели сети.

Подобная организация взаимодействия двух вычислительных сред (MathCad и Fuzzy51) обеспечивает проектирование сети нечетких аппроксиматоров, ее моделирование и последующую оценку ее характеристик.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОГО АППРОКСИМАТОРА В ЗАДАЧЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проиллюстрируем применимость предлагаемого подхода к геометричес-

кому моделированию поверхностей на заведомо упрощенном в иллюстративных целях примере моделирования геометрии корпуса абстрактного судна. Исходными данными для построения сети нечетких вычислителей служат аналитические описания геометрии корпуса; в рассматриваемом примере для определенности будем основываться на данных из [23–24]. Для эффективного (с точки зрения сложности) построения сети нечетких аппроксиматоров представим корпус состоящим из трех частей (носовой, средней и кормовой), для каждой из которых зададим ее аналитическое описание (рис. 4).

Анализ исходных зависимостей показывает, что наиболее сложной структурой будет обладать сеть нечетких вычислителей, моделирующая носовую часть в связи с наибольшей сложностью используемого аналитического описания. Его декомпозиция требует четырех ЭНВ: генератора формы сечения на изменяемых интервалах значений, генератора этих интервалов, генератора вертикального смещения сечений и генератора изменяемого коэффициента масштабирования сечений. Сети, моделирующие среднюю и кормовую части корпуса, представляют собой композицию двух ЭНВ: генератора формы сечения и генератора

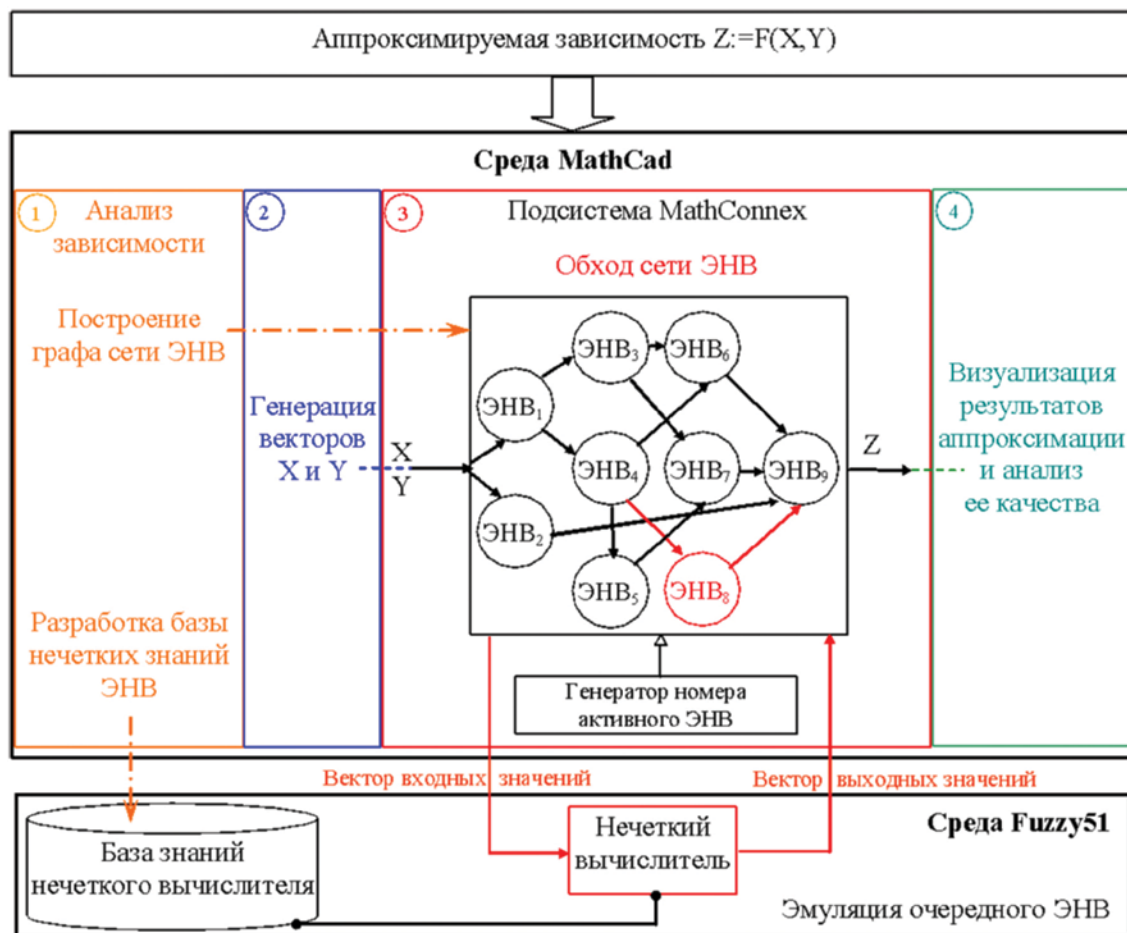


Рис. 3. Техническая реализация системы моделирования геометрии объекта

а)

$$Bw(y) = B \cdot \left[1 - \left(\frac{y - 254,5}{L} \right)^2 \right]$$

$$F(x, y) = 255 - D \cdot \left[\sqrt{1 - \left(\frac{x - 127,5}{\frac{Bw(y)}{2}} \right)^2} \right] \cdot (1 - e^{-0,0055 \cdot y})$$

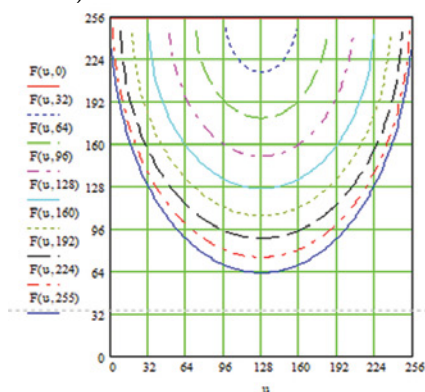
б)

$$F1(x, y) = 255 - D \cdot \left[\sqrt{1 - \left(\frac{x - 127,5}{\frac{B}{2}} \right)^2} \right] \times \left[1 - \left(\frac{y - 127,5}{L} \right)^2 \right]$$

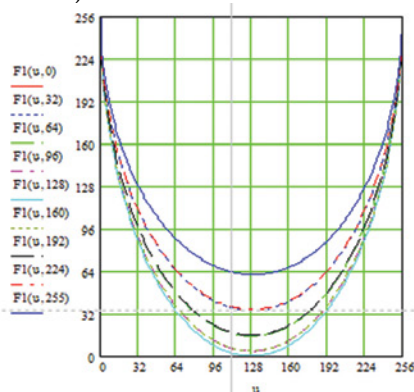
в)

$$F2(x, y) = 255 - 255 \cdot (1 - e^{-0,0055 \cdot y}) \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{x - 127,5}{\frac{B}{2}} \right)^2} \right]$$

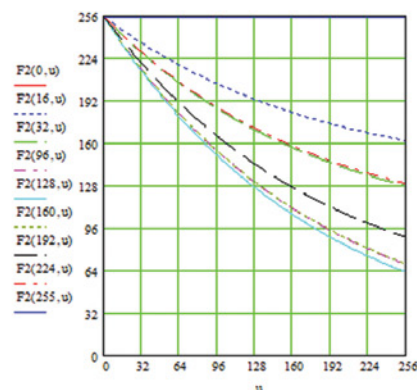
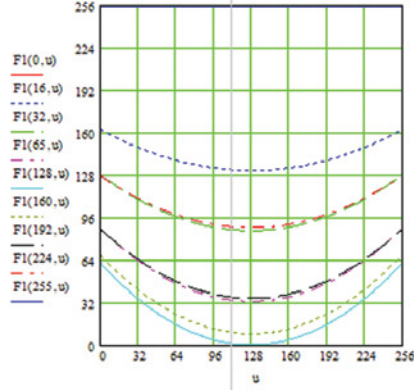
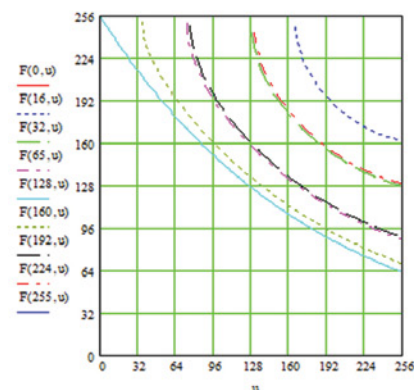
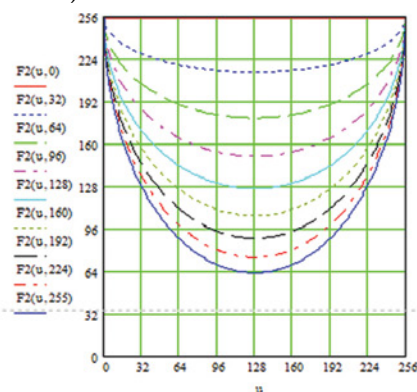
г)



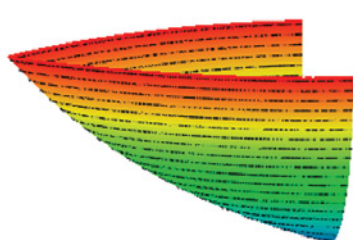
д)



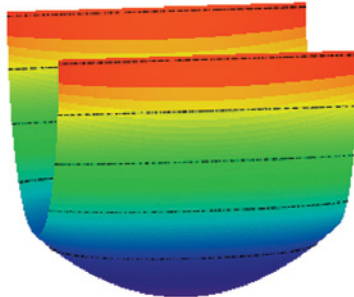
е)



ж)



з)



и)

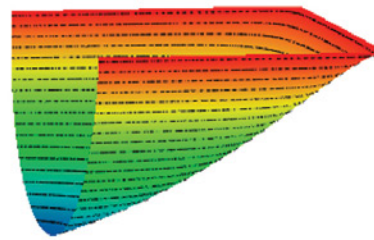


Рис. 4. Пример исходного описания геометрии корпуса абстрактного судна: аналитические выражения для носовой (а), средней (б) и кормовой (в) частей; графическое представление сечений носовой (г), средней (д) и кормовой (е) частей; 3D-интерпретация поверхности носовой (ж), средней (з) и кормовой (и) частей

изменяемого коэффициента масштабирования сечения. Генераторы форм сечений у них идентичны, а генераторы масштабных коэффициентов индивидуальны.

Результаты функционирования композиции всех трех сетей нечетких вычислителей показаны на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидными областями применения предлагаемого подхода представля-

ются задачи, требующие геометрического моделирования непосредственно на объекте (своего рода «in vivo»), т.е. моделирования, выполняемого в связи с обслуживанием физически существующего оборудования. Такое моделирование отличается от геометрического моделирования проектируемого объекта («in vitro»), которое выполняется в соответствующих системах автоматизации проектирования, в том числе и тем, что оно осуществляется в реальном

времени на аппаратуре встраиваемых (бортовых) вычислительных систем, имеющих принципиальные существенные системные ограничения по вычислительной производительности в сравнении с вычислительными системами общего назначения. Из этих особенностей проистекают требования к ресурсоэффективности такого моделирования. При этом принципиальной остается необходимость использования онтологического описания поверхнос-

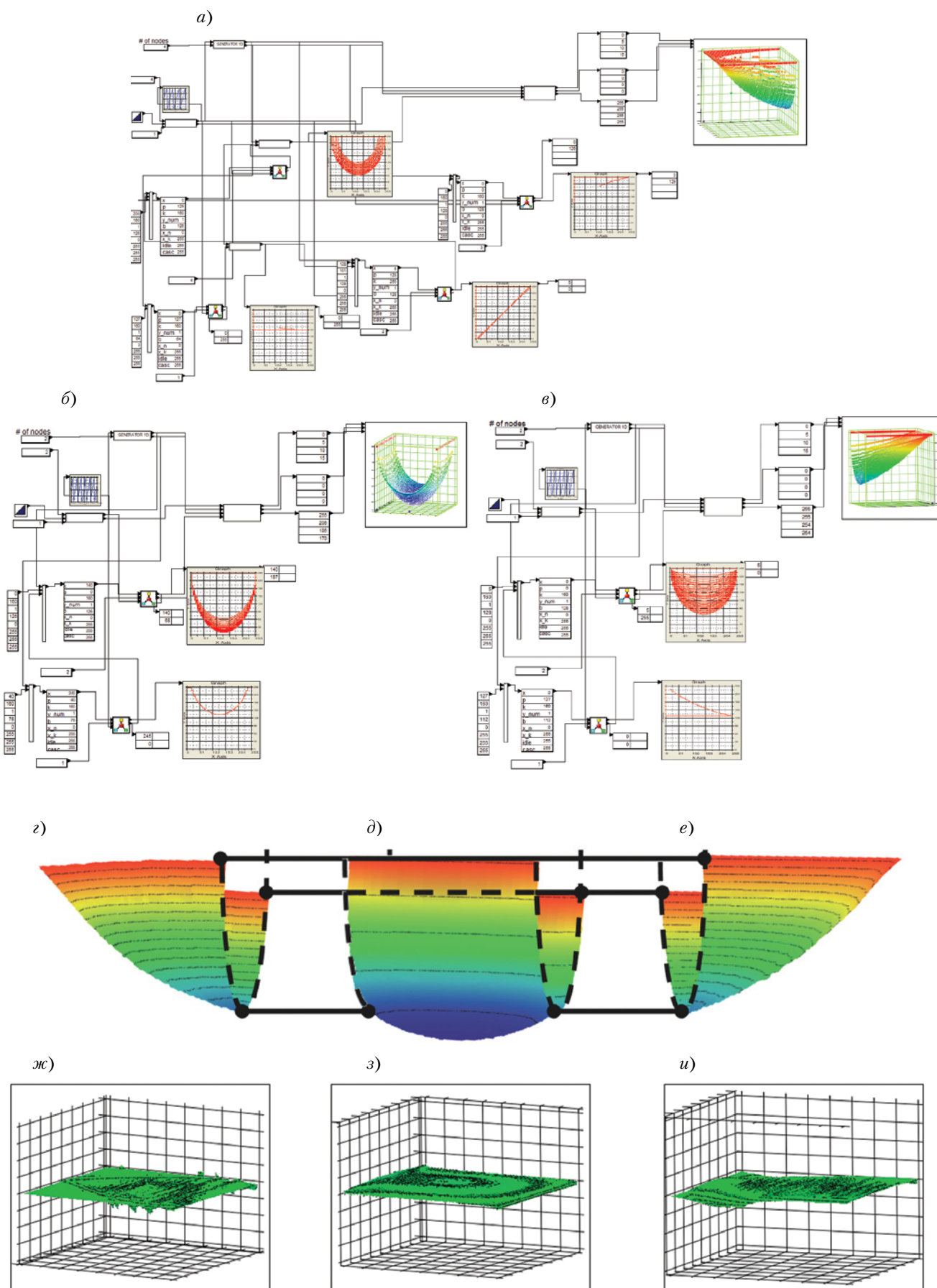


Рис. 5. Нечеткая аппроксимация геометрии корпуса судна: сетевые структуры для моделирования поверхности носовой (а), средней (б) и кормовой (в) частей; сгенерированные сетями нечетких вычислителей поверхности носовой (г), средней (д) и кормовой (е) частей; отклонение модельных поверхностей от аналитически заданных в носовой (ж), средней (з) и кормовой (и) частях

ти, геометрические свойства которой как единого целого подчиняются определенной закономерности (в отличие от фактологического описания поверхности набором не связанных между собой точек).

В подобных предметных областях лежат, в частности, задачи подводного инспектирования корпусов судов [25–26], при выполнении которых подводный аппарат должен находиться на определенном расстоянии от инспектируемой поверхности (исходная геометрия которой может быть неочевидна вследствие обрастаний биомассой, предшествующих деформаций и пр.), а также осуществлять позиционирование относительно определенных точек этой поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кривошапко С.Н., Иванов В.Н.* Алгебраические поверхности для рациональных судовых корпусов // *Технология машиностроения*. – 2022. – №3. – С.17–24.
2. *Пец Н.Г.* Построение обводов носовой оконечности судов ледового плавания аналитическими функциями // *Проблемы транспорта Дальнего Востока: доклады науч.-практ. конф.*, 2019. – Т.1. – С.87–90.
3. *Шоркина И.Н.* Автоматизация построения судовой поверхности по линиям теоретического чертежа. – Дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. – Н. Новгород: ГАСУ, 2024. – 155 с.
4. *Тряскин В.Н., Рюмин С.Н.* Реализация методов и алгоритмов геометрического и конструктивного моделирования в задачах параметрического проектирования конструкций корпуса судна // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2021. – №4-2(54). – С. 159–170.
5. *Рыченкова А.Ю., Клименко Е.С., Бородин Л.Н.* Геометрическое моделирование и оценка качества каркасной поверхности корпуса судна в САПР Компас-3D // *Научные проблемы водного транспорта*. – 2020. – №62. – С.81–90.
6. *Лавринов Д.С.* Программное обеспечение для сканирования, измерения геометрии, создания САД-моделей сложнопрофильных деталей и экспорта подготовленных данных для трехмерного моделирования. – Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2021668877. Оpubл. 22.11.2021// Бюлл. №12.
7. *Слободин А.С.* Программное обеспечение для измерения и генерации трехмерных моделей турбинных лопаток. – Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2021666422. Оpubл.14.10.2021№// Бюлл. №10.
8. *Славгородская А.В., Молоков К.А., Китаев М.В., Немкин Д.В.* Определение секториально-линейных геометрических характеристик лопасти гребного винта на основе компьютерных образов // *Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального ун-та*. – 2015. – №4(25). – С.103–137.
9. *Дарчиев Г.К., Пустошный А.В.* Особенности технологии проектирования гребных винтов транспортных судов ледового плавания // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2018. – №4(42). – С. 16–22.
10. *Маринич Н.В., Коваль А.А., Альбаев Д.А.* Программа для определения расчетных регламентированных геометрических характеристик лопастей гребных винтов, а также восстановления геометрических характеристик лопастей гребных винтов по результатам обмера. – Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2018664939. – Оpubл. 26.11.2018// Бюлл. №12.
11. Программа для обработки геометрических параметров гребных винтов // *Зиневич А.Н., Китаев М.В., Сузов О.Э., Чемезов И.А., Мамбетов Р.И.* – Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2020613545. – Оpubл. 18.03.2020// Бюлл. №3.
12. *Лустенков М.Е., Моисеенко А.Н.* Геометрический анализ и теоретическая оценка КПД плоско-конического зацепления сферической роликовой передачи // *Транспортное машиностроение*. – 2023. – №6(18). – С.32–42.
13. *Бугаев В.Г., Кашаев В.М., Китаев М.В.* Постановка и численное решение задачи оптимизации конструкций корпуса судна // *Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального ун-та*. – 2025. – №2(63). – С.38–50.
14. *Станков Б.Н., Печенюк А.В.* Оптимизация судовых обводов: новые возможности // *Судостроение*. – 2015. – №3(280). – С.15–9.
15. *Багриниц В.В., Коваль А.А., Маринич Н.В.* Оптимизация геометрии гребного винта подруливающего устройства для снижения периодических сил // *Тр. Крыловского гос. науч. центра*. – 2019. – №52. – С.67–72.
16. *Обдымко В.Е.* Нейронная сеть как инструмент оптимизации расчета корпуса судна // *Вестник Гос.морского ун-та им. адм.Ф.Ф.Ушакова*. – 2020. – №2(31). – С.9–13.
17. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление. – М.: Бином, 2013. – 798 с.
18. *Леготкина Т.С., Хижняков Ю.Н., Никулин В.С.* Исследование аппроксимационных нечетких моделей // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. – 2015. – №10. – С.56–61.
19. *Перфильева И.Г.* Аппроксимация непрерывных функций функциями, представимыми формулами нечеткой логики // *Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского*. – Серия: математическое моделирование и оптимальное управление. – 2000. – №1. – С.144–151.
20. *Шведов А.С.* Аппроксимация функций с помощью нейронных сетей и нечетких систем // *Проблемы управления*. – 2018. – №1. – С.21–29.
21. *Пюкке Г.А., Портнягин Н.Н., Горева Т.И.* Использование нечетких множеств при решении задач аппроксимации нелинейностей // *Вестник Камчатского гос. техн. ун-та*. – 2006. – №5. – С.90–97.
22. *Васильев А.Е.* Встраиваемые системы автоматики и вычислительной техники. Микроконтроллеры. – М.: Горячая линия-Телеком, 2018. – 590 с.
23. *Celebi S.M.* Computation of Transient Nonlinear Ship Waves Using an Adaptive Algorithm // *J. of Fluids and Structures*. – 2000. – Vol.14. – P.281–301.
24. *Perez F.L., Clemente J.A., Suarez J.A., Gonzalez J.M.* Parametric Generation, Modeling, and Fairing of Simple Hull Lines With the Use of Nonuniform Rational B-Spline Surfaces // *J. of Ship Research*. – 2008. – Vol.52. – №1. – P. 1–15.
25. *Бобков В.А., Морозов М.А., Кудряшов А.П., Инзарцев А.В.* Инспекция корпуса судна с использованием автономного подводного робота, оснащенного стереофотокамерой // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2023. – Т.24. – №4 – С.206–215.
26. *Гладкова О.И., Вельтищев В.В., Егоров С.А.* Концепция информационно-управляющей системы телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с комбинированными средствами движения для бездокового освидетельствования корпусов судов // *Изв. вузов. Северо-Кавказский регион*. – Серия: Технические науки. – 2020. – №3(207). – С.55–63. ■

Одним из важнейших факторов, влияющим на характеристики самоходного малогабаритного подводного аппарата (СМПА), является кавитация окружающей водной среды. Она влияет на качество работы гидроакустической системы (ГАС). Понимание природы и механизма кавитации важно при проектировании и эксплуатации всех современных СМПА.

Кавитация – это нарушение сплошности жидкости при механическом воздействии на нее или изменении условий устойчивого равновесия и преодоления при этом сил межмолекулярного сцепления, которые приводят к ее разрыву [1]. Условия возникновения кавитации могут быть разными, но физическая природа ее возникновения одна и та же.

Кавитация в жидкости как физическое явление может происходить в следующих случаях [1]:

- увеличение температуры воды и доведение до состояния испарения при изобарическом процессе;
- падение давления до значения давления насыщенных паров воды и доведение до состояния испарения при изотермическом процессе;
- нарушение сплошности воды при механическом воздействии, приводящим к ее разрыву.

Применительно к подводным аппаратам кавитация как физическое явление, связанное с процессом функционирования при движении (работе) его в воде, может наблюдаться [2]:

- на корпусе, когда давление в носовой и кормовой частях аппарата за счет увеличения скорости приближается к величине давления насыщенных паров воды P_d при данной температуре;
- на лопастях движителя пропульсивной системы при достижении числа оборотов рабочего колеса критического значения;
- как сопутствующий фактор при излучении акустической энергии антенной (гидроакустическим преобразователем) ГАС в определенных условиях. Это акустическая кавитация, которая оказывает существенное влияние на работу ГАС, снижая радиус ее реагирования в активном режиме и ускоряя износ элементов системы.

Для достижения максимальной дальности действия активных гидролокаторов конструкторы стремятся закладывать в расчеты возможно большую акустическую мощность, по крайней мере такую, чтобы минимальный различаемый эхосигнал наблюдался на фоне реверберации и собственных шумов СМПА. Однако попытка добиться этого наталкивается на возможность возникновения акустической кавитации.

Акустическая кавитация – это нарушение сплошности воды при механическом воздействии на нее в процессе излучения

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КАВИТАЦИИ МОРСКОЙ ВОДЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАБОТОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОИСКА

*Е.М. Кириллова, студентка,
А.П. Федотенков, канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование и технологии производства морских подводных аппаратов и роботов», СПбГМТУ,
контакт. тел. +7 (981) 782 3955*

акустической энергии антенной ГАС СМПА и превышении при этом допустимой величины удельной акустической мощности.

Явление кавитации в данном случае заключается в том, что в воде при больших растягивающих усилиях, создаваемых ГАС и превышающих силы сцепления между ее частицами, происходят местные разрывы с образованием пустот (каверн), наполненных растворенным в воде воздухом и парами воды. Иными словами, превышение порога кавитации над внешним гидростатическим давлением можно рассматривать как предел прочности морской воды [3].

Следовательно, при работе мощных антенн ГАС на излучающей поверхности (обтекатель) могут возникать разрежения (в отрицательные полупериоды) такого размера, что вызовут разрывы в воде, т. е. образование кавитационных пузырьков. Смесь воды с этими пузырьками, обладая значительно меньшим волновым сопротивлением, чем сопротивление воды, приведет к резкому увеличению амплитуды колебаний преобразователя и нарушению режима его работы. Насыщенный кавитационными полостями слой воды, прилегающий к поверхности излучателя (обтекатель), препятствует излучению акустической энергии в среду, и акустическое давление в поле резко уменьшается (при этом акустическая энергия рассеивается в широком объеме).

В отсутствии кавитации с увеличением электрического напряжения на входе излучателя акустическое давление возрастает пропорционально величине напряжения, а с появлением кавитации рост акустического давления замедляется. Дальнейшее увеличение подводимой к излучателю электрической мощности не вызывает увеличения акустической мощности. При развитой (значительной) кавитации излучаемая мощность резко уменьшается за счет потерь на поглощение и рассеяние кавитационными пузырьками, а возрастание механических напряжений в активных элементах преобразователя может привести к его разрушению [3].

При сильной кавитации возникает эрозия (механическое разрушение) излучающей поверхности антенны ГАС, особенно при длительной эксплуатации, а также искажение диаграммы направленности.

По указанным причинам при работе ГАС следует предотвращать возможность появления кавитации, ограничивая мощность излучения значением, соответствующим порогу возникновения кавитации.

Порог кавитации характеризуется величиной удельной акустической мощности – интенсивности звуковой волны, при которой кавитация еще не наступает.

Таким образом, акустическая кавитация – это следствие прохождения звуковой волны большой интенсивности, когда излучается такая мощность, при которой амплитуда полуволны разрежения равна или превышает силы сцепления молекул воды. В этом случае происходит разрыв жидкости и образующиеся при этом вблизи излучателя кавитационные пузырьки (каверны) поглощают мощность излучаемого импульса. Во время полупериода сжатия полости резко захлопываются, порождая сильные гидродинамические возмущения и интенсивное акустическое излучение (кавитационный шум), вызывающее разрушение поверхности твердых тел, граничащих с кавитирующей жидкостью [4].

Предельным значением удельной мощности $W_{уд}$ называется мощность W_a , снимаемая с единицы площади излучающей поверхности S антенны ГАС, при превышении которой наступает сильно развитая кавитация:

$$W_{уд} = \frac{W_a}{S}, \text{ Вт/см}^2. \quad (1)$$

Допустимый порог кавитации зависит от гидростатического давления (глубины погружения) и длительности зондирующего импульса. Для практических целей порог определяется выражением [1, 2]

$$W_{уд} = k(1+0,1H)^2, \text{ Вт/см}^2, \quad (2)$$

где k – коэффициент пропорциональности, определяющий функциональную зависимость допустимой излучающей мощности от длительности импульса; H – глубина хода (поиска) в режиме излучения акустической энергии, м.

Величины коэффициента k в зависимости от длительности импульса $\tau_{и}$ представлены в таблице [1, 2].

Возникновение акустической кавитации морской воды на антенне (обтекателе) ГАС в активном режиме работы обусловлено превышением удельной мощности излучения $W_{уд}$ некоего допустимого зна-

Зависимость коэффициента k от длительности импульса $\tau_{\text{и}}$

$\tau_{\text{и}}$, мс	100	50	20	10	5	2
k	0,5	2	5	7	10	16

чения, зависящего от величины акустической мощности W_a , площади излучающей поверхности антенны S , длительности $\tau_{\text{и}}$ и частотной полосы зондирующего сигнала, а также глубины хода СМПА.

Следствием превышения допустимого порога кавитации морской воды при активной работе ГАС СМПА является резкое и значительное сокращение величины ее дальности обнаружения (радиуса реагирования) в активном режиме работы любого подводного аппарата [2], а также повышенная вероятность разрушения ГАС прежде всего на основе пьезоэлектрических преобразователей [5].

Порог кавитации излучателя можно поднять и соответственно увеличить излучаемую мощность следующим путем:

- использованием более высокой рабочей частоты [1 – 3];
- использованием сложных широко-

полосных зондирующих сигналов [3];

- увеличением площади излучаемой поверхности антенны за счет увеличения диаметра СМПА или формирования плоского головного обвода (обтекателя ГАС) [2];

- уменьшением длительности зондирующего импульса [2, 3, 5];
- увеличением глубины (гидростатического давления) хода СМПА [2, 3].

Таким образом, учет кавитации важен при разработке и эксплуатации самоходных малогабаритных подводных аппаратов. Это физическое явление негативно влияет на работу ГАС, ухудшая ее производительность, создавая избыточный шум и ускоряя износ материала. Знание осо-

бенностей и условий возникновения кавитации помогает оптимизировать работу гидроакустической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белозёров И. И. Техническая физика. – СПб.: ВМИ ВУНЦ ВМФ «ВМА», 2017.
2. Федотенков А. П. Торпедное оружие. – Ч. 2. – СПб.: ВМИ ВУНЦ ВМФ «ВМА», 2019.
3. Урик Дж. Роберт. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978.
4. Основы динамики торпед/ Скобов Д. П., Юфимович Б. Б., Соловьёв В. И., Савельев А. Г., Розенаассер Е. Н., Мотыльков Л. А. – Кн. 1 и 2. – Л.: Судпромгиз, 1963.
5. Тюрин А. М., Сташкевич А. П., Таранов Э. С. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1966. ■

Борис Петрович Ионов – ученый-кораблестроитель, один из ведущих отечественных экспертов в области ледоколостроения, профессор, доктор технических наук, Почетный полярик – родился в 26.06. 1952 г. в Ленинграде. После окончания школы поступил в Ленинградский кораблестроительный институт (ЛКИ), а после по распределению пришел на работу в Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. За время работы в ААНИИ прошел путь от инженера до старшего научного сотрудника. Принял участие в работе более 20 арктических экспедиций, среди которых – поход атомного ледокола «Арктика» к Северному полюсу, высокоширотный рейс атомохода «Сибирь» совместно с транспортным судном «Капитан Мышевский» из Мурманска к Берингову проливу, первая научная экспедиция на атомоходе «Сибирь» в приполюсном районе, зимовка на дрейфующей станции «Северный полюс-29», Международная арктическая экспедиция на немецком ледоколе «Polarstern» и многие другие. В 1977 г. он был в составе научной экспедиции на атомном ледоколе «Арктика» к Северному полюсу. В том же году поступил в заочную аспирантуру на кафедре теории корабля ЛКИ, а в 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности теория корабля.

Начиная с 1989 г. избирался членом Международного комитета опытовых бассейнов, в котором представлял сначала СССР, а потом Россию. В 1996 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям теории корабля и проектирование судов. В 1997–1998 учебном году – профессор кафедры теории корабля Санкт-Петербургского государственного морского технического университета.

ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА Б. П. ИОНОВА

Кафедра проектирования судов СПбГМТУ,
контакт. тел. (812) 494 0969



В 1999 г. Б. П. Ионов поступил на работу на судостроительный завод «Северная верфь» на должность начальника отдела маркетинга. В 2008 г. перешел на работу в АО «Объединенная судостроительная корпорация». В 2017 г. стал заместителем главного инженера АО «ЦКБ «ОСК-Айсберг».

Распоряжением Президиума Российской академии наук в 2016 г. назначен экспертом РАН.

С 2001 г. Б. П. Ионов был членом диссертационного совета при Нижегородском государственном техническом университете.

В 2020 г. назначен руководителем секции «Судовое машиностроение» научно-технического совета АО «ОСК».

Борис Петрович – автор трех монографий: «Ледовое сопротивление и его составляющие» (1988), «Ледовая ходкость судов» в соавторстве с Е. М. Грамузовым (2001), «Проектирование ледоколов» в соавторстве с В. А. Зуевым и Е. М. Грамузовым (2013), многих статей в журна-

лах «Судостроение» и «Морской вестник». Его монографии по ледовой ходкости судов переведены на другие языки.

Борис Петрович – участник многочисленных международных научно-практических конференций по ледовой тематике как приглашенный докладчик, неоднократно выступал с лекциями в зарубежных научных центрах, занимающихся вопросами ледоколостроения.

За комплекс работ в области ледовых качеств судов удостоен премии Ленинского комсомола и премии Stenly Grey (Великобритания). Награжден медалью «За трудовое отличие» и знаком «Почетный полярик».

С 2014 г. преподавал на кафедре проектирования судов СПбГМТУ.

Вся жизнь Бориса Петровича была связана с Арктикой, арктическим флотом. Его первый поход на Северный полюс в 1977 г. на ледоколе «Арктика» он совершил, когда ему было 25 лет. Тот легендарный поход Борис Петрович сравнил с первым покорением космоса. И свой «космос» он покорял еще не раз, а спустя 40 лет после своего первого похода на Северный полюс Борис Петрович принял участие в уникальном рейсе на атомном ледоколе «50 лет Победы» и прошел до самой северной точки Земли точно такой же маршрут, как и в 1977 г.

30 октября 2025 г. Бориса Петровича Ионova не стало. Память о нем как об ученом и просто как о доброжелательном, обаятельном человеке сохраняют ученики и коллеги, а его работы по теории проектирования ледоколов и судов ледового плавания будут востребованы еще многие годы. ■

ФРЕГАТЫ

053 H3 (Китай)/F-22P (Пакистан) (рис. 9). Совместный проект Пакистана и КНР. Основой послужил китайский проект 053 H3. Согласно контракту, который был заключен в 2005 г., первые три фрегата серии должны были быть построены в Шанхае, а четвертый – в Карачи на верфи Karachi Shipyard & Engineering Works. Головной фрегат «Zulfiquar» был спущен на воду в 2008 г. Вооружение кораблей полностью состоит из комплексов китайского производства. К настоящему времени проект полностью завершен, все четыре корабля в строю ВМС Пакистана.

Данные о модернизации верфи Karachi Shipyard & Engineering Works отсутствуют.

Значения принятых критериев для данного проекта: T – 2005–2013 гг.; C – 750 млн. долл.; N – 4; D – 85; L – 4.

SIGMA 10514 (Нидерланды) / «SIGMA 10514 Martadinata» (Индонезия) (рис. 10).

5 июня 2012 г. министерство обороны Индонезии и голландская судостроительная компания Damen Schelde Naval Shipbuilding (DSNS) подписали контракт на поставку ВМС Индонезии головного 2400-тонного легкого фрегата УРО «SIGMA 10514». В Индонезии он получил обозначение Perusak Kawal Rudal – ракетный эскортный эсминец, имя – «Raden Eddy Martadinata». Стоимость постройки головного корабля оценивается в 220 млн. долл.

Следует отметить что предварительное соглашение о постройке фрегатов было подписано Индонезией и DSNS в августе 2010 г., однако программа длительное время не реализовывалась из-за отсутствия финансовых средств. 14 февраля 2013 г. стороны подписали соглашение на строительство второго фрегата «I Gusti Ngurah Rai».

Резка стали для обоих кораблей началась в 2014 г., введены в эксплуатацию в 2017 и 2018 гг.

Контракт предусматривал передачу индонезийской компании PT PAL технологий, позволяющих строить отдельные секции кораблей. В итоге часть секций строилась на DSNS в голландском Флиссингене, часть – на верфи Damen Romania в Галаце (Румыния), а часть – на PT PAL Indonesia в Сурабае, где и осуществлялась финальная сборка корпуса. Вначале планировалось построить 20 фрегатов, затем четыре, после ограничились постройкой двух кораблей. Программа завершена.

Значения принятых критериев для данного проекта: T – 2010–2018 гг.; C – ок. 380 млн. долл.; N – 2 (2); D – 60; L – 3.

МИРОВОЙ ОПЫТ ИНДУСТРИАЛЬНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА В СФЕРЕ СТРОИТЕЛЬСТВА БОЕВЫХ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ КЛАССОВ ОРВ, КОРВЕТ И ФРЕГАТ ЧАСТЬ 2*

А. В. Архипов, д-р техн. наук, проф., заместитель ген. директора АО «Северное ПКБ» по надводному кораблестроению – ген. конструктор надводных кораблей океанской зоны и их вооружения,

В. А. Евсеев, д-р техн. наук, гл. эксперт Департамента ВТС АО «ОСК»,
Д. В. Курочкин, начальник отдела ВЭД Северного ПКБ «ОСК»,
контакт. тел. (812) 702 3005



Рис. 9. Фрегат «Zulfiquar» ВМС Пакистана



Рис. 10. Фрегат «Raden Eddy Martadinata» ВМС Индонезии

SIGMA 10514 (Нидерланды) / «POLA 101 Reformador» (Мексика) (рис. 11). 10 апреля 2017 г. морское министерство Мексики объявило о заключении контракта с группой Damen на строительство одного корабля типа SIGMA 10514. Согласно

сообщениям мексиканских СМИ, корабль был заказан в рамках выделенных еще в 2015 г. для этой цели ассигнований в 5 783 804 454 млрд. мексиканских песо (около 355 млн. долл.). По последним данным, общая стоимость строительства корабля состави-

* Продолжение. Начало см. в «Морской вестник», 2025, №3(95)

ла 337 млн. евро, а вся стоимость программы – 390,92 млн. евро, включая затраты на передачу технологий. Но, судя по данным из открытых источников, в эти цифры не входит стоимость закупаемого отдельно вооружения.

Официальная закладка фрегата состоялась 17 августа 2017 г. на судостроительном предприятии Damen Schelde Naval Shipbuilding (DSNS) группы Damen во Флиссингене (Нидерланды). Там были изготовлены две корпусные секции корабля (центральная секция корпуса и основной блок надстройки), которые затем были перевезены в Мексику на военно-морскую верфь ASTIMAR-20 в Салина-Круз. Мексиканская верфь изготовила остальные четыре секции корпуса и осуществила сборку корабля и монтаж основного оборудования.

Головной (и единственный) корабль «Reformador» был выведен из сухого строительного дока верфи в Салина-Круз 23 ноября 2018 г. и начал заводские ходовые испытания 18 ноября 2019 г. Вошел в состав флота в 2020 г. Позже был переименован в «Benito Juarez».

Корабль официально классифицируется в ВМС Мексики как «океанский патрульный корабль большой дальности» (Patrulla Oceánica de Largo Alcance – POLA). При этом он близок по типу двум фрегатам того же проекта, построенным при содействии Damen в Индонезии.

Первоначально ВМС Мексики планировали иметь шесть кораблей POLA, из которых пять по планам должны быть введены в строй уже к 2024 г. с постройкой на ASTIMAR-20. Однако во время церемонии спуска фрегата на воду руководители ВМС Мексики заявили о планах иметь восемь кораблей данного проекта (по четыре в составе Атлантического и Тихоокеанского флотов) с постройкой уже в течение 20 лет, «в зависимости от уровня финансирования». Вместе с тем никакие контракты с Damen на следующие корабли этого типа так и не были заключены.

Следует отметить, что ВМС Мексики имеют длительный опыт успешного сотрудничества с Группой Damen, ведя по ее проектам и при ее содействии строительство больших сторожевых катеров проекта Damen Stan Patrol 4207 (тип «Tenochtitlan») и вспомогательных судов.

Для ВМС Мексики ввод в строй фрегата проекта SIGMA 10514 – историческое событие, поскольку «Reformador» стал первым мексиканским крупным боевым кораблем новой постройки за более чем 80 лет – с первой половины 1930-х гг., когда



Рис. 11. Фрегат «Reformador» ВМС Мексики

с Испанией были заказаны шесть канонерских лодок-транспортёров. После этого все значительные надводные боевые корабли ВМС Мексики получали в порядке помощи из состава ВМС США.

Оснащение данного фрегата ПКР «Harpoon Block II» также станет прорывным и усилит боевые возможности ВМС Мексики, которые до настоящего времени имели противокорабельное ракетное оружие только в виде израильских ПКР Gabriel Mk 2 в составе вооружения двух приобретенных в 2004 г. из состава израильского флота больших ракетных катеров типа Saar 4.5 (тип Hurgacan), один из которых в мексиканском флоте уже списан в 2016 г.

В январе 2018 г. Агентство министерства обороны США по военному сотрудничеству (Defense Security Cooperation Agency – DSCA) направило Конгрессу уведомление о предстоящей продаже Мексике по линии межправительственных военных продаж Foreign Military Sales (FMS) вооружения для фрегата проекта SIGMA 10514 на сумму 98,4 млн. долл., включая шесть противокорабельных ракет Boeing RGM-84L Harpoon Block II, 23 зенитные управляемые ракеты ближнего действия Raytheon RIM-116 RAM Block II, два трехтрубных 324-мм торпедных аппарата Mk 32 SVTT и шесть 324-мм противолодочных торпед Raytheon Mk 54 Mod 0, 1440 артиллерийских выстрелов калибра 57 мм (480 фугасных BA22 с программируемым взрывателем и 960 практических BA23) и 1000 артиллерийских выстрелов калибром 25 мм (250 полубронированных AA98 и 750 практических трассирующих A976).

В августе 2018 г. DSCA также направило Конгрессу США уведомление о предстоящей продаже Мексике

по линии FMS одной 8-зарядной вертикальной пусковой установки Mk 56 и восьми зенитных управляемых ракет Raytheon ESSM в контейнерах.

Таким образом, общую стоимость программы можно ориентировочно оценить в 500 млн. долл.

Значения принятых критериев для данного проекта: T – 2015–2020 гг.; C – ок. 500 млн. долл.; N – 1 (1); D – 60; L – 3.

МЕКО А200 (Германия)/МЕКО А200ЕН (Египет) (рис. 12). В сентябре 2018 г. концерн Thyssenkrupp подписал соглашение с Египтом о постройке для египетского флота четырех фрегатов проекта МЕКО А200, при этом предусматривалась постройка одного из этих фрегатов по лицензии в Египте. Позже количество заказанных Египтом фрегатов возросло до шести, причем два дополнительных корабля также предполагается строить в Египте.

В конце декабря 2018 г. Федеральный Совет безопасности Германии (членами которого являются федеральный канцлер и ключевые члены правительства ФРГ) на закрытом заседании одобрил начало реализации контракта, дав разрешение Thyssenkrupp на поставку в Египет первого фрегата проекта МЕКО А200.

Можно предположить, что фактическая стоимость контракта на четыре корабля выше, чем заявленные 2,7 млрд. долл. и что указанная сумма, видимо, покрывает только строительство трех кораблей в Германии (причем, скорее всего, без учета стоимости закупаемого отдельно ударного вооружения).

К настоящему времени три корабля введены в строй, четвертый в стадии достройки. По двум кораблям дополнительного контракта информация отсутствует.

Принимая настоящее допущение, критерии для данного проекта опре-



Рис. 12. Фрегат «Al-Aziz» ВМС Египта

делены следующие: *T* – 2018 – по н. в.; *Ц* – ок. 3,5 млрд. долл. за четыре корабля; *N* – 4 (3); *D* – 85; *L* – 4.

Gowind-3100 (Франция) /SGPV-LCS (Малайзия) (рис. 13). Фрегаты типа «Maharaja Lela» разработаны на базе проекта Gowind-3100 французской компании DCNS. За постройку, оснащение оборудованием, а также проведение испытаний и поставку отвечает местная компания Boustead Heavy Industries Corporation (BHIC). В начале 2011 г. Малайзия объявила о своей программе SGPV с бюджетом в 6 млрд. ринггитов (1,9 млрд. долл.). В конце того же года было объявлено, что в качестве прототипа выбраны фрегаты типа Gowind и что программа SGPV (Second Generation Patrol Vessel) была передана BHIC, при этом максимальная цена увеличилась с 6 млрд. ринггитов до 9 млрд. ринггитов (2,8 млрд. долл.). Контракт с DCNS включал передачу прав интеллектуальной собственности и технологий.

5 октября 2014 г. командующий RMN в своем интервью сообщил о начале строительства первого из шести кораблей и подтвердил что первый корабль будет передан флоту в 2019 г. Однако в 2020 г. правительство Малайзии объявило, что возникли некоторые задержки. К этому моменту ни один корабль так и не введен в состав флота.

Министерство обороны рассмотрело различные варианты решения данной проблемы, один из которых заключался в возможности обращения к Naval Group (DCNS) с просьбой завершить строительство кораблей, но этот вариант был отклонен парламентом.

В ноябре 2021 г. министр обороны Датук Сери Хишамуддин Хусейн за-



Рис. 13. Фрегат «Raja Muda Nala» ВМС Малайзии

явил, что первый корабль будет сдан в эксплуатацию в 2025 г., но этот срок к настоящему моменту перенесен на год.

Таким образом, первоначально планировалось строительство шести кораблей, один из которых был в итоге отменен. В настоящее время на воду спущены два корабля (в строй не введены).

Учитывая данное обстоятельство, значения принятых критериев для данного проекта могут быть следующими: *T* – 2011 г. – по н. в.; *Ц* – 2,8 млрд.; *N* – 5 (0); *D* – 85; *L* – 4.

МЕКО А-100 (Германия) /«Tamandare» (Бразилия) (рис. 14). В марте 2020 г. был подписан контракт с компанией Thyssen Krupp Marine Systems на строительство четырех фрегатов типа МЕКО А-100 водоизмещением 3500 т для ВМС Бразилии. Поставки кораблей запланированы на период с 2025 по 2028 г. Все работы будут выполнены на предприятии Estaleiro Oceana в Итахаи (шт.

Санта-Катарина, Бразилия).

По состоянию на ноябрь 2023 г. стоимость каждого корабля первой серии оценивается в сумму около 518 млн. евро, общая стоимость программы – 2,75 млрд. евро, включая расходы на НИОКР (750 млн. евро). В мае 2020 г. было объявлено о покупке верфи Estaleiro Oceana объединением Thyssen Krupp Marine Systems (TKMS). Таким образом, она составила основу бразильского филиала TKMS.

Сообщалось, что доля бразильского участия (по стоимости) в строительстве головного корабля составит 31,6%, а последующих – 41%. TKMS поставит технологии постройки корпусов МЕКО, которые применяются в 15 странах. Бразильская компания Embraer интегрирует датчики и вооружение в состав боевой системы. Atech (компания из Embraer

Group) выступает поставщиком системы боевого управления CMS (Combat Management System) и интегрированной системы управления платформой IPMS (Integrated Platform Management System), а также получателем технологий от ATLAS ELEKTRONIK (дочерняя компания TKMS), которая производит системы CMS и ГАС.

Помимо строительства кораблей, контракт включает передачу технологий военного кораблестроения, систем боевого управления и управления платформой, а также комплексную логистическую поддержку и управление жизненным циклом.

Программа позволит создать высококвалифицированные рабочие места и расширить возможности оборонной промышленности Бразилии. Сотрудничество TKMS и Embraer Defense & Security также будет содействовать созданию в Бразилии производственной базы для экспорта военно-морской техники в перспективе.

Как отмечается, модульная концепция корабля облегчит интеграцию национальных продуктов и передачу технологий, позволит снизить затраты на приобретение, обслуживание и модернизацию.

В августе 2024 г. ВМС Бразилии объявили о планах строительства второй серии кораблей из четырех единиц. Предполагается, что головной корабль первой серии «Tamandare» войдет в состав флота в декабре 2025 г.

Значения принятых критериев для данного проекта следующие: T – 2020 г. – по н. в.; C – 2,75 млрд. евро (примерно 2,83 млрд. долл.); N – 4 (0); D – 100; L – 4.

MKS-180 (Нидерланды)/F-126 (Германия) (рис. 15). 19 июня 2020 г. голландская Группа Damen Shipyards Group объявила о подписании с Федеральным ведомством по вооружениям, информационным технологиям и техническому обслуживанию (BAAINBw) Германии контракта на строительство четырех многоцелевых боевых кораблей (фрегатов) «MKS-180». Damen является главным подрядчиком данного проекта и будет осуществлять его совместно с партнерами Blohm + Voss и Thales в Германии. Корабли будут построены на предприятии Blohm + Voss в Гамбурге, а отдельные блоки – на ряде других предприятий Германии в Бремене, Киле и Вольгасте. Кроме того, участие в проекте примет около 100 малых и средних компаний из различных регионов страны. Около 80% инвестиций в проект останутся в Германии. Как заявлено, проект также имеет перспективы в рамках развития европейского сотрудничества.

Первоначально ВМС Германии были намерены принять на вооружение четыре корабля типа «MKS-180». Соглашение также включало опцион на поставку еще двух кораблей после 2032 г. Контракт на поставку этих двух дополнительных кораблей был подписан в 2024 г.

Контракт на первые четыре корабля не включает закупку вооружения. Его стоимость составляет 5,48 млрд. евро. В качестве поставщиков вооружения и систем выбраны компании Rheinmetall, Oto Melara, Thales, Wartsila SAM Electronics, OSI Maritime, Rolls-Royce Power Systems, Renk и др.

Первый фрегат серии «Niedersachsen» планируется передать флоту в 2028 г.

Значения принятых критериев для данного проекта: T – 2015 г. – по н. в.; C – ок. 7 млрд. евро (ок. 7,6 млрд. долл.) за шесть кораблей; N – 6 (0); D – 85; L – 4.



Рис. 14. Фрегат «Tamandare» ВМС Бразилии



Рис. 15. Проектное изображение фрегата типа «Niedersachsen» ВМС ФРГ

Результаты выполненных исследований по оценке матрицы выбранных критериев представлены в таблице.

Интегральная оценка по уровням локализации для разных классов кораблей представлена на рис. 16.

Из графика рис. 16 видно, что для кораблей класса OPV (патрульные корабли) характерно ИС по четвертому уровню локализации, корветы – по второму и четвертому, а фрегаты –

по всем трем уровням, но в большей степени по четвертому.

Таким образом, как показывает анализ, в среднесрочной перспективе в области надводного кораблестроения наблюдается устойчивая тенденция к формированию индустриального сотрудничества при постройке надводных кораблей всех наиболее востребованных сегодня классов – патрульных (OPV), корветов и фре-

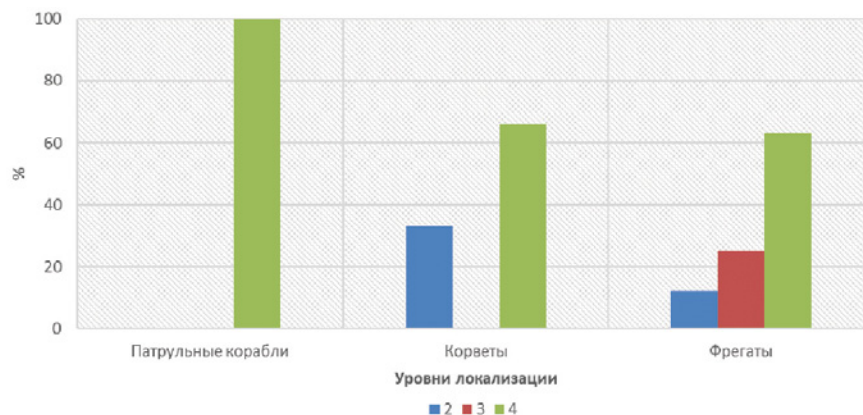


Рис. 16. Интегральная оценка по уровням локализации по классам кораблей

Оценка матрицы выбранных критериев

Страна-экспортер (проект)/страна импортер (проект) Водоизмещение полное, т	Т, годы	№ серии	Ц, млн. (млрд.) долл. США,	Поставка документации	Модернизация верфи	Передача технологий	Строительство отдельных секций на верфях третьих стран	Выполнение полного цикла работ	Монтаж поставляемого вооружения	Монтаж поставляемых механизмов и систем	Приобретение ЗИП	Применение собственного вооружения, механизмов, ЗИП	Обучение персонала верфи заказчика	Доля локализации, %	Уровень локализации
				10–15	15	10–20	15	25	10	5	5	20	5		
Патрульные корабли, Offshore Patrol Vessels (OPV)															
Vigilante 400 CL 54 (Франция)/ NPa 500 (Бразилия) 500 т	2006 г. – по н. в.	7	145 млн.	15	–	20	–	25	10	5	5	–	5	85	4
«Fassmer OPV-80» (Германия)/ «OPV-80» (Колумбия) 1850 т	2007– 2019 г.	3	140 млн.	15	–	20	–	25	10	5	5	–	5	85	4
MEKO A-100 (Германия)/ MEKO 100 RMN (Малайзия) 1850 т	1998– 2010 г.	6	1,5 млрд.	15	–	20	–	25	10	10	5	–	5	85	4
River (Великобритания)/ Krabi (Таиланд) 2000 т	2009– 2019 г.	2	234,2 млн.	15	–	20	–	25	10	5	5	–	5	85	4
Корветы															
BR70 (Франция)/ «Baipunah» (ОАЭ) 915 т	2003– 2017 г.	6	От 820 млн. до 1 млрд.	15	–	20	–	25	10	5	5	–	5	85	4
Gowind-2500 (Франция)/ «El Fateh» (Египет) 2500 т	2015 г. – по н. в.	4	1,4 млрд.	15	–	20	–	25	10	5	5		5	85	4
Фрегаты															
053 H3 (Китай)/F-22P (Пакистан) 2400 т	2005– 2013 г.	4	750 млн.	15	–	20	–	25	10	5	5	–	5	85	4
SIGMA 10514 (Нидерланды)/ «SIGMA 10514 Martadinata» (Индонезия) 2400 т	2010– 2018 г.	2	380 млн.	10	–	10	15	–	10	5	5	–	5	60	3
SIGMA 10514 (Нидерланды)/«POLA 101 Reformador» (Мексика) 2400 т	2015 – 2020 г.	1	500 млн.	10	–	10	15	–	10	5	5	–	5	60	3
«МЕКО А200» (Германия)/МЕКО А200ЕН (Египет) 2450 т	2018 г. – по н. в.	4	Ок 3,5 млрд.	15	–	20	–	25	10	5	5	–	5	85	4
Gowind-3100 (Франция) /SGPV–LCS (Малайзия) 3100 т	2011 г. – по н. в.	5	2,8 млрд.	15	–	20	–	25	10	5	5	–	5	85	4
МЕКО А-100 (Германия) /Tamandare (Бразилия) 3500 т	2020 г. – по н. в.	4	2,83 млрд. долл.	15	15	20	–	25	10	5	5	–	5	100	4
MKS-180 (Нидерланды)/F-126 (Германия) 10550 т	2020 г. – по н. в.	6	Ок 7,6 млрд.	15	–	20	–	25	10	5	5	–	5	85	4

готов. При этом максимальный, четвертый, уровень локализации характерен в первую очередь для кораблей небольшого водоизмещения – OPV и корветов как первого этапа освоения национального кораблестроения;

для фрегатов – в основном четвертый и в меньшей степени третий уровень локализации. Второй уровень локализации для корветов и фрегатов совместная работа нескольких участников проекта не характерна.

Высокие уровни локализации связаны в первую очередь со стремлением государств к индустриальной независимости, развитию собственного производства и созданию технологических школ. ■

На предприятии ОСК «Арктика» в Северодвинске создан участок аддитивного производства. Инженеры-конструкторы отдела главного конструктора электромонтажного предприятия начали получать заявки на обратное проектирование и 3D-печать практически из всех подразделений предприятия, включая филиалы, расположенные в различных регионах России.

За два года работы было изготовлено свыше 45 тысяч деталей, разработано более 188 3D-моделей, освоены технологии послойного наплавления пластика по технологии FDM, а также SLA, которые обеспечивают высокую точность изготовления деталей. Участок аддитивного производства оказал существенную помощь в технологической подготовке производства.

Кроме изготовления оснастки, ремонта и восстановления оборудования, АО «СПО «Арктика» прорабатывает возможность серийного аддитивного производства малых подводных движителей, используемых в подводной робототехнике, конструкция которых постоянно совершенствуется. Кардинально меняется технология изготовления движителей: внедряются новые композиционные материалы и осуществляется переход от традиционной механической обработки резанием к аддитивным методам производства [1].

Обзор существующих решений показывает, что традиционные винты для малых движителей, изготовленные методом литья из пластика, обладают высокой прочностью и износостойкостью, однако требуют дорогостоящих технологий запуска производства и сложных процессов обработки. Фотополимерные материалы, особенно при использовании 3D-печати, позволяют быстро создавать прототипы и проводить их тестирование, однако требуют подтверждения их стойкости и эффективности в условиях эксплуатации.

Для изготовления собственного прототипа подводного движителя с помощью аддитивных технологий был выполнен анализ российского рынка производителей фотополимерных смол. Свойства выбранной смолы представлены в табл. 1.

Кроме того, детали, напечатанные на 3D-принтере данной смолой, характеризуются гладкой поверхностью, высокой точностью размеров и меньшей усадкой при печати. Данная фотополимерная смола обладает устойчивостью к соленой воде и другим химическим веществам, в том числе к большинству органических растворителей и реактивному топливу.

Были проведены испытания движителя, изготовленного на основе данной фотополимерной смолы, на соленостойкость: за цикл испытаний отмечено лишь незначительное увеличение размеров на критически важных элементах – винтах, которое укладывается в допуски проекта, сохранена геометрия и работоспособность узлов, отсутствовали растрескивания и набухание, а рабочие параметры оставались стабильными в условиях соленой среды. Эти результаты подтверждают соответствие смолы требованиям к размерной устойчивости и химической стойкости к соленой воде.

Для изготовления движителя использовались стандартные методы проектирования – профилирование лопастей, а также упрощенные непрофилированные лопасти.

Для сравнения гидродинамических характеристик изделий был выполнен расчет простого непрофилированного винта (используется во всех импортных движителях), кото-

РАЗВИТИЕ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА СУДОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Д. С. Ракитин, инженер-конструктор ОГК,
И. Н. Костусев, начальник ПКБ автоматизированных систем управления ОГК,
В. М. Мокрицкий, инженер-конструктор ОГК,
Д. А. Шушков, инженер-конструктор ОГК,
АО «Северное производственное объединение «Арктика»,
контакт. тел. (8184) 58 5433, arktika@spoarktika.ru

рый работает за счет угла атаки потока, а не за счет кривизны лопасти (рис. 1, а), и расчет профилированного винта (рис. 1, б). Далее проводилось компьютерное моделирование условий эксплуатации с использованием модуля для моделирования потоков жидкости в САЕ-системе – гидродинамическое моделирование, позволяющее анализировать поток вокруг винта, выявлять зоны турбулентности и оптимизировать его форму (рис. 2, а, б). Определенные параметры указаны в табл. 2.

Далее был проведен расчет профилированного винта. Пример построения профиля лопастей представлен на рис. 3.

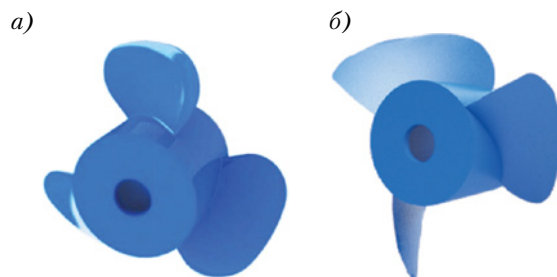


Рис. 1. Общие виды непрофилированного (а) и профилированного (б) гребного винта с углом поворота (наклона) 40 град.

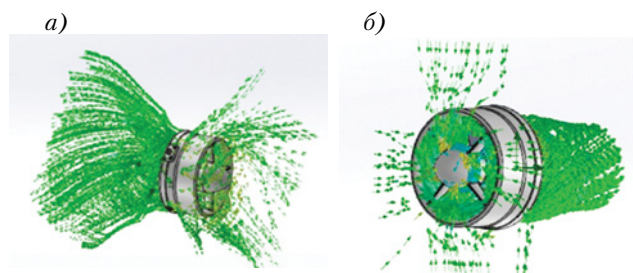


Рис. 2. Анализ траектории потока и определение тяги непрофилированного (а) и профилированного (б) гребного винта

Таблица 2
Параметры гребных винтов

Гребной винт	Траектория потока воды	Тяга гребного винта, кгс
Непрофилированная лопасть	Оптимальная	5,9
Профилированная лопасть	То же	9,5

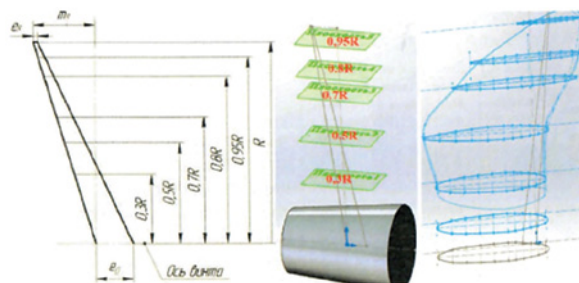


Рис. 3. Пример построения профиля лопастей

Таблица 1
Свойства фотополимерной смолы

Твердость по Шору (шкала D)	Технология 3D печати	Ударная вязкость, Дж/м	Усадка при печати, %	Длина волны отверждения, нм
84 ± 4	DLP, LCD	460	0,07	405

На основе полученных данных гидродинамические показатели профилированного винта превосходят показатели непрофилированного, однако оба варианта соответствуют требованиям. На основе полученного гребного винта разработана конструкция движителя (рис. 4)

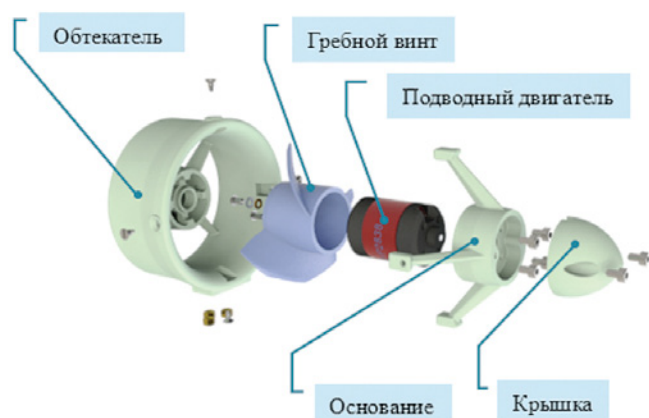


Рис. 4. Общий вид конструкции движителя

Изготовление движителя (рис. 6) осуществляется на 3D-принтере с использованием выбранной фотополимерной смолы. Для подготовки модели к печати создается файл G-code с помощью специализированной программы-слайсера (рис. 5).

После изготовления проводится подготовка некоторых частей движителя к заливке компаундом для герметизации по аддитивно-компаундной технологии. Выполняется 3D-печать самоармированной пустотелой оболочки, которая заливается наполнителем из эпоксидных смол, свойства применяемых смол с отвердителем и пластификатором приведены ниже. Готовое изделие представляет собой функционально-градиентный материал (рис. 7) [3].

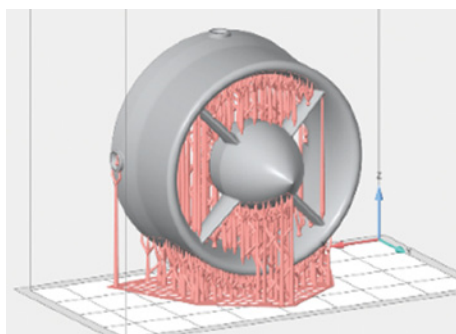


Рис. 5. Пример G-code для обтекателя движителя, сформированный с помощью слайсера

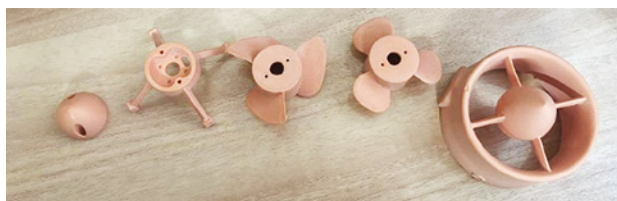


Рис. 6. Напечатанные компоненты движителя

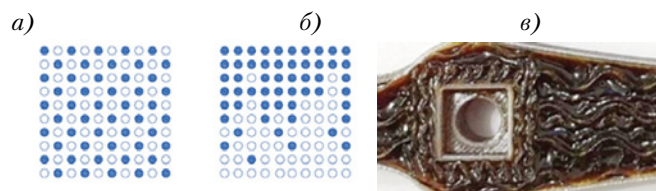


Рис. 7. Распределение материалов в традиционном композите (а) и функционально-градиентном материале (б, в) [4]

Свойства эпоксидно-диановой смолы ЭД-20

Свойство	Значение
Цвет по железокобальтовой шкале, не более	3
Массовая доля, %:	
эпоксидных групп,	20–22,5
иона хлора, не более	0,001
омыляемого хлора, не более	0,3
гидроксильных групп, не более	1,7
летучих веществ, не более	0,2
Динамическая вязкость, Па.с, при 20 °С	От 20 и более
Отвердитель ЭТАЛ-45 М, соотношение	1:2
Диэтиленгликоль, пластификатор для эпоксидных смол (ДЭГ-1) соотношение, %	От 5 до 20

Существует множество модификаций эпоксидных смол, изменяющих предел прочности, вязкости, эластичности, теплостойкости [5]. Свойства модифицированной эпоксидной смолы представлены ниже.

Свойства отвержденного состава модифицированной эпоксидной смолы

Свойство	Значение
Прочность на сдвиг, мПа:	
сталь	27–41
алюминий	17–31
цинк	14–27
Твердость по Шору, шкала D	70–75
Рабочая температура, град.	От минус 40 до плюс 150

После изготовления проводится контроль габаритных размеров и качества с помощью 3D-сканера. Полученные данные (рис. 8) сравниваются с исходной расчетной моделью для выявления отклонений и уточнения параметров. В результате контроля обнаружены минимальные отклонения, что подтверждает соответствие изделия заданным требованиям.

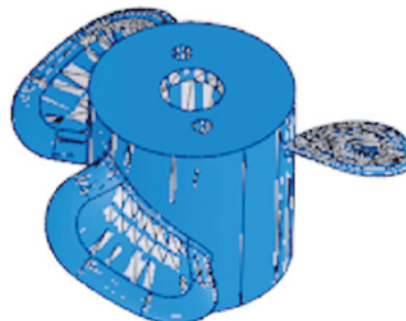


Рис. 8. Контроль размеров с помощью 3D-сканирования

Таким образом, в результате проведенных исследований и расчетов был разработан, изготовлен и проконтролирован прототип малого подводного движителя с использованием современных материалов и технологий. Перспективы его внедрения связаны с возможностью быстрого создания серийного образца с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вельтищев В.В. Проектирование движительных комплексов подводных аппаратов: уч. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2019. – 167 с.
2. Игнатюк В.И. Лабораторные работы по дисциплине «Численные методы механики». – Брест: БрГТУ, 2020. – 69 с.
3. Костусев И.Н. Аддитивно-компаундная технология для производства облегченных композитных материалов с положительной плавучестью на примере «Судового БПЛА». Модификация наполнителя наноматериалом//Судовой электромонтаж. – 2023. – № 4. – С. 79–91.
4. ПНСТ 666–2022 (ISO/ASTM TR 52912:2020) Аддитивные технологии. Функционально-градиентные материалы. Общие положения.
5. Иржак В.И. Эпоксидные полимеры и наноккомпозиты – Черноголовка: Изд.ИПХФ РАН, 2021. – 319 с. ■

Развитие современных судовых энергетических установок увеличенной мощности для обеспечения надежности и долговечности требует создания эффективных судовых охладителей. Для судовых условий большое значение имеет компактность теплообменных аппаратов, возможность их установки в вертикальном и горизонтальном положениях, выбор материалов и конструктивных решений, обеспечивающих надежность в течение заданного срока службы и простоту обслуживания в этих условиях.

В настоящей статье рассмотрены основные подходы к методу теплофизического расчета системы кожухотрубных охладителей (по конфигурации поверхности теплообмена с прямыми гладкими трубами, по роду теплоносителей жидкость–жидкость) с многоходовым течением теплоносителей без их непосредственного смешивания при нестационарных процессах теплопередачи и минимизации массогабаритных параметров охладителей.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООТДАЧИ

К числу весьма распространенных судовых теплообменных аппаратов относятся и охладители воды, где в качестве охлаждаемого теплоносителя используется пресная или дистиллированная вода, а в качестве охлаждающей среды применяется забортная (морская или речная) вода.

На рис. 1 представлена принципиальная схема охладителя воды – кожухотрубный теплообменный аппарат с цилиндрическим корпусом (кожухом) обечайки и прямыми теплообменными трубами (трубным пучком), жестко закрепленными в неподвижных трубных решетках, с многоходовым (три хода по охлаждающей воде) смешанным течением теплоносителей без их непосредственного смешивания.

При выполнении теплофизических расчетов охладителя оценивается влия-

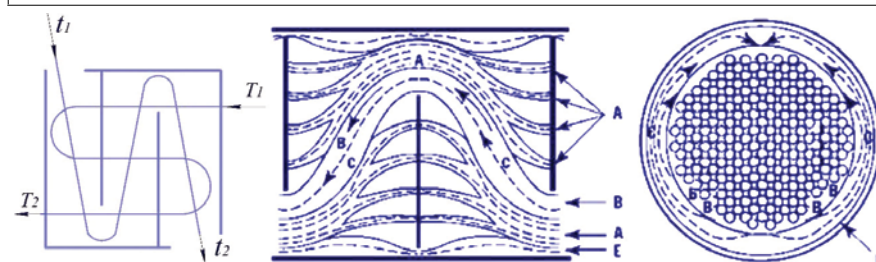


Рис. 2. Схемы движения теплоносителей и потоков воды в межтрубном пространстве

T – охлаждающая среда в теплообменных трубах (число ходов – три); t – охлаждаемая среда в межтрубном пространстве; А – обводной поток через зазоры между трубками и отверстиями прохода труб в поперечных перегородках; В – основной поток в межтрубном пространстве; С – поток между трубным пучком и внутренней поверхностью кожуха; Е – обводной поток через зазор между поперечными перегородками и внутренней поверхностью кожуха

ние изменения направления и скорости движения потока охлаждаемой воды, обводных течений и байпасных потоков с учетом принятых конструктивных зазоров и разбивки теплообменных труб в трубном пучке.

Схемы движения теплоносителей и потоков охлаждаемой воды в межтрубном пространстве приведены на рис. 2, характерные поля температур в трубном и межтрубном пространствах – на рис. 3 (вход потока слева).

Интенсивность теплоотдачи от «горячего» теплоносителя к «холодному» повышается с увеличением скорости движения теплоносителей и степени турбулентности потока, что достига-

ется с помощью установки поперечных перегородок в межтрубном пространстве. Наиболее часто применяются перегородки с сегментным вырезом. При этом сегментные вырезы в соседних перегородках расположены в шахматном порядке. Продольные перегородки в распорительной камере теплообменного аппарата увеличивают количество ходов теплоносителя в трубном пространстве.

Наличие застойных зон, ускорение и замедление потока негативно влияют на эффективность теплопередачи. На рис. 4 приведены векторы скорости потока воды в продольном сечении межтрубного пространства в зависимости

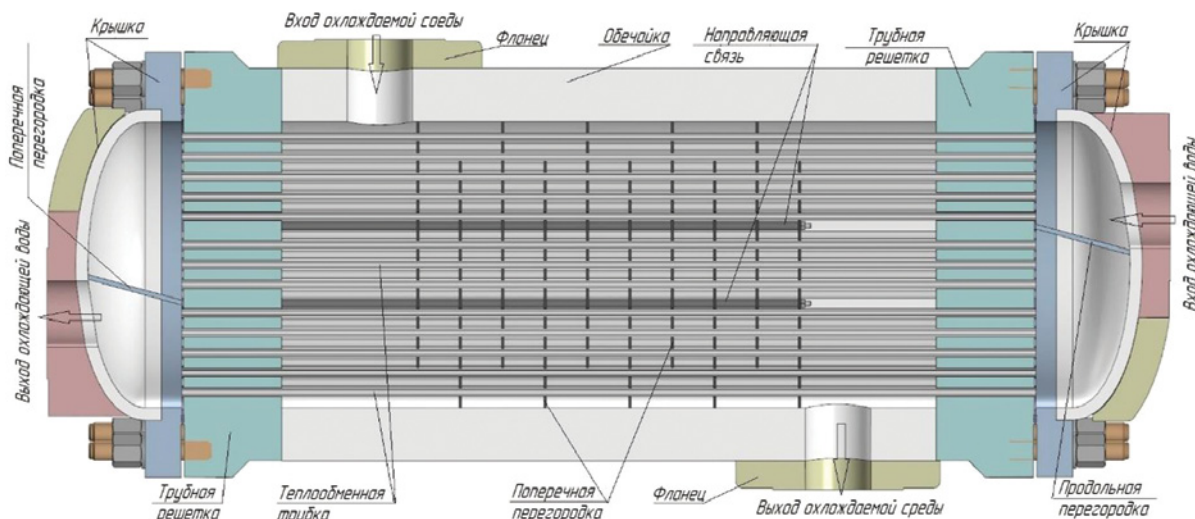


Рис. 1. Принципиальная схема и общий вид охладителя

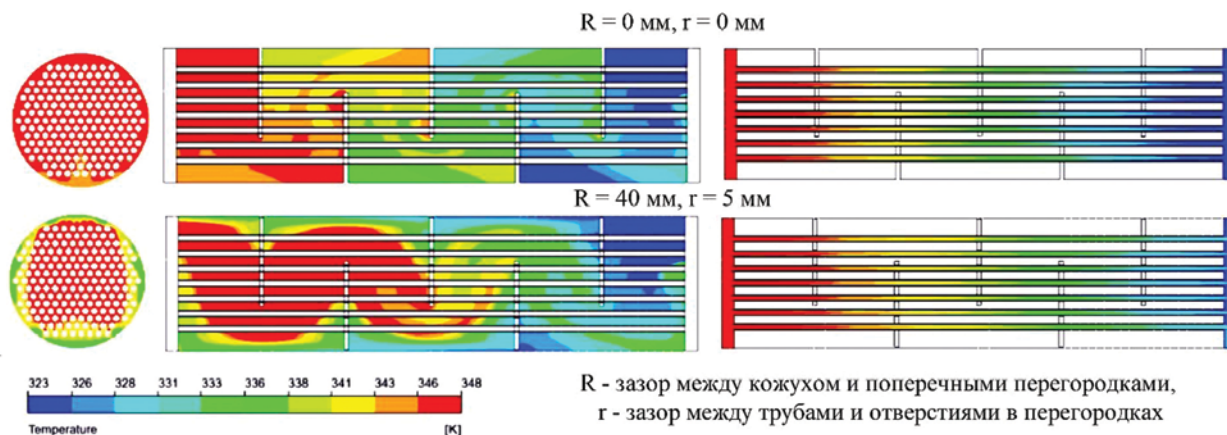


Рис. 3. Характерные поля температур в трубном и межтрубном пространствах

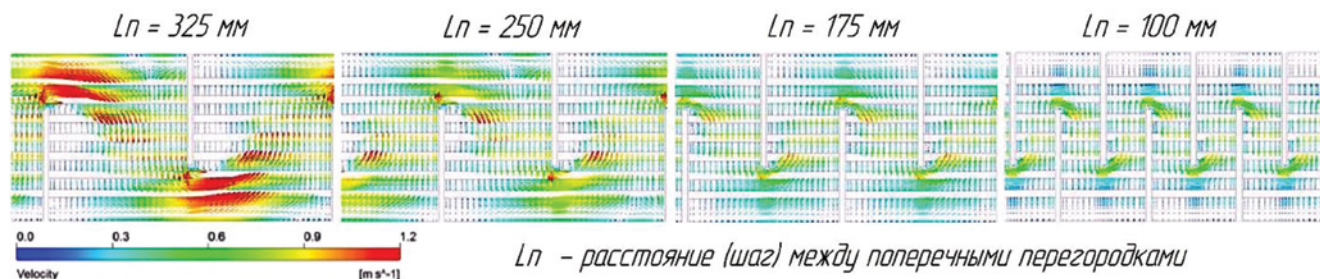


Рис. 4. Характерное распределение скорости потока при изменении шага перегородок

от расстояния (шага) L_n между поперечными сегментными перегородками при одинаковом значении критерия Рейнольдса.

Основной поток, проходя между поперечными перегородками, неравномерно распределяется по проходному сечению, смещаясь ближе к следующей перегородке. За обтекаемой перегородкой формируется застойная зона с низкой скоростью движения теплоносителя. При уменьшении расстояния между перегородками распределение потока по сечению более равномерное, соответственно, относительная ширина застойной зоны меньше. Минимальное расстояние между перегородками подбирается на основе гидравлического расчета методом последовательных итераций.

Оптимальное соотношение высоты сегмента (выреза) перегородки и расстояния (шага) между поперечными перегородками (при выравнивании площади для прохода теплоносителя между поперечными перегородками и площади для прохода теплоносителя через сегмент выреза перегородок) обеспечивает одинаковую среднюю скорость прохода теплоносителя и наименьший объем застойных зон.

СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ КОЖУХОТРУБНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

В теплообменных системах в основном применяются параллельные и последовательные схемы подключения теплообменников в зависимости от требований к теплопередаче, гидравлическому сопротивлению и управлению системой в целом.

При последовательном подключении два и более кожухотрубных теплообменника подключены друг за другом, поток каждого теплоносителя проходит через все аппараты поочередно (последовательно).

При параллельном подключении двух и более кожухотрубных теплообменников поток каждого теплоносителя разделяется между несколькими аппаратами, затем на выходе из них объединяется (горячие и холодные теплоносители проходят через разные аппараты одновременно).

Схемы подключения кожухотрубных теплообменных аппаратов, соединенных потоками теплоносителей последовательно или параллельно, приведены на рис. 5.

Последовательное подключение чаще используется, когда необходимо поэтапно уменьшить большую разницу

температур между горячим и холодным теплоносителями. Параллельная схема подключения теплообменников чаще применяется в процессах, требующих быстрого охлаждения горячего теплоносителя или когда скорость потока одного теплоносителя необходимо изменять независимо от другого.

Иногда для оптимизации работы системы применяются смешанные (комбинированные) схемы подключения, например, параллельное подключение групп последовательных теплообменников.

Когда требуется разделение агрессивных, токсичных или высоконапорных сред с целью защиты оборудования в случае аварии, применяется схема подключения кожухотрубных теплообменных аппаратов с общим промежуточным контуром.

Схемы подключения кожухотрубных теплообменных аппаратов с общим

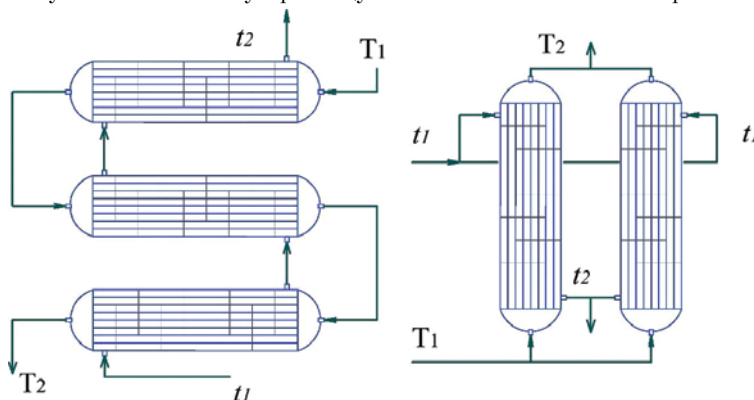


Рис. 5. Схемы движения теплоносителей и потоков воды в межтрубном пространстве
 T_1 и T_2 – начальная и конечная температура теплоносителя в теплообменных трубах; t_1 и t_2 – начальная и конечная температура теплоносителя в межтрубном пространстве

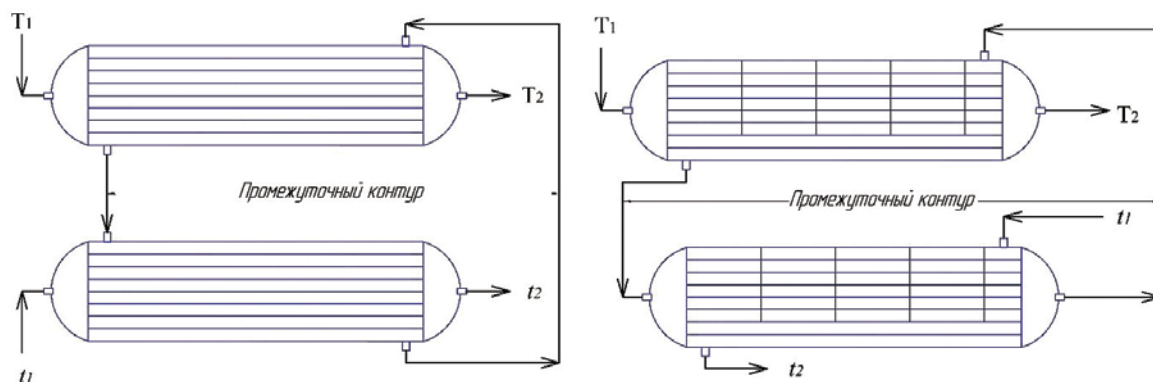


Рис. 6. Схемы подключения аппаратов с общим промежуточным контуром

T_1 и T_2 – начальная и конечная температура холодного теплоносителя; t_1 и t_2 – начальная и конечная температура горячего теплоносителя.

промежуточным контуром (при проходе в межтрубном пространстве обоих аппаратов и при проходе промежуточного контура в межтрубном пространстве первого аппарата и в трубах второго аппарата) приведены на рис. 6.

При работе теплообменника с высоким перепадом давления между разделяемыми средами система подключения теплообменников с общим промежуточным контуром позволяет перевести высокое давление на один небольшой теплообменник и избежать применения дорогостоящего аппарата с высоким давлением на основной линии, что важно для стабилизации работы системы и предотвращения смешивания потоков теплоносителей в случае разгерметизации трубного пучка. При этом необходимо учитывать, что данная система имеет более высокую стоимость: два теплообменника вместо одного (общая площадь теплообмена двух теплообменников всегда больше площади одного теплообменного аппарата, работающего при тех же температурных условиях горячего и холодного теплоносителей), дополнительные насос, трубопроводы и трубопроводная арматура. Также наблюдается снижение эффективности системы из-за дополнительного теплового сопротивления промежуточного контура.

МЕТОД ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Расчет системы кожухотрубных теплообменных аппаратов зависит от типа их соединения: параллельного, последовательного, смешанного (комбинированного) или с общим промежуточным контуром.

При последовательном подключении теплообменников увеличивается температурный напор (разность температур двух сред, между которыми происходит теплообмен), но растет и общее гидравлическое сопротивление. Общий перепад температур равен сумме перепадов на каждом аппарате. При этом необходимо учитывать изменение свойств

теплоносителя (например, вязкость) с учетом изменения температуры (первый аппарат работает на более высокой температуре, второй и каждый последующий – на более низкой) и выполнять проверку давления на выходе системы – суммарные потери не должны превышать допустимые значения для насосов.

При параллельном подключении теплообменников общий расход системы равен сумме расходов через каждый аппарат. Равномерное распределение нагрузки требует балансировки расходов. Необходимо учитывать неравномерное распределение потока при разном сопротивлении аппаратов и контролировать минимальный допустимый расход. Тепловой расчет для каждого аппарата производится отдельно с учетом общего перепада температур.

При смешанном (комбинированном) подключении теплообменников часть аппаратов подключена параллельно, часть – последовательно. Расчет усложняется из-за взаимного влияния ветвей (потоков). При этом выполняется разделение системы на параллельные и последовательные участки. Общее количество отводимого тепла равно суммарному количеству отводимого тепла для параллельных ветвей и равно суммарному количеству отводимого тепла для последовательных ветвей. При расчете необходимо учитывать, что давление на входе в параллельные ветви должно быть одинаковым. Корректировка расходов и температур ведется итерационным методом до достижения сходимости.

Расчет системы кожухотрубных охладителей с общим промежуточным контуром при нестационарных процессах теплоотдачи и минимизации массогабаритных параметров охладителей выполняется с учетом требований прочности, что актуально в судовом машиностроении и имеет свои ключевые особенности.

При схеме, когда два кожухотрубных теплообменных аппарата ($ТА_1$ и $ТА_2$) связаны общим промежуточным конту-

ром (ПТ), горячий теплоноситель ($ТА_1$) отдает тепло промежуточному теплоносителю (ПТ), который в свою очередь отдает тепло холодному теплоносителю ($ТА_2$). Особенность расчета состоит в том, что эти два кожухотрубных охладителя ($ТА_1$ и $ТА_2$) нельзя рассчитывать независимо друг от друга – они связаны через параметры промежуточного контура. Мощность, передаваемая в первом теплообменнике, должна быть равна мощности, передаваемой во втором (при отсутствии тепловых потерь в окружающую среду).

Основное условие такой системы кожухотрубных аппаратов – связанные уравнения теплового баланса:

$$Q = Q_1 = Q_2 \text{ кВт}, \quad (1)$$

где Q – мощность системы теплообменных охладителей, кВт; Q_1 – мощность охладителя $ТА_1$ (нагреватель промежуточного теплоносителя), кВт; Q_2 – мощность охладителя $ТА_2$ (охладитель промежуточного теплоносителя), кВт.

Здесь

$$Q_1 = G_r c_{pr} (T_1^r - T_2^r) = G_{пт} c_{пт} (T_{пт1}^r - T_{пт2}^r) \text{ кВт}; \quad (2)$$

$$Q_2 = G_x c_{px} (T_2^x - T_1^x) = G_{пт} c_{пт} (T_{пт1}^x - T_{пт2}^x) \text{ кВт}, \quad (3)$$

где G_r , G_x , $G_{пт}$ – массовые расходы горячего, холодного и промежуточного теплоносителей, кг/с; c_{pr} , c_{px} , $c_{пт}$ – удельные теплоемкости горячего, холодного и промежуточного теплоносителей, кДж/(кг °С); T_1^r , T_2^r – температуры входа, выхода горячего теплоносителя, °С; T_1^x , T_2^x – температуры входа, выхода холодного теплоносителя, °С; $T_{пт1}^r$, $T_{пт2}^r$ – температуры входа, выхода промежуточного теплоносителя в $ТА_1$, °С; $T_{пт1}^x$, $T_{пт2}^x$ – температуры входа, выхода промежуточного теплоносителя в $ТА_2$, °С.

В замкнутом промежуточном контуре $T_{пт1}^r = T_{пт1}^x$ и $T_{пт2}^r = T_{пт2}^x$, то есть, выходя из аппарата $ТА_1$, промежуточный теплоноситель сразу поступает в аппарат $ТА_2$, и наоборот.

Важнейшее значение имеют теплофизические свойства промежуточно-

го теплоносителя: плотность, вязкость, теплопроводность являются функциями температуры, что усложняет расчет – средняя температура теплоносителей в аппаратах $ТА_1$ и $ТА_2$ разные, и свойства промежуточного теплоносителя будут отличаться. Поэтому в начале расчета теплофизические свойства принимаются при средней температуре контура.

Исходные данные (величины) и требования к параметрам теплообменной системы и минимальным габаритам теплообменных аппаратов заданы техническим заданием:

- среда внешнего контура теплообменной системы – например, морская вода соленостью до 40 г/л;
- среда внутреннего контура теплообменной системы – дистиллированная вода;
- количество отводимого тепла теплообменной системы Q , кВт;
- расход охлаждающей морской воды G_m , м³/ч;
- расход дистиллированной воды G_d , м³/ч;
- допустимая потеря напора охлаждающей морской воды Δp_m , кгс/м² (МПа);
- допустимая потеря напора дистиллированной воды Δp , кгс/м² (МПа);
- температура охлаждающей морской воды на входе в охладитель T_1^x , °С;
- температура дистиллированной воды на выходе из охладителя T_2^x , °С;

Массовый расход промежуточного теплоносителя $G_{\text{ит}}$ – это расчетная величина, ее подбирают с учетом теплофизического расчета и рабочих параметров насосного агрегата. Из-за взаимосвязи параметров алгоритм расчета итерационный.

Предварительно ориентировочно задаются начальные температуры $T_{\text{ит}1}^r$ и $T_{\text{ит}2}^r$ (они же $T_{\text{ит}1}^x$ и $T_{\text{ит}2}^x$), исходя из того, что для эффективной теплопередачи средняя температура промежуточного контура должна быть выше T_1^x , но ниже T_2^x при условном равенстве температурных напоров в обоих аппаратах.

Расход промежуточного теплоносителя определяется из уравнения теплового баланса для одного из аппаратов, например, $ТА_1$ (удельная теплоемкость $c_{\text{ит}}$ берется по справочным данным при выбранной средней температуре промежуточного контура):

$$G_{\text{ит}} = \frac{Q}{c_{\text{ит}}(T_{\text{ит}2}^r - T_{\text{ит}1}^r)} \text{ кг/с.} \quad (4)$$

Затем поочередно выполняются расчеты первого аппарата $ТА_1$ и второго $ТА_2$ как для отдельного кожухотрубного теплообменного аппарата при нестационарных процессах теплопередачи. За холодный поток $ТА_1$ принимается промежуточный теплоноситель с массовым расходом $G_{\text{ит}}$. За горячий поток $ТА_2$ принимается

промежуточный теплоноситель с массовым расходом $G_{\text{ит}}$ и с полученными расчетными температурами $T_{\text{ит}2}^r = T_{\text{ит}1}^x$.

Сравниваются полученные тепловые мощности Q , Q_1 , Q_2 и условия замкнутого промежуточного контура $T_{\text{ит}1}^r = T_{\text{ит}1}^x$ и $T_{\text{ит}2}^r = T_{\text{ит}2}^x$ для выполненной итерации. Итерации продолжаются с корректировки начальной температуры промежуточного контура до тех пор, пока не будет достигнута сходимость по мощности и температурам.

Теплофизические расчеты теплообменных аппаратов ведутся практически на номинальном режиме их работы и не учитывают всех режимов эксплуатации (когда температура применяемой в качестве охлаждаемого теплоносителя забортной морской воды не может быть постоянной). Поэтому при расчетах судовых теплообменных аппаратов важно учитывать, что незначительное изменение температуры теплоносителя может оказать существенное влияние на параметры теплообменника. Особенно это важно при незначительном (менее 4 °С) перепаде температур на входе и выходе из аппарата. Анализ проведенных испытаний макетных образцов кожухотрубных охладителей показал, что изменение перепада температуры на входе и выходе из охладителя на 0,1 °С влечет за собой изменение мощности теплообменника от 3 до 5 %.

При расчете отдельного кожухотрубного теплообменного аппарата применение дополнительного коэффициента запаса площади поверхности теплообмена на загрязнение (0,75–0,85) рекомендуется [1]; при расчете системы кожухотрубных охладителей с общим промежуточным контуром при нестационарных процессах теплоотдачи применение минимального значения данного коэффициента обязательно с учетом требований по массогабаритным параметрам охладителей.

Для проверки выполнения заданных параметров требуется выполнить расчеты системы кожухотрубных охладителей с общим промежуточным контуром не только на номинальном, но и на других режимах эксплуатации судового оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет системы из двух теплообменников с общим промежуточным контуром – это задача на совместное решение уравнений теплового и материального баланса для двух аппаратов, связанных общими параметрами. Ключевая сложность заключается в итерационном подборе температур и расхода в промежуточном контуре до достижения сходимости по мощности и температурам.

В настоящее время большое число кожухотрубных теплообменных аппаратов проектируется с применением расчетных программных комплексов с разной степенью сложности представления физических процессов. Учитывая существующие общеизвестные различные методики теплофизических расчетов, несколько отличающиеся друг от друга, качество выполнения расчета зависит от правильности предварительного анализа, выбора параметров и исходных данных с последующими интерпретациями результатов полученных расчетов.

Применение расчетных программных комплексов ускоряет процесс, но ошибки при вводе исходных данных могут пройти незамеченными и повлиять на окончательные решения выбора конструкции теплообменного аппарата, что фактически сводится к последовательным конструктивным и проверочным расчетам непосредственно конструктором.

Преимущество расчетов конструктором вручную заключается в непосредственной инженерной интерпретации с учетом различных физических процессов теплообмена, что позволяет свести к минимуму недостатки расчетных программных комплексов, особенно при расчете теплообменной системы, состоящей из двух теплообменников с общим промежуточным контуром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копачинский П.А., Тараскин В.П. Судовые охладители и подогреватели жидкости – Л.: Судостроение, 1968.
2. Цыганков А.С. Расчеты судовых теплообменных аппаратов. – Л.: Судпромгиз, 1956.
3. Андреев В.А. Теплообменные аппараты для вязких жидкостей. Основы расчета и проектирования – Л.: Энергия, 1971.
4. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче – Л.: Госэнергоиздат, 1958.
5. Михеев И.М., Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977.
6. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам – М.: Машиностроение, 1989.
7. Мартыненко О.Г. и др. Справочник по теплообменникам. – В 2-х т./Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1977.
9. Григорьев В.А., Колач Т.А., Соколовский В.С., Темкин Р.М. Краткий справочник по теплообменным аппаратам. – Л.: Госэнергоиздат, 1962.
10. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Энергия, 1992.
11. Коваленко Л.М., Глушков А.Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи – М.: Энергоатомиздат, 1986. ■

Современное кораблестроение сталкивается с рядом вызовов: ужесточение экологических норм, рост сложности проектов, необходимость сокращения сроков строительства и оптимизация затрат. Надводный корабль (НК) проходит сложный жизненный цикл, включающий проектирование, строительство, эксплуатацию, модернизацию и утилизацию (см. таблицу). Каждый этап тесно связан с предыдущим и последующим, а цифровые технологии становятся ключевым инструментом для решения этих задач, позволяя автоматизировать взаимодействие на разных этапах жизненного цикла корабля, оптимизировать процессы, снижать затраты и повышать надежность.

КОНЦЕПЦИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

П. Г. Печковский, канд. техн. наук, член Военно-промышленной коллегии РФ,
В. В. Барановский, д-р техн. наук, проф., зам. ген. директора по энергетическим установкам, судовым системам и устройствам АО «ЦМКБ «Алмаз»,
Ю. В. Пыльнев, д-р техн. наук, проф., ген. директор,
И. А. Кирюхин, канд. техн. наук, гл. конструктор программных систем, АО «ИК «НЕОТЕК МАРИН»,
 контакт. тел. (495) 696 0839, (812) 373 2800, (812) 418 6352, (812) 418 6352

Основные этапы жизненного цикла корабля

Таблица

Этап	Ключевые процессы	Связь с другими этапами
Проектирование	Разработка концепции, расчеты, 3D-моделирование	Влияет на строительство и эксплуатацию (ошибки проектирования приводят к дорогостоящим доработкам)
Строительство	Обработка металла, сборка секций и корпуса, изготовление судовых систем, монтаж изделий машиностроения, испытания	Зависит от точности проектирования, влияет на надежность в эксплуатации
Эксплуатация	Использование по назначению, обслуживание, ремонты	Требует данных от проектирования и строительства, влияет на модернизацию и утилизацию
Модернизация	Обновление общекорабельных систем, замена оборудования	Основана на данных эксплуатации, продлевает жизненный цикл
Утилизация	Разборка, переработка, экологическая безопасность	Зависит от материалов и технологий, использованных на предыдущих этапах

Этап проектирования современных НК – сложный процесс, требующий применения передовых цифровых решений. Они позволяют оптимизировать форму корпуса, провести расчеты распределения веса, энергоэффективности, боевых характеристик, живучести и надежности корабля, а также других ключевых параметров.

С одной стороны, благодаря системам автоматизированного проектирования CAD/CAE сделан большой шаг в создании 3D-моделей кораблей с высокой детализацией, моделировании гидродинамики, проектировании общей компоновки, остойчивости и грузоподъемности. С другой стороны, внедрение цифровых двойников позволило создавать виртуальные копии кораблей и их систем, которые функционируют в реальном масштабе времени, и использовать их для тестирования в виртуальных условиях (шторм, аварии, боевые повреждения), прогнозирования износа механизмов, обучения личного состава.

Но на этапе проектирования необходимо также решать сложную многокритериальную задачу, требующую учета тактико-технических требований, экономической эффективности, надежности, живучести и боевой устойчивости –

обоснование выбора энергетических установок (ЭУ) надводных кораблей и режимов их использования. Авторами предлагается многоуровневая модель интегрированной системы информационной поддержки обоснования выбора ЭУ, включающая подсистемы выбора конструктивных схем, прогнозирования эксплуатационных характеристик и оценки живучести ЭУ. Приводятся алгоритмы работы подсистем и их применение для анализа ЭУ перспективных кораблей ВМФ.

АРХИТЕКТУРА И МОДЕЛЬ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ И РЕЖИМОВ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Модель применения многоцелевой интегрированной системы информационной поддержки для обоснования выбора ЭУ надводных кораблей и режимов их использования может быть представлена в виде последовательности этапов, включающих сбор, обработку, анализ данных и принятие решений.

Ниже приведена структура этапов модели применения:

1. Определение целей и задач:
 - формулировка целей выбора ЭУ (минимизация затрат, повышение эффективности, снижение экологической нагрузки, улучшение удобства эксплуатации и т. д.);
 - определение критериев оценки (мощность, надежность, живучесть, экономичность, массогабаритные показатели);
 - учет специфики эксплуатации корабля (дальность и автономность плавания, природно-навигационные условия, режимы работы и т. д.).
2. Сбор и систематизация данных:
 - создание базы данных о доступных типах ЭУ (газотурбинные установки, дизельные установки, ядерные установки, комбинированные установки);
 - сбор информации о характеристиках ЭУ: технические параметры (мощность, КПД, ресурс), эксплуатационные характеристики (расход топлива, требования к обслуживанию), экономические показатели (стоимость разработки, создания, монтажа ЭУ и эксплуатационные расходы), показатели живучести и надежности;
 - анализ исходной информации верхнего уровня (корабля).
3. Моделирование и анализ ЭУ проектируемого корабля:
 - разработка математических моделей для оценки характеристик ЭУ в различных режимах эксплуатации;
 - использование методов многокритериального анализа для сравнения вариантов схем ЭУ;
 - синтез ЭУ проектируемого корабля для оценки работы ЭУ в различных условиях эксплуатации и проверки на удовлетворение ограничений, предъявляемых к ЭУ.
4. Интеграция данных и поддержка принятия решений:

- реализация на единой информационной платформе, объединяющей данные о ЭУ, режимах эксплуатации и результатах моделирования;
- разработка интерфейса для взаимодействия с системой (визуализация данных, создание отчетов);
- формирование рекомендаций по выбору оптимальной энергетической установки на основе анализа данных;
- оптимизация режимов использования ЭУ с учетом текущих условий эксплуатации;
- сбор данных о фактической эксплуатации и надежности;
- оценка рисков и разработка мер по их минимизации.

Разрабатываемая система должна реализовывать строго определенный пошаговый алгоритм действий пользователя по обоснованию наиболее предпочтительных (самых благоприятных) вариантов ЭУ перспективных боевых надводных кораблей (НК) из всего множества возможных вариантов. Причем предполагается, что наиболее предпочтительный вариант ЭУ должен в наибольшей степени удовлетворять назначению корабля, т.е. всему спектру решаемых задач или, по-другому, оперативно-тактической модели его использования, а архитектурное исполнение ЭУ, т.е. ее тип, состав и схемное исполнение должны отвечать последним достижениям в области корабельного энергомашиностроения. Кроме того, создаваемая ЭУ перспективного корабля должна не только отвечать назначению, но и по возможности иметь минимальную стоимость создания и эксплуатации из всех возможных вариантов.

Архитектура системы информационной поддержки обоснования выбора ЭУ НК на основе цифровой платформы приведена на рис. 1.

СБОР, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПОСТУПАЮЩЕЙ ОТ ВНЕШНИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

В качестве исходной информации верхнего уровня (корабля) следует принимать следующее:

- 1) концепцию оперативно-тактического использования корабля, в частности:
 - целевое предназначение проектируемого корабля: будет ли он решать узконаправленные задачи или же будет многоцелевым, т.е. решать весь комплекс задач, свойственных боевым НК: нанесение ударов по кораблям и конвоям противника и его береговым объектам, поиск и уничтожение ПЛ противника, оказание огневой поддержки при высадке десантов и др.;
 - цикличность использования корабля и продолжительность большого цикла;

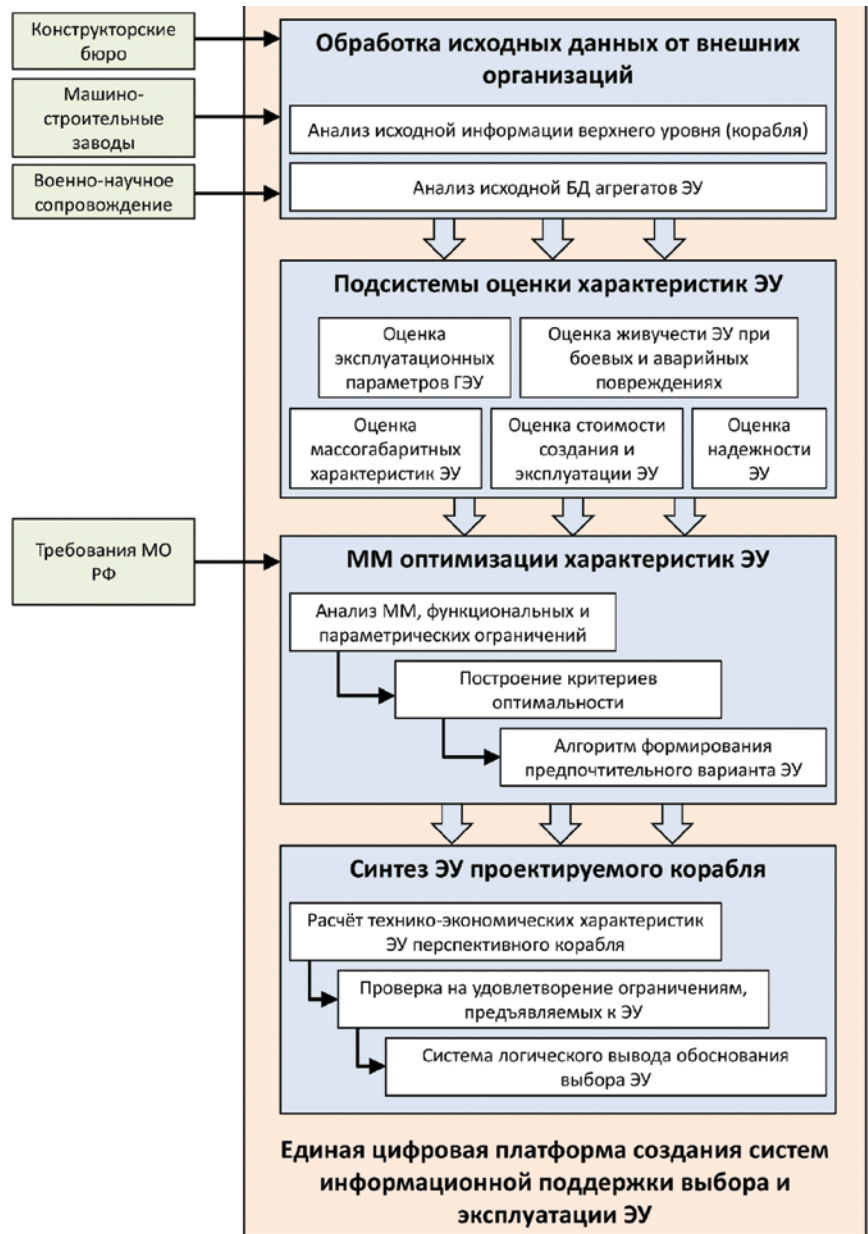


Рис. 1. Архитектура системы информационной поддержки обоснования выбора ЭУ НК на основе цифровой платформы

- интенсивность использования корабля сообразно его целевому назначению, выражающаяся коэффициентом оперативного напряжения;
- спектр скоростей использования корабля в мирное и военное время;
- 2) водоизмещение корабля;
- 3) скорость полного боевого хода, боевого экономического хода и экономическая скорость корабля;
- 4) дальность плавания и автономность корабля, на основании которых рассчитываются запасы топлива.

Анализируя исходную информацию верхнего уровня, следует отметить, что, по сути, указанная информация на концептуальной основе дает основной посыл конструкторам по формированию облика ЭУ перспективного корабля. Так, например, концепция оперативно-тактического использования корабля изначально предопределяет его скоростные и маневренные характеристики, авто-

номность по топливу и ресурсу основных элементов ЭУ до заводского ремонта с учетом районов плавания (ближняя морская зона, морская или океанская зона) [6]. Коэффициент оперативного напряжения корабля также предопределяет такие показатели элементов ЭУ, как безотказность и долговечность, т.е. способность корабля и ЭУ к длительному пребыванию в отдаленных районах плавания и выполнения задач согласно целевому назначению.

С учетом многоцелевого характера использования корабля конструкторам следует особое внимание уделять обеспечению ЭУ малозумных поисковых режимов противолодочной обороны (ПЛО) с выведенными из действия главными механизмами, что, в частности, является предпосылкой для применения в составе ЭУ системы электродвижения.

Спектр скоростей использования корабля также обязывает конструкторов

ров подбирать такой состав маршевых и форсажных главных двигателей, чтобы обеспечивать предусмотренные ТТЗ скорости полного хода, с одной стороны, а за счет работы высокоэкономичных маршевых двигателей обеспечивать основную долю времени (не менее 75%) всех ходовых режимов корабля с минимальными расходами топлива.

Информация о водоизмещении корабля в сочетании со скоростями полного, экономического и боевого экономического хода необходима конструкторам для предварительных расчетов буксировочной кривой (зависимости валовой мощности корабля от развиваемой им скорости хода) методом Адмиралтейских коэффициентов или другими способами, что позволит определить состав главной ЭУ из имеющегося в распоряжении типомощностного ряда главных двигателей и обеспечить расчетные режимы движения корабля.

Дальность плавания – это также информация верхнего уровня, в обеспечение которой конструкторы должны предусмотреть определенные запасы топлива, по возможности минимизируя их, а также состав высокоэкономичных маршевых двигателей.

Перечисленные выше условия являются основополагающими для определения облика ЭУ (типа, состава и схемного исполнения) на ранних этапах исследовательского проектирования корабля.

При обосновании возможных вариантов ЭУ необходимо учитывать множество факторов, среди которых следует выделить следующие:

1. Наличие разработанных и освоенных отечественной промышленностью конкретных тепловых двигателей, приспособленных для использования в качестве судовых и корабельных.

2. Наличие разработанных и освоенных промышленностью редукторных (реверс-редукторных) передач, необходимых для создания агрегатов, объединяющих в составе ГЭУ несколько тепловых двигателей.

3. Наличие разработанных альтернативных двигателей, не связанных с тепловыми процессами (электрические двигатели, ядерные реакторы и др.).

4. Наличие разрабатываемых перспективных тепловых и иных двигателей, проходящих конкретную стадию ОКР, и возможность освоения их серийного производства к началу строительства перспективных кораблей на судостроительных верфях.

5. Возможность или невозможность использования зарубежных технологий с учетом проводимой Западом санкционной политики.

5. Возможность или невозможность использования отработанных схемных решений по ЭУ для боевых кораблей

конкретных классов и водоизмещений.

6. Мировой опыт использования различных схемных решений при формировании облика перспективных ЭУ боевых кораблей [2] с учетом возможности реализации указанного опыта отечественной промышленностью.

На начальном этапе формирования возможных альтернативных схемных решений ЭУ необходимо исходить из объективных реалий, т. е. из имеющегося в распоряжении исследователя или проектанта типомощностного ряда корабельных тепловых двигателей и других элементов ЭУ, освоенных отечественными предприятиями, а также из возможного потенциала их освоения на указанных предприятиях в краткосрочной перспективе.

Кроме того, можно рассматривать элементы ЭУ, которые могут быть разработаны в короткие сроки на основе уже существующих. Например, на основе существующей реверс-редукторной передачи РО55 может быть разработано семейство редукторных передач для более широкого аспекта их использования.

Все указанные выше особенности учитывались при анализе и обосновании потенциально возможных схемных решений для ЭУ перспективных кораблей ВМФ классов корвет, фрегат, эскадренный миноносец и легкий авианосец.

ПОДСИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭУ

Использование принципов системного подхода, где система «корабль–ЭУ» представлена в виде совокупности свойств, приводит к математической модели ЭУ, состоящей из трех основных блоков: технического, блока оценки эффективности ЭУ по назначению и экономического. Целью разработки математической модели является обеспечение проведения исследований, направленных на поиск наиболее целесообразных вариантов ЭУ проектируемых боевых НК. В качестве объекта математического моделирования рассматривается ЭУ как подсистема боевого НК, т. е. система «корабль – ЭУ», функционирующая в определенной окружающей среде.

Реализация в виде компьютерной модели ЭУ позволит использовать ее в системе информационной поддержки обоснования выбора ЭУ надводных кораблей при оценке различных свойств ЭУ:

- *целевые свойства ЭУ*, которые характеризуют ее способность обеспечивать поступательное движение корабля, а также обеспечивать всеми видами энергии заданного качества и в нужном количестве боевых и повседневных потребителей. Основными показателями, характеризующими целевые свойства ЭУ, являются уровень мощности ГЭУ, маневрен-

ные характеристики ГЭУ, экономичность ЭУ, всережимность ЭУ;

- *живучесть ЭУ* характеризует ее стойкость к внешним воздействиям. Под внешними воздействиями понимаются поражающие факторы оружия, разрушительные силы стихии или последствия аварий. Величины воздействий, которые могут иметь место при нормальных условиях эксплуатации (бортовая и килевая качка, температура забортной воды и окружающего воздуха, и т. п.) регламентированы руководящими документами ВМФ;

- *надежность ЭУ* является сложным комплексным свойством, включающим безотказность, ремонтопригодность, долговечность и сохраняемость. Государственными стандартами и руководящими документами ВМФ регламентированы следующие показатели, вытекающие из требований к надежности ЭУ;

- *безотказность*, которая должна обеспечивать определенное время ее непрерывной работы без постоянного местного обслуживания и контроля;

- *долговечность*, которая регламентируется ресурсом основного оборудования ГЭУ до заводского (капитального для ГТД) ремонта, и полным ресурсом (до списания), а также сроком службы основного оборудования до заводского ремонта и полным сроком службы;

- *ремонтопригодность*, под которой понимается свойство корабля, заключающееся в приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению причин отказов и повреждений, восстановлению работоспособности после отказов, эксплуатационных и боевых повреждений, выполнению технического обслуживания и ремонта;

- *сохраняемость*, которая регламентируется временем, в течение которого ЭУ должна сохранять заданные технические характеристики в течение и после хранения в законсервированном состоянии.

Массогабаритные характеристики ЭУ позволяют провести анализ конструкции агрегатов ЭУ и оптимальности размещения их в машинном отделении, эффективность использования показателей массы, отнесенные к величине мощности.

Экономические характеристики ЭУ определяются стоимостными показателями:

- стоимостью разработки ЭУ проектируемого корабля, которая представляет собой составную часть ОКР разработки и создания корабля в целом (СЧ ОКР). Она включает стоимость проектно-конструкторских,

научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;

- стоимостью эксплуатации ЭУ, которая в соответствии с методиками, разработанными 1 ЦНИИ МО РФ и ГШ ВМФ, включает стоимость содержания личного состава, расхода топлива и смазочных масел, обеспечения энергосредствами при стоянке корабля в базе, заводских ремонтов и плановых замен оборудования, снабжения техническим и шкиперским имуществом.

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭУ

Целевым предназначением ЭУ проектируемого корабля является обеспечение предусмотренных ТТЗ скоростей его хода и маневренности, проектной дальности плавания, а также боевых и повседневных потребителей всеми видами энергии заданного качества и в нужном количестве.

С учетом важности придания перспективным многоцелевым НК решения задач ПЛО, что в особенности характерно практически для всех зарубежных кораблей, дополнительным целевым назначением ЭУ следует обозначить возможность обеспечения малозумных поисковых режимов ПЛО с выведенной из действия ГЭУ и отключением от линий вала главных двигателей. Другими словами, ЭУ перспективных кораблей должна иметь обеспечивать ход корабля на поисковых режимах ПЛО без использования наиболее шумящих механизмов ГЭУ, т.е. форсажных главных двигателей и их редукторов, до скоростей хода, на которых акустический шум винтов начинает доминировать над шумом механизмов ГЭУ (~10–14 уз).

Заглядывая в отдаленную перспективу, за пределы 2030 г., когда возможно появление перспективных энергоемких видов оружия и вооружения, потребляющих значительное количество электроэнергии, по мощности соизмеримое с мощностью ГЭУ, не менее важным целевым назначением ЭУ перспективных кораблей будет обеспечение указанных боевых потребителей электроэнергии без существенного увеличения состава основных элементов ЭУ, а также ее габаритов и массы.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что целевым предназначением ЭУ является необходимость решения четырех основных задач, а именно обеспечение:

- 1) предусмотренных ТТЗ скоростей хода (максимального и полного хода, боевой экономической скорости) и маневренности корабля;
- 2) предусмотренной ТТЗ проектной дальности плавания корабля;
- 3) малозумных поисковых режимов ПЛО с выведенной из действия ГЭУ;

4) указанных боевых потребителей электроэнергии без существенного увеличения состава основных элементов ЭУ, а также ее габаритов и массы.

Следует сразу отметить, что последнее целевое предназначение является дискуссионным, о степени его востребованности ответ могут дать только производители перспективных видов оружия и вооружения.

Таким образом, при содержательной постановке задачи оптимизации целевые свойства ЭУ должны быть отражены в показателях эффективности, остальные свойства, относящиеся к работоспособности при внешних воздействиях и к эксплуатационным свойствам, как правило, отражаются независимыми или зависимыми переменными и выносятся в ограничения задачи оптимизации.

В нашем случае будем исходить из того, что концепция оперативно-тактического использования корабля известна и характеризуется следующими основными положениями:

1. Корабль по своему целевому назначению является многоцелевым, т.е. предназначен для решения всего комплекса задач, свойственных боевым НК: нанесения ударов по кораблям и конвоям противника, его береговым объектам, поиск и уничтожения ПЛ противника, оказания огневой поддержки при высадке десантов и др. Для обеспечения боевой устойчивости корабль оснащен оружием самообороны.

2. Корабль используется циклично. Продолжительность большого цикла определена «Положением о циклическом использовании кораблей...» и состоит из суммы назначенного срока службы до заводского ремонта и продолжительности заводских ремонтов.

3. Коэффициент оперативного напряжения задан.

4. Спектр скоростей использования корабля в течение цикла определен.

При решении задачи оптимизации в качестве независимых варьируемых переменных X примем следующие характеристики ЭУ, наиболее предпочтительные значения которых определяют при решении задачи оптимизации:

$x_1 = \{Ne_i^j\}$ – агрегатная мощность i -го главного двигателя j -го типа, кВт;

$x_2 = M$ – масса ЭУ, т;

$x_3 = C^{\text{ЭУ}} = C_{\text{созд}}^{\text{ЭУ}} + C_{\text{экспл}}^{\text{ЭУ}}$ – стоимость создания и эксплуатации ЭУ в течение времени большого цикла, млн. р.;

$x_4 = t_{\text{зр}}^{\text{ГЭУ}} \geq \sum A$ – наработка главных двигателей до среднего ремонта корабля (не должна превышать ресурса ГД до заводского ремонта), ч;

$x_5 = P_{\text{т}}$ – запас топлива, необходимый для обеспечения проектной дальности плавания, т;

$x_6 = v$ – скорость полного хода корабля, уз;

$x_7 = \{n_l^k\}$ – варианты ЭУ, где k – индекс типа ЭУ (КТЭУ, ГТЭУ, ДЭУ, АЭУ, ДГТЭУ), l – тип схемного исполнения ГЭУ (CODAG, COGOG, CODAG, CODOG, CODLAG и др.);

$x_8 = \{Ne_l^k\}$ – агрегатная мощность k -го генератора электроэнергии l -го типа, кВт.

Множество X называют множеством варьируемых переменных задачи оптимизации, имея в виду, что каждая из рассматриваемых переменных варьируется в определенном диапазоне изменения с целью поиска ее оптимального значения.

Переменные x_1 и x_8 , характеризующие агрегатную мощность главных двигателей и генераторов электроэнергии, могут использоваться в двух аспектах:

- когда двигатели и генераторы разрабатаны и освоены промышленностью;
- когда мощностные ряды двигателей неизвестны, т.е. переменные x_1 и x_8 , являются непрерывной функцией. В этом случае одной из частных подзадач оптимизации является обоснование перспективного типомощностного ряда двигателей и генераторов. Во всех дальнейших рассуждениях будем считать, что переменные x_1 и x_8 , являются дискретными и известны конкретные типомощностные ряды двигателей и генераторов.

Множество зависимых переменных Y определяется в процессе формирования альтернативных вариантов системы. Математические выражения для расчета зависимых переменных составляет содержание технического блока математической модели ЭУ и блока оценки эффективности ЭУ по назначению. Таковыми зависимостями переменными, в частности, являются уравнения для оценки:

1) номинальной мощности ГЭУ и мощности ГЭУ на боевой экономической скорости (мощности маршевых двигателей);

2) экономичности корабля;

3) маневренности корабля.

Значения фактической скорости полного или максимального хода корабля могут отличаться от расчетных значений, поскольку суммарная мощность главных двигателей, входящих в состав ГЭУ, должна быть не меньше расчетной для достижения кораблем проектного значения скорости полного хода. Указанное требование проектант обычно удовлетворяет за счет установки ГД из имеющегося в его распоряжении типомощностного ряда. При этом, как правило, случается, что полученная суммарная мощность ГД отличается от расчетного значения. В этом случае приходится корректировать значения скоростей полного и максимального хода корабля для оценки;

4) живучести ЭУ;

- 5) надежности ЭУ;
- 6) массы ЭУ.
- 7) влияния качества ЭУ на показатели боевой и эксплуатационной эффективности корабля.

Требуется выполнить постановку и решение задачи оптимизации основных характеристик ЭУ с целью отыскания наиболее предпочтительного варианта (тип ЭУ, агрегатная мощность составляющих ГД, электрическая мощность генераторов, структурная схема ЭУ). В качестве исходных данных используется информация двух видов. *Первый вид* – это так называемые координирующие сигналы верхнего иерархического уровня:

- 1) водоизмещение проектируемого корабля D ;
- 2) скорость полного хода $v_{пх}$;
- 3) боевая экономическая скорость $v_{бэс}$;
- 4) дальность плавания корабля (если она не является оптимизируемой переменной) S ;
- 5) модель использования корабля:
 - $\kappa_{оп}$ – коэффициент оперативного напряжения;
 - спектр скоростей использования корабля;
 - автономность корабля A_v (по времени непрерывной работы основного оборудования);
 - длительность большого цикла $T_{ц}$.

Указанные данные задаются проектанту, занимающемуся обоснованием облика ЭУ. Кроме вышеперечисленных, проектант использует *данные второго вида*, т.е. информацию, отражающую современное состояние и перспективы развития корабельной энергетики. Многие из указанных исходных данных используются в качестве варьируемых независимых переменных X в задаче оптимизации. В их числе:

- данные по агрегатной мощности современных отечественных и зарубежных двигателей различных типов;
- информация (паспортные данные) по удельным расходам топлива современных тепловых двигателей различных типов;
- данные по ресурсу главных двигателей различных типов.

Конечной целью решения задачи оптимизации является получение оптимального сочетания характеристик на основе анализа технических, экономических и оперативно-тактических аспектов, связанных с созданием и использованием боевых надводных кораблей в составе флота, а также их утилизации после списания.

Из всего множества характеристик ЭУ выделим некоторое ограниченное подмножество, выступающее в задаче оптимизации в качестве множества всех оптимизируемых переменных. Сопоставим каждому набору значений, при-

нимаемых элементов этого множества, некоторый вектор x , компонентами которого будут характеристики ЭУ. Можно утверждать, что каждому значению вектора x соответствует свой вариант ЭУ проектируемого корабля. В данном случае компонентами вектора x могут быть тип главных двигателей, их номинальная мощность (из мощностного ряда), масса и габариты ЭУ и др. Множество значений вектора именуют областью решения задачи.

Можно считать, что характеристики ЭУ, определяемые компонентами вектора x , варьируются независимо друг от друга, т.е. являются независимыми переменными.

Для получения предпочтительного сочетания компонентов вектора x необходимо записать задачу исследования в терминах теории оптимизации. В этих терминах задача оптимизации задается тройкой

$$(F, g, \{X^f\}), \quad (1)$$

где F – множество математических зависимостей, определяющих связи между независимыми и зависимыми переменными; $g: \{X\} \times \{Y\} \rightarrow \{V\}$ – функция качества или целевая функция задачи; $\{X\}$ – множество решений; $\{V\}$ – множество оценок характеристик ЭУ, которое предполагается линейно или частично упорядоченным отношением вида $\leq$ или $\geq$; $\{X^f\}$ – множество переменных, определяющих область допустимых решений.

Сужение множества $\{X\}$ обусловлено необходимостью удовлетворить системе ограничений, обеспечивающих содержательность математической модели ЭУ. К ограничениям в нашем случае могут относиться ограничения по габаритам и массе ЭУ, по ресурсу главных двигателей и т.п.

Функцию $g(x)$ называют также критерием оптимальности, определяя ее как количественную меру качества варианта ЭУ, образующегося в каждой точке варьирования характеристик установки.

Решением задачи оптимизации, в данном случае однокритериальной, заданной тройкой (1), называется элемент $\hat{x} \in \{X^f\}$, представляющий собой l -мерный вектор, компонентами которого являются наиболее предпочтительные значения характеристик ЭУ корабля.

Введение в рассмотрение критериальной функции означает установление соответствия между качественной шкалой предпочтения на альтернативных вариантах решения задачи, в данном случае вариантах ЭУ, и количественными значениями целевой функции, вычисляемыми относительно каждого из этих вариантов.

Решение задачи оптимизации следует рассматривать с двух точек зрения: с математической и с проектной. Согласно первой – решение задачи достигается безотносительно к смыслу, вкладывае-

мому в функции g и F . Однако с проектной точки зрения этот вопрос является достаточно актуальным.

Из вышеизложенного можно видеть, что основной задачей, которая решается при обосновании вариантов ЭУ проектируемого корабля, является поиск компромисса между различными свойствами ЭУ. В связи с этим основным содержанием задачи оптимизации, в результате которой формируется наиболее предпочтительный вариант ЭУ, будет процесс разрешения противоречий между его основными свойствами.

Наиболее полно идее поиска компромисса отвечают многокритериальные задачи оптимизации (МКЗО), которые возникают при рассмотрении сложных систем. Причем их сложность определяется либо развитостью структуры системы, когда различным элементам отвечают разные критерии эффективности, либо когда рассматриваются многоцелевые системы, когда каждой из решаемых системой задач может быть сопоставлен свой критерий эффективности.

При решении МКЗО кроме аксиомы выбора добавляется еще одно условие, определяющее вид используемой для решения функции выбора. Наиболее часто вид указанной функции принимается в форме свертки частных критериев эффективности.

МКЗО, отвечающая идее поиска компромисса, может задаваться четырьмя множествами:

$$(\{F\}, \{g\}, G, \{X^s\}), \quad (2)$$

где $\{F\}$ – множество математических моделей, определяющих альтернативные варианты системы и ее элементов, $\{g\}$ – множество частных критериев эффективности, G – свертка частных критериев, $\{X^s\}$ – множество сочетаний значений управляемых переменных, принадлежащих области Парето.

СИНТЕЗ ЭУ ПРОЕКТИРУЕМОГО КОРАБЛЯ

Качественным отличием задачи синтеза от задачи анализа является то, что в результате ее решения рассматривается значительно большее количество информации о состоянии системы. Раскрывая заложенную в задаче синтеза неопределенность с точностью до альтернативы, получаем принципиально большую информацию, чем на том же уровне аппаратных средств можно получить в результате решения задачи анализа, когда имеется в виду, что объект анализа уже существует и единственен. Учитывая указанную особенность, можно утверждать, что развитие методов обоснования облика ЭУ проектируемых кораблей связано прежде всего с совершенствованием механизмов получения большого количества информации, обеспечивающей всесторонний анализ

синтезируемых вариантов в интересах их последующей сравнительной оценки.

Таким образом, при постановке задачи синтеза облика ЭУ необходимо изначально предположить, что ее тип и варианты схемного исполнения заранее неизвестны.

Выбор наиболее предпочтительного варианта ЭУ оказывается непосредственно связанным с оценкой соответствия цели ее создания. В данном случае можно считать, что наилучшим образом отвечает замыслу проекта тот вариант ЭУ, которому соответствует наименьшее значение отношения вида

$$g = \frac{C}{E}, \quad (3)$$

где C – стоимость создания и эксплуатации ЭУ; E – показатель эффективности решения ЭУ задач, соответствующих цели ее создания.

В связи с большим числом возможных альтернативных вариантов ЭУ боевых НК особенно актуальным становится решение задач выбора наиболее предпочтительного варианта. В данном случае под термином вариант ЭУ подразумевается ее тип (КТЭУ, ГТЭУ, ДЭУ, АЭУ, ДГТУ и др.), состав (одномашинная, многомашинная и пр.), а также схемное исполнение (CODAG, COGAG, GODLAG, COSAG и др.).

Обоснованность тех или иных техни-

ческих решений при выборе облика ЭУ перспективного корабля может быть установлена только путем оценки их влияния на комплекс ТТХ корабля и через него на эффективность, возможность и стоимость создания и содержания с конкретным вариантом ЭУ [6]. Подобный подход не нов, он получил достаточно широкое распространение при исследовательском проектировании кораблей, основной задачей которого является получение оптимального сочетания комплекса ТТХ.

Задача синтеза используется исключительно в целях проектирования. Здесь в качестве аргументов математической модели выступает формализация наперед задаваемых свойств, а сочетание получаемых значений функции и ее аргументов дают необходимую информацию для получения облика проектируемого объекта.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДСИСТЕМ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭУ ПРОЕКТИРУЕМОГО КОРАБЛЯ

Целью формирования концептуальной модели для решения задачи информационной поддержки обоснования выбора ЭУ является формирование единого подхода к разработке частных и комплексной методик прогнозирования тактических, технических и стоимостных характеристик жизненного цикла основного корабельного энергетического оборудо-

вания (ЭО) на основе использования имитационного моделирования, баз знаний с реализацией в системе информационной поддержки принятия решений при проектировании и эксплуатации.

На этапах раннего проектирования кораблей целесообразна реализация двухуровневой схемы применения ряда частных методик и имитационных моделей для оценки и решения следующих задач:

- тактико-техническое обоснование показателей оперативной напряженности цикличного использования кораблей (коэффициент оперативного использования, коэффициент оперативной напряженности, коэффициент технической готовности и др.);
- функционально-стоимостная оценка создания основного корабельного ЭО;
- оценка технического уровня и конкурентоспособности альтернативных вариантов основного ЭО, систем автоматического управления, диагностических средств, средств подготовки личного состава, информационных систем интегрированной логистической поддержки и др. [5];
- применение стоимостного инжиниринга (СИ) процессов создания основного ЭО [1];
- имитационное моделирование ПК корабля для решения задач опти-

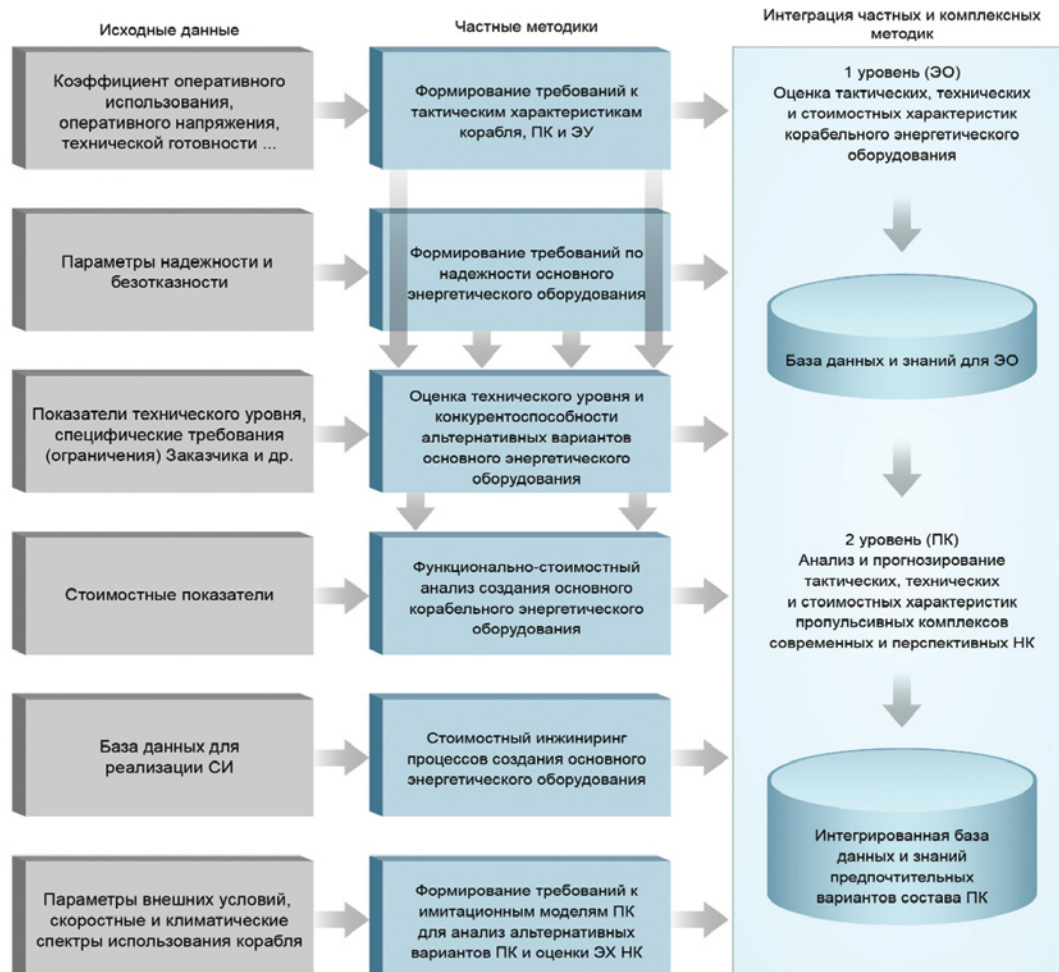


Рис. 2. Концептуальная схема формирования частных и комплексной методик

Оценка технического уровня ГТД до 13000 кВт												
Показатель	Весовой коэф-т	М75РУ	М70ФРУ	М70ФРУ-2	571KF	М70ФРУ-Р	ДС77	LM500	ДП79	ДП71	ДС71	ДС76
Комплексная оценка Диаграмма по интегральному показателю «качество/стоимость»		0.68 хорошо	0.67 хорошо	0.56 допустимо	0.55 допустимо	0.52 допустимо	0.50 допустимо	0.49 допустимо	0.47 допустимо	0.44 допустимо	0.41 допустимо	0.33 плохо
Технические характеристики Диаграмма по параметрам группы	1.00	0.60 допустимо	0.66 хорошо	0.50 допустимо	0.55 допустимо	0.62 допустимо	0.50 допустимо	0.49 допустимо	0.47 допустимо	0.44 допустимо	0.41 допустимо	0.33 плохо
Мощность ГТД, кВт	0.90	5150 (0.42)	8830 (0.81)	7350 (0.69)	6100 (0.54)	8090 (0.81)	8800 (0.81)	4775 (0.36)	8800 (0.81)	7350 (0.69)	7350 (0.69)	3360 (0.16)
Частота вращения выходного фланца, мин ⁻¹	0.20	6500 (0.63)	6174 (0.57)	7200 (0.56)	-	4700 (0.79)	7300 (0.55)	-	7000 (0.58)	10000 (0.20)	4750 (0.79)	8600 (0.35)
Удельная масса ГТД, кг/кВт	0.20	0.437 (0.75)	0.490 (0.69)	0.585 (0.58)	0.185 (0.90)	0.881 (0.16)	0.511 (0.67)	0.190 (0.90)	0.511 (0.67)	0.422 (0.51)	0.612 (0.55)	0.744 (0.35)
Удельный объем, занимаемый ГТД, м ³ /кВт	0.20	0.0008 (0.81)	0.0012 (0.73)	0.0017 (0.60)	0.0006 (0.84)	0.0037 (0.03)	0.0019 (0.54)	0.0004 (0.87)	0.0017 (0.60)	0.0020 (0.51)	0.0020 (0.51)	0.0024 (0.37)
Удельный расход топлива на номинальном режиме, г/кВт	0.80	255.0 (0.71)	237.0 (0.89)	260.0 (0.63)	249.0 (0.79)	272.0 (0.38)	272.0 (0.38)	269.0 (0.45)	255.0 (0.71)	263.0 (0.58)	281.0 (0.18)	291.0 (0.04)
КПД, %	0.80	31.6 (0.66)	34.0 (0.82)	31.0 (0.61)	32.3 (0.72)	29.6 (0.46)	29.6 (0.46)	29.9 (0.49)	31.6 (0.66)	30.6 (0.57)	28.7 (0.35)	27.7 (0.23)
Назначенный ресурс до капитального ремонта, ч	0.80	20000 (0.80)	20000 (0.80)	4000 (0.20)	20000 (0.80)	20000 (0.80)	20000 (0.80)	20000 (0.46)	10000 (0.46)	10000 (0.46)	10000 (0.46)	10000 (0.46)
Назначенный ресурс до списания, ч	0.80	40000 (0.80)	40000 (0.80)	8000 (0.20)	40000 (0.80)	40000 (0.80)	20000 (0.46)	40000 (0.46)	20000 (0.46)	20000 (0.46)	20000 (0.46)	20000 (0.46)
Время изготовления, мес	0.50	8 (0.65)	8 (0.65)	8 (0.65)	6 (0.80)	8 (0.65)	12 (0.20)	6 (0.80)	12 (0.20)	12 (0.20)	12 (0.20)	12 (0.20)
Уровень информационной поддержки	0.20	2 (0.43)	2 (0.43)	2 (0.80)	2 (0.43)	4 (0.80)	1 (0.20)	2 (0.43)	1 (0.20)	1 (0.20)	1 (0.20)	1 (0.20)
Контролепригодность, поставка с ЛСУ	0.70	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)
Наличие диагностирования	0.70	да (0.50)	да (0.50)	да (0.50)	да (0.50)	да (0.50)	нет (0.50)	да (0.50)	нет (0.50)	нет (0.50)	нет (0.50)	нет (0.50)
Серийность	0.00	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)
Возможность увеличения мощности при сохранении ресурса	0.60	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)
Отечественная разработка	1.00	да (0.80)	да (0.80)	да (0.80)	нет (0.20)	да (0.80)	нет (0.20)	нет (0.20)	нет (0.20)	нет (0.20)	нет (0.20)	нет (0.20)
Наличие реверса	1.00	нет (0.20)	нет (0.20)	нет (0.20)	нет (0.20)	да (0.80)	да (0.80)	нет (0.20)	нет (0.20)	нет (0.20)	да (0.80)	да (0.80)
Стоимостные характеристики Диаграмма по параметрам группы	0.50	0.85 очень	0.70 хорошо	0.73 хорошо		0.36 плохо						

Рис. 3. Пример сравнительной таблицы, рассчитанной с учетом экспертных оценок показателей с выводом комплексной оценки по каждому элементу ЭО

мального выбора конструктивных схем компоновки ГЭУ, анализа и прогнозирования эксплуатационных характеристик ПК.

Концептуальная схема формирования частных и комплексной методик показана на рис. 2.

На первом уровне концептуальной схемы предусматривается использование квалиметрической оценки ЭО современных и перспективных надводных кораблей ВМФ по технико-экономическим показателям.

Программная реализация унифицированного алгоритма квалиметрической оценки предусматривает следующую функциональность:

1. Ввод и запись в БД объективных показателей элементов ЭО по соответствующим группам (технические, стоимостные характеристики и т. д.).

2. Использование целочисленных, вещественных или бинарных параметров с заданным интервалом допустимых значений для ввода характеристик.

3. Формирование экспертных оценок в соответствии с уровнями «хорошо» и «плохо» для показателей и запись их в БД.

4. Вызов информации, связанной с описанием интересующего элемента ЭО, с использованием гиперссылок.

5. Создание различных вариантов сравнений по заданным экспертами наборам показателей с возможностью назначения для них весовых коэффициентов, учитываемых при расчете комплексной оценки.

6. Ввод ограничений (фильтров) для формирования выборки элементов ЭО при их оценке.

7. Вывод результатов оценки элементов ЭО в табличном виде и гра-

фически с помощью лепестковой диаграммы.

Работа с программным модулем заключается в формировании данных на нескольких этапах:

1. Определение и ввод структуры показателей (технических, стоимостных и т. д.).

2. Создание групп однотипных элементов ЭО в БД, добавление элементов в группу и заполнение характеристик элементов ЭО в соответствии с имеющейся документацией для дальнейшего их сравнения.

3. Выставление экспертами оценок в виде задания значений параметров с уровнями «хорошо» и «плохо» по всему исследуемому ЭО и запись их в базу данных.

4. Добавление различных вариантов сравнений по заданным эксперта-

ми группам показателей и назначение для них весовых коэффициентов.

5. Ввод фильтров для формирования выборки элементов, участвующих в сравнении.

6. Вывод результатов комплексной оценки элементов ЭО.

Предложенный подход должен обеспечить формирование и программную реализацию информационную поддержку лица, принимающего решение (ЛПР) широкого спектра задач, связанных с выбором предпочтительных (условно-оптимальных) вариантов ЭО различного назначения с применением современных информационных технологий.

Программная реализация и примеры графического интерфейса макетного образца подсистемы выбора предпочтительных вариантов ЭО представлены на рис. 3–5.

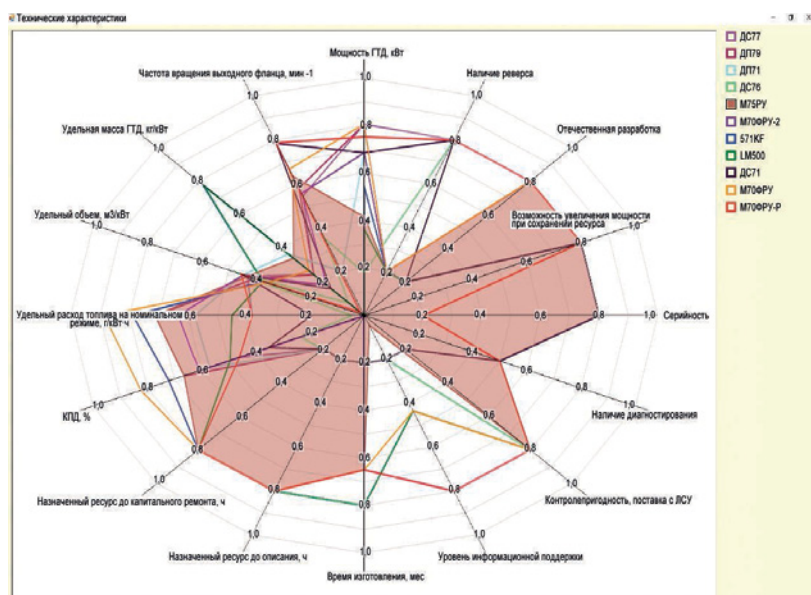


Рис. 4. Пример отображения результатов оценки с помощью лепестковой диаграммы

На втором уровне предложенной концептуальной схемы должна решаться задача выбора предпочтительных вариантов конструктивных схем ГЭУ современных и перспективных кораблей ВМФ [3]. Ключевым понятием на втором уровне является прогнозирование функциональных характеристик ПК корабля, которое невозможно без использования современных методов математического имитационного моделирования [4].

Пример программной реализации пользовательского интерфейса для математического моделирования характеристик ПК корабля представлен на рис. 6–7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка системы информационной поддержки обоснования выбора наиболее предпочтительных вариантов ЭУ перспективных боевых НК, в соответствии с предложенной концепцией позволит получить следующие результаты:

1. Обосновать состав тепловых двигателей и других агрегатов, освоенных либо осваиваемых отечественными энергомашиностроительными предприятиями, на основе которых могут быть разработаны и созданы ЭУ перспективных боевых НК основных классов: корвет, фрегат, эскадренный миноносец и авианосец.

2. Разработать возможные схемные решения по «облику» ЭУ перспективных боевых НК ВМФ основных классов.

3. На основе разработанной математической модели обосновать тип, состав, схемное исполнение и основные технико-экономические характеристики наиболее предпочтительных вариантов ЭУ перспективных боевых НК основных классов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астратова Г.В., Латыпова Л.В. Квалиметрия: Методы количественного оценивания качества различных объектов: учеб. пособие. – Сургут: РИО СурГПУ, 2014. – 160 с.
2. Барановский В.В., Никитин В.С., Половинкин В.Н. Современное состояние и перспективы развития энергетических установок крупных кораблей ВМС иностранных государств // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 2016. – № 94 (378). – С. 125–148.
3. Печковский П.Г., Ивашкин Г.И. Концептуальные основы выбора предпочтительной ГЭУ перспективных боевых надводных кораблей дальней морской зоны. – Сб. науч. трудов конфер. ВКОР-2019. – Т. 4.
4. Печковский П.Г., Пыльнев Ю.В., Кирюхин И.А., Новожилов Н.Ю. Современные информационные технологии в обеспечении технической эксплуатации и живучести судов арктической зоны // Морская наука и техника. – 2025. – № 20. – С. 32.
5. Печковский П.Г. Прогнозирование так-

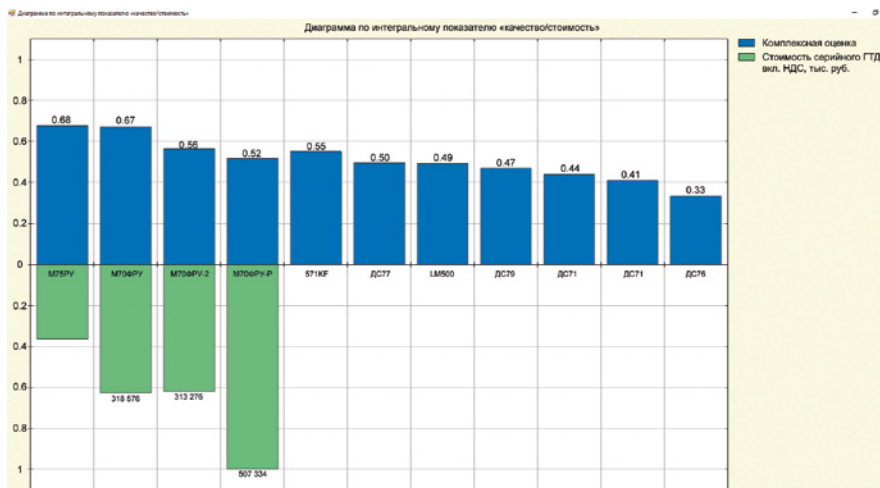


Рис. 5. Пример диаграммы по интегральному показателю «качество/стоимость»

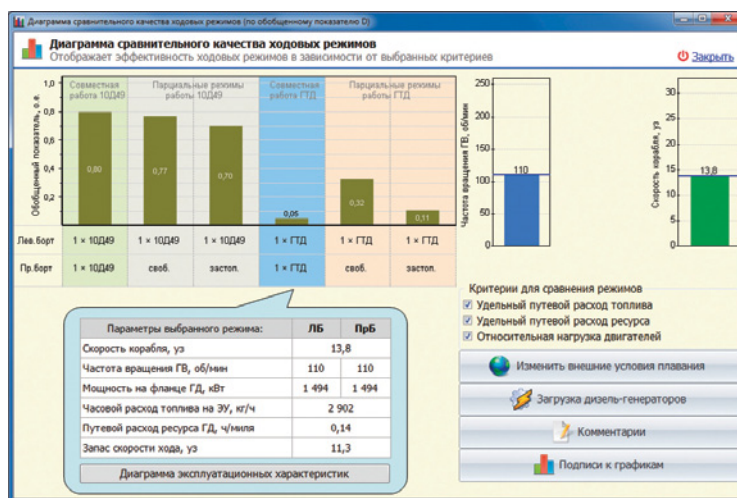


Рис. 6. Пример гистограммы сравнительного анализа качества ходовых режимов использования ГЭУ пр. 22350

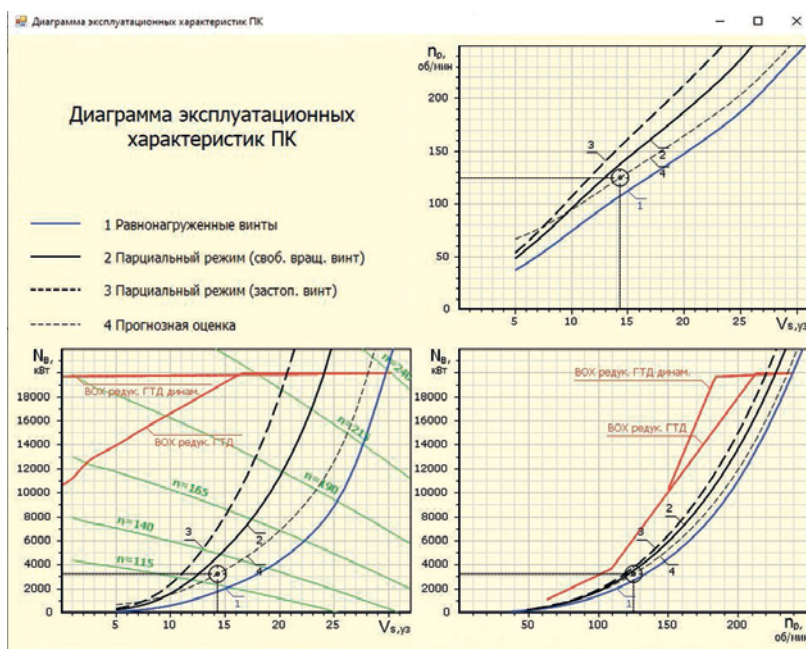


Рис. 7. Пример диаграммы эксплуатационных характеристик

тических, технических и стоимостных показателей корабельных энергетических установок на стадиях проектирования и эксплуатации надводных кораблей. – Доклад на Международ. военно-техни-

ческом форуме «Армия–2019».

6. Половинкин В.Н., Попов Л.Н. Обоснование критериев предельного состояния технических средств корабля. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2008. ■

АО «Компрессор» было основано в 1877 г. как завод по производству артиллерийского вооружения для российских армии и флота. Шестьдесят лет назад, в декабре 1959 г. согласно решению Совета Министров РСФСР № 159 Специальное конструкторское бюро СКБ-103 Ленинградского компрессорного завода № 103 преобразовано в Центральное конструкторское бюро ЦКБ «Компрессор» – самостоятельную базовую, единственную в стране проектную организацию, осуществляющую разработку компрессоров и компрессорных станций высокого давления для кораблей и судов всех классов. В настоящее время входит в состав холдинга АО «Компрессор».

За время существования ЦКБ «Компрессор» разработаны различные типы специализированных компрессоров и компрессорных станций: свободнопоршневые дизель-компрессоры и станции, кривошипно-шатунные и аксиально-поршневые электрокомпрессоры и станции, винтовые, мембранные компрессоры для сжатия воздуха и различных газов (водород, природный газ, азот, кислород) на различные уровни давления от 0,1 до 40,0 МПа.

На инновационные конструкторские решения получено 440 патентов на изобретения. На протяжении истории ЦКБ «Компрессор» являлось головным разработчиком серийного компрессорного оборудования для отечественного судостроения, и по настоящее время АО «Компрессор» занимает лидирующие позиции по разработкам и поставкам специализированных компрессоров для подводных лодок и кораблей ВМФ.

Оборудование АО «Компрессор» также было успешно использовано в составе наземных сооружений ВМФ и МО РФ – базы в п. Гаджиево и г. Вилючинске, применяется на космодромах «Байконур», «Плесецк», «Восточный», атомных электростанциях, в том числе зарубежных «Бушер», «Куданкулам». Оборудование установлено и надежно работает на компрессорных станциях магистральных газопроводов Ухта–Торжок, Бованенково–Ухта, Севе́ро-восточный газопровод, Южный поток, Чайнинское НГКМ, Бованенковское НГКМ и др.

Производственная номенклатура АО «Компрессор» включает широкий ряд серийных специализированных судовых компрессоров. Для создания вакуума в исследовательских и производственных целях, а также в системах регенерации помещений с вредной атмосферой используются герметичные газоплотные поршневые компрессоры моделей ГКВ2 А, ЭКГ0,25/100,

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ МЕМБРАННЫХ КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ В СУДОСТРОЕНИИ

Л. Г. Кузнецов, д-р техн. наук, проф., ген. конструктор,
А. В. Бураков, начальник ЦКБ,
Д. С. Михайлов, начальник отдела,
П. А. Белов, инженер,
Ю. А. Чукичев, инженер-конструктор,
М. Д. Смогарев, ст. инженер,
АО «Компрессор»,
контакт. тел. (812) 295 5090, office@compressor.spb.ru

ЭК0,9 В и ЭК0,9 В ПТ и др. Однако там, где требования к чистоте газа становятся определяющими, применяются мембранные компрессорные машины.

Принципиальное отличие мембранных компрессоров от поршневых заключается в полной герметизации полости сжатия. Рабочим органом в них служит гибкая металлическая мембрана, совершающая возвратно-поступательные движения под действием гидропривода. Газ сжимается в замкнутой полости, отделенной мембраной от приводной системы, что полностью исключает контакт рабочего газа с маслом, его парами, механическими частицами изнашивающихся деталей и атмосферой [1]. Так же важным преимуществом компрессоров такого типа является возможность достижения высоких давлений при минимальном количестве ступеней сжатия, что обусловлено малой относительной величиной мертвого пространства, составляющей всего 2,5–3,5% в то время как у поршневых компрессоров этот показатель достигает 6–12%. Малое мертвое пространство напрямую влияет на объемный КПД компрессора и позволяет достигать степеней сжатия до 30 в одной ступени без существенного снижения производительности [2].

Поэтому в случаях, когда к чистоте сжимаемого газа предъявляются особые жесткие требования, исключающие присутствие паров смазочного масла, воды, пыли и других примесей, на кораблях и судах ВМФ применяются мембранные компрессоры производства АО «Компрессор». Полная герметичность полости сжатия в таких компрессорах позволяет безопасно работать с чистыми, агрессивными и взрывоопасными газами, включая кислород, закись азота, фтор, хлор и другие.

Технические характеристики серийных мембранных компрессоров, изготавливаемых АО «Компрессор», приведены в таблице.

Ввиду высоких требований по стойкости к внешним воздействиям и виброшумовым характеристикам мембранные компрессоры типа ЭКГМ (рис. 1–2) имеют большую производительность, мощность и массогабаритные характеристики. Особенностью данного оборудования является уравновешенная оппозитная компрессорная база с соосным расположением рядов гидроцилиндров, при этом инерционные силы противолежащих рядов компенсируются и не передают вибрации на фундамент.

Основными областями применения компрессоров типа ЭКГМ являются пе-

Таблица

**Технические характеристики мембранных
электрокомпрессоров и установок**

Характеристика	ЭКГМ 35/200Р	ЭКГМ 350/350	ЭКГМ 200/220	ЭКГМ 140/280	ДКУ 18/30-300
Рабочая среда	Азот, аргон, воздух	Азот, аргон, воздух	Кислород	Кислород	Кислород, азот, воздух
Производительность, м ³ /ч	35	350	200	140	18
Начальное давление, МПа (кгс/см ²)	1,2 (12)	1,2 (12)	1,2 (12)	2,5 (25)	1,2 (12)
Конечное давление, МПа (кгс/см ²)	19,6 (200)	34,3 (350)	21,6 (220)	27,4 (280)	29,4 (300)
Мощность электродвигателя потребляемая, кВт	30	30	36	38	3
Масса, кг	4510	5100	5400	5300	175
Габаритные размеры Д×Ш×В, мм	2200× 480×1600	2500× 1450×1880	2320× 1550×1880	2100× 1500×1880	960× 470×840

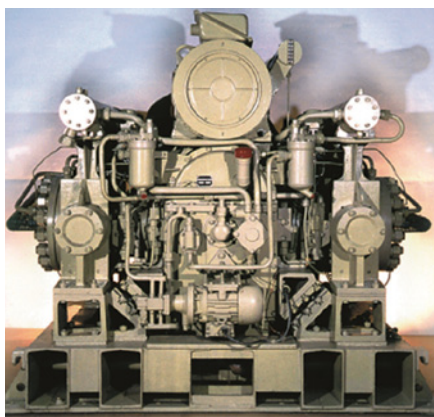


Рис. 1. Мембранная компрессорная установка азотная ЭКГМ350/350

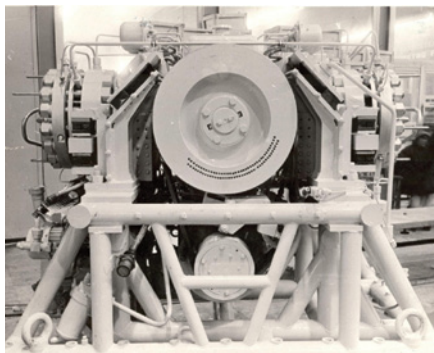


Рис. 2. Мембранная компрессорная установка кислородная ЭКГМ200/220



Рис. 3. Мембранная компрессорная установка азотная ЭКГМ35/200 Р

рекачка газообразного азота на кораблях ВМФ, включая авианесущие крейсера пр. 1143 и атомные ракетные крейсера пр. 1144, а также подача газообразного медицинского кислорода высокого давления в судовые системы и объекты.

АО «Компрессор» осуществляет поставку мембранных газовых электрокомпрессоров ЭКГМ 35/200Р (рис. 3) для АО «ОКБМ Африкантов», входящего в машиностроительный дивизион Росатома – «Атомэнергомаш». АО «ОКБМ Африкантов» выступает разработчиком и комплексным поставщиком интегральной реакторной установки РИТМ-200 для головных и серийных ледоколов пр. 22220 (ЛК-60) [3].

Строительство ледокола «Арктика» типа ЛК-60Я ведется на АО «Балтийс-

кий завод» по заказу ФГУП «Росатомфлот». Разработчиком пр. 22220 является ЦКБ «Айсберг». Ледоколы этого проекта мощностью 60 МВт станут самыми большими и мощными в мире. Они могут обеспечивать проводку судов по Северному морскому пути для доставки углеводородного сырья с месторождений Ямальского, Гыданского полуостровов и с шельфа Карского моря на рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона. Длина судна составит 173,3 м, ширина 34 м, водоизмещение 33,5 тыс. т. Головной ледокол проекта – «Арктика», первые два серийных ледокола – «Сибирь» и «Урал».

Электрокомпрессор ЭКГМ 35/200Р производства АО «Компрессор» по совокупности уникальных свойств для применения в системе обеспечения реакторной установки ледокола пр. 22220 чистым азотом не имеет аналогов, относится к оборудованию 2 класса безопасности и имеет одобрение Филиала по атомным судам РМРС.

Дожимающая компрессорная установка ДКУ18/30–300 (рис. 4) предназначена для наполнения малолитражных баллонов и опорожнения сосудов высокого давления с медицинским кислородом. В отличие от высокопроизводительных установок серии ЭКГМ, ДКУ18/30–300 представляет собой однорядный одноступенчатый мембранный компрессор жидкостного типа. Ключевой особенностью эксплуатации, определившей такую конструкцию, является цикличность работы и необходимость ручной замены баллонов. Это обусловило отказ от системы автоматического управления и способствовало снижению стоимости оборудования при сохранении высокой надежности. Простота конструкции обеспечивает легкость обслуживания и минимальные требования к квалификации обслуживающего персонала.

Стоит отметить то, что основной рабочей средой ДКУ18/30–300 (рис. 4) является газообразный медицинский кислород, поэтому в конструкции применены материалы для деталей, непосредственно соприкасающихся с газообразным кислородом, полностью отвечающие требованиям ГОСТ 12.2.052–81.

В настоящее время научно-исследовательские работы в области мембранных компрессоров активно ведутся как отечественными [4, 5], так и зарубежными производителями [6, 7]. Ключевые направления исследований включают повышение ресурса металлических мембран, достижение более высоких рабочих давлений, а также оптимизацию процесса сжатия технологических газов, таких как водород и гелий.



Рис. 4. Дожимающая компрессорная установка ДКУ18/30–300

АО «Компрессор» активно ведет разработки нового компрессорного оборудования, отвечающего требованиям технологичности, безопасности и конкурентоспособности на рынке современного машиностроения. Разрабатываются мембранные компрессоры на давление 70–90 МПа для газозаправочных станций водорода. Разрабатываются мембранные компрессоры на класс давления 20 МПа для радиоактивных газов.

В условиях современного рынка потребителей энергетического оборудования приоритетными являются удельные характеристики, а именно высокая производительность и малые массогабаритные характеристики.

АО «Компрессор» разработало для нужд ВМФ и применения в проектах АО «ЦМКБ «Алмаз» новую, отличающуюся от предыдущей линейки, мембранную компрессорную установку с приемкой РМРС – МКУ-200 с параметрами, указанными ниже.

Основные параметры МКУ-200

Характеристика	Значение
Индекс	МКУ-200
Рабочая среда	Азот, инертные газы, гелий высокой чистоты, смеси указанных газов
Производительность, м ³ /ч	2
Начальное давление, МПа (кгс/см ²)	Атмосферное
Конечное давление, МПа (кгс/см ²)	19,6 (200)
Мощность потребляемая, кВт	6
Масса, кг	440
Габаритные размеры, Д×Ш×В, мм	1000×1000×1000

Мембранная компрессорная установка МКУ-200 (рис. 5 и рис. 6) представляет собой современное и надежное решение для задач сжатия и перекачивания чистых газов, таких как воздух, азот и гелий высокой чистоты. Ее ключевое назначение – опорожнение и наполнение баллонов высокого давления, где исключительная чистота газа является критическим требованием.

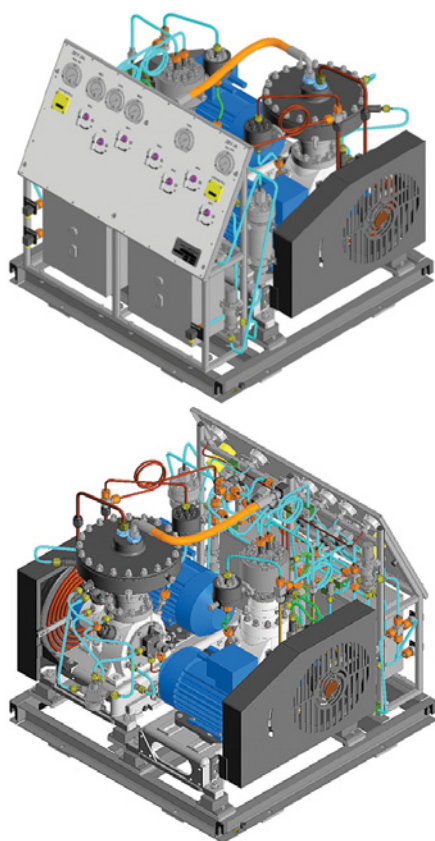


Рис. 5. 3D модель мембранной компрессорной установки MKU-200



Рис. 6. Мембранная компрессорная установка MKU-200. Общий вид

Данная установка состоит из двух последовательно соединенных одно-рядных одноступенчатых мембранных компрессора – низкого (ДКУ-30) и высокого (ДКУ-200) давления, смонтированных на общей раме вместе со щитом управления. Привод каждого компрессора осуществляется от отдельного электродвигателя мощностью 3 кВт через клиноременную передачу. Для безопасного включения электродвигателей применяются электромагнитные пускатели. Благодаря своему общеклиматическому морскому исполнению (ОМ4) и соответствию требованиям РМРС, MKU-200 может эксплуатироваться на судах в широком диапазоне условий: от минус 20 до плюс 45 °С. Безопасность эксплуатации обеспечивается комплексом встроенных систем, включая предохранительные клапаны на газовых и жидкостных трактах, а также визуальные указатели прорыва мембран, которые мгновенно сигнализируют о разгерметизации. Управление установкой ручное, осуществляется оператором с помощью запорных вентилей на щите управления, что обеспечивает простоту и надежность контроля над процессом работы. Таким образом, MKU-200 сочетает в себе компактность, полную заводскую готовность и высочайшую степень защиты газа от примесей, занимая свою нишу в арсенале специализированного компрессорного оборудования для судостроения и других ответственных отраслей.

В процессе разработки MKU-200 были проведены сравнение и выбор наиболее оптимальных из ранее известных методик расчета мембранных компрессоров [1], проанализированы существующие аналоги и технологии и выбрана наиболее простая надежная и безопасная конструкция, что позволило создать эффективный компрессор.

На этапе разработки и проектирования MKU-200 особое внимание было уделено проведению прочностных расчетов основных узлов конструкции. В связи с компактными габаритами компрессора и работой в зоне высоких давлений такие ключевые компоненты, как шейка коленчатого вала, плунжер, поршневой палец, мембранный блок и сами мембраны, подвергаются значительным механическим нагрузкам, что требует обеспечения достаточного запаса прочности. Дополнительной задачей было достижение полного соответствия всех элементов компрессора требованиям РМРС [8].

В процессе проектирования прочностные расчеты выполнялись с применением как классических методов математического анализа и инженер-

ных расчетов, так и современных программных комплексов компьютерного инжиниринга (SolidWorks, ANSYS) [5]. Проведенные исследования подтвердили соответствие критических узлов и деталей установленным требованиям по прочности, что гарантирует надежную и стабильную работу компрессора в условиях эксплуатации.

Таким образом, мембранная компрессорная установка MKU-200 разработанная и изготовленная силами АО «Компрессор» полностью отвечает современным требованиям рынка потребителей продукции машиностроительных производств, пополняет линейку мембранных компрессоров АО «Компрессор» и позволяет РФ достичь технологического суверенитета и независимости в сегменте компактных судовых установок высокого давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтухов С.М., Румянцев В.А. Мембранные компрессоры. – М.: Машиностроение, 1967. – 128 с.
2. Френкель М.И. Поршневые компрессоры: теория, конструкции и основы проектирования. – М. – Л.: Машгиз, 1960. – 654 с.
3. Применение дожимающих мембранных компрессорных установок для технических газов на заказах ВМФ/Кузнецов Л.Г., Бураков А.В., Михайлов Д.С. и др. // Морской вестник. – 2020. – № 1 (73). – С. 61–63. – EDN CUMAMQ.
4. Кузнецов В.И., Щука И.О. Оптимизация работы мембранного блока компрессора, перекачивающего газ и жидкость в ракетных комплексах, с применением ИКТ посредством программы расчета скачка давления // Омский научный вестник. – Сер.: Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2022. – Т. 6. – № 3. – С. 9–16. – DOI 10.25206/2588-0373-2022-6-3-9-16. – EDN NTPDHN.
5. Calculation and research of the diaphragm compressor main elements / Lebedev A., Fateeva E., Kozhukhov Y. et al. – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20–22 октября 2020 г. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 012086. – DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012086. – EDN AIYTOQ.
6. Study on the characteristics of a novel wrap-around cooled diaphragm compressor for hydrogen refueling station / Zhao Zh., Wang G., Zhang J., Tian Ya. // Case Studies in Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 56. – P. 104242. – DOI 10.1016/j.csite.2024.104242. – EDN ZOGAON.
7. Ting Wang, Zhou Tang, Xiaohan Jia. Study on the stress and deformation of a diaphragm compressor cylinder head under extreme conditions. – 11th International Conference on Compressors and their Systems, 2019. City, University of London.
8. Правила классификации и постройки морских судов. – Ч. IX: Механизмы, 2019.

Освоение арктического региона, обусловленное как экономическими интересами (разработка ресурсов, использование Северного морского пути), так и стратегическими целями государств [1], сопряжено с уникальными рисками, среди которых пожар на борту корабля (судна) – один из наиболее критических. Удаленность от сил спасения, экстремальные погодные условия (температуры до -50°C , обледенение, штормы) и высокая концентрация легковоспламеняющихся материалов (топливо, смазочные масла) создают ситуацию, где стандартные методы пожаротушения зачастую неэффективны.

Анализ проблемы пожаротушения в Арктике показал [2–4], что тушение пожаров в условиях Крайнего Севера имеет ряд фундаментальных сложностей, которые активно изучает научное сообщество:

- *энергонасыщенность объектов*: модули арктических объектов, включая корабельные (судовые), характеризуются повышенным отношением потребляемой мощности к объему, что ведет к повышенному риску возникновения пожаров [4];
- *климатические условия*: экстремально низкие температуры осложняют использование воды и оборудования для ее подачи, что требует применения низкотемпературных огнетушащих составов и специального морозостойкого оборудования;
- *ограниченность ресурсов*: невозможность оперативной помощи извне и ограниченность людских ресурсов на удаленных объектах диктуют необходимость в автономных мобильных комплексах, способных перемещаться от объекта к объекту и не требующих доработок собственных систем.

Используемые в настоящее время на кораблях (судах) Арктической зоны системы пожаротушения также не лишены недостатков, а именно:

- системы тонкораспыленной воды (ТРВ), создающие капли размером 100–200 мкм, эффективны для локального тушения, но это сложное оборудование, применение которого в условиях низких температур ограничено в связи с возможностью обледенения;
- аэрозольные системы компактны, но имеют ограниченную продолжительность действия и требуют точного позиционирования;
- стандартные системы водяного пожаротушения обладают недостаточной эффективностью при низких температурах, способствуют обледенению конструкций, имеют высокий расход воды и значи-

МОБИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ И БОРЬБЫ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ НА КОРАБЛЯХ И СУДАХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

М. Г. Войтович, канд. техн. наук, инженер-конструктор 1-й категории,
АО «ЦМКБ «Алмаз»,
контакт. тел. (812) 373 2800

тельные проливы, наносящие вред имуществу;

- пенные системы также чувствительны к температуре и требуют значительных запасов пенообразователя;
- газовые системы эффективны в закрытых помещениях, но требуют герметизации отсеков, опасны для экипажа.

Приведенный анализ показывает, что существующие системы не в полной мере отвечают требованиям мобильности, автономности, безопасности и эффективности в арктических условиях.

Одним из перспективных научно обоснованных методов пожаротушения является использование температурно-активированной воды (ТАВ). Особенность применения данного способа заключается в образовании в результате мгновенного перехода недогретой до температуры насыщения воды (когда начинается процесс парообразования) в область метастабильного состояния и последующего ее взрывного вскипания с образованием мелкодисперсного пара, способного проникать в труднодоступные места, и микрокапель воды с повышенной смачивающей способностью, обладающих повышенными огнетушащими свойствами.

Как показали исследования, описанные в [5], данный способ нашел применение в системах МЧС, в том числе в ус-

ловиях экстремальных климатических условиях, и представляет значительный интерес для адаптации в составе комплексов корабельного и судового назначения.

Предлагаемое решение – создание мобильного комплекса, представляющего собой систему оборудования, которая устанавливается в мобильном теплоизолированном обогреваемом контейнере морского исполнения, для получения ТАВ путем нагрева ее под давлением 10,0 МПа до температуры 220–250 $^{\circ}\text{C}$ и последующего взрывного вскипания при резком снижении давления до атмосферного. Схема устройства приведена на рис. 1.

Оборудование размещается в контейнере морского исполнения с усиленной термоизоляцией, оборудованного системой обогрева и вентиляции, что обеспечивает автономное его функционирование даже в условиях отказа корабельной системы подачи пресной воды и возможность быстрого развертывания на любом корабле (судне) либо на береговом объекте.

Принцип работы комплекса (см. рис. 1):

1. Вода из подогреваемой цистерны 1 подается бустерным насосом 2 для создания начального напора 0,3–0,6 МПа на входе плунжерного насоса высокого давления 3, который в свою очередь создает давление не менее 10,0 МПа.

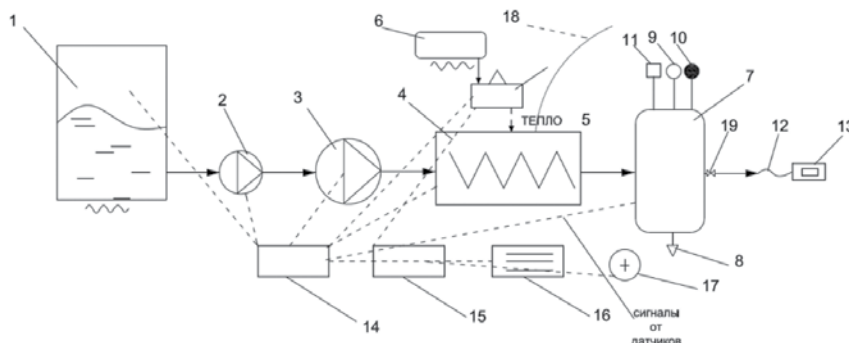


Рис. 1. Схема мобильного комплекса контейнерного исполнения для получения ТАВ

1 – цистерна пресной воды, 2 – бустерный насос, 3 – основной насос высокого давления, 4 – проточный теплообменник, 5 – автоматическая дизельная горелка, 6 – топливный бак с фильтром, 7 – коллектор-стабилизатор, 8 – предохранительный клапан, 9 – манометр, 10 – датчик температуры, 11 – датчик давления, 12 – рукав высокого давления, 13 – ствол-распылитель, 14 – программируемый логический контроллер, 15 – панель управления, 16 – электропитание, 17 – вентиляция, 18 – выхлопной патрубок, 19 – запорный клапан

2. В проточном теплообменнике 4 происходит нагрев воды до температуры 200–250 °С за счет тепла, выделяемого при сжигании дизельного топлива в автоматической горелке 5, при этом нагрев осуществляется под давлением, исключая фазовый переход воды в пар.

3. Продукты сгорания от горелки 5 отводятся через выхлопной патрубок 18.

4. После нагрева вода направляется в коллектор-стабилизатор 7, на котором установлены предохранительный клапан 8, манометр 9, датчик температуры 10 и датчик давления 11, для гашения пульсаций давления.

5. Недогретая до температуры насыщения вода под давлением 10,0 МПа подается через независимые выходы, оснащенные запорными клапанами по рукавам высокого давления 12 к стволам-распылителям 13, где она за время порядка $10^{-4} \div 10^{-9}$ секунд переходит в метастабильное состояние. В результате последующего взрывного вскипания образуются струи ТАВ, которые по своим свойствам близки к тепловому туману и облакам.

6. Сигналы от датчиков температуры 10 и давления 11 на коллекторе-стабилизаторе 7 поступают в программируемый логический контроллер (ПЛК) 14, который при отклонении заданных значений корректирует работу исполнительных устройств – горелки, бустерного и плунжерного насосов.

Создание данного комплекса потребовало разработки технических решений, которые обеспечивают стабильную работу в экстремальных условиях. Особого внимания заслуживает решение проблемы морской качки – для бескавитационной работы плунжерного насоса высокого давления предложен специальный бустерный насос, обеспечивающий подпорное давление воды на входе плунжерного насоса. Бустерный насос создает стабильный, непрерывный и ламинарный поток воды на входе плунжерного насоса высокого давления даже в условиях колебаний уровня воды в цистерне, а также преодоление гидравлического сопротивления на всех элементах системы перед основным насосом. Важнейшим элементом обеспечения стабильной работы системы также является коллектор-стабилизатор, гасящий пульсации давления и выравнивающий температуру потока воды, а также распределяющий воду в рукава высокого давления. Адаптация к экстремальному воздействию низких температур происходит за счет подогрева устройств и теплоизоляции контейнера.

Ключевым элементом предлагаемого комплекса является система управления, осуществляющая контроль параметров с помощью датчиков для контроля уровня воды, температуры 10,

давления 11, пламени и утечки топлива. Сигналы с указанных датчиков передаются в (ПЛК) 14, который управляет работой бустерного насоса 2, плунжерного насоса высокого давления 3 и автоматической дизельной горелки 5.

Результатом работы комплекса является получение ТАВ с температурой 180–250 °С, давлением 10,0 МПа и размером капель до 100 мкм. Огнетушащее действие ТАВ обусловлено следующими механизмами:

- интенсивным охлаждением за счет испарения микрокапель;
- осаждением дыма и паров продуктов горения;
- вытеснением кислорода из зоны горения водяным паром;
- ингибированием горения за счет активного взаимодействия модифицированных молекул воды с продуктами горения и образованием инертных соединений, препятствующих дальнейшему развитию пожара;
- быстрому проникновению в объем за счет капель малого размера.

Благодаря указанным свойствам, применение ТАВ позволяет сократить время тушения пожаров на 60–70%, уменьшить расход воды на 50–60% и увеличить площадь охвата в 3–4 раза по сравнению с применением систем водяного пожаротушения.

Кроме того, ТАВ может быть использована для борьбы с обледенением наружных конструкций кораблей (судов). Задача борьбы с обледенением с применением предлагаемого способа сводится к отделению снежно-ледяной массы от корабельных конструкций струями ТАВ и путем ее подачи для предотвращения повторного примерзания. Данный эффект достигается за счет ее способности не замерзать при температурах до –40 °С продолжительное время (один час и более). Струя ТАВ прошивает снежно-ледяной массив и создает внутри обледенения полость, в которой идет интенсивное образование облака паро-капельной смеси. При этом сам снежно-ледяной массив изолирует облако ТАВ от внешней среды, и вся подаваемая тепловая энергия разрушает обледенение. В результате наступает момент, когда давление, температура и фликкершум после взрывного вскипания воды приводят к разрушениям внутри обледенения, которые разрывают снежно-ледяной массив. Принципиально важным оказывается эффект разрушения снежно-ледяных масс на мелкие фрагменты, что обеспечивает сохранность конструкций при падении льда. Использование технологии удаления ледовых образований ТАВ позволяет избежать повторно обледенения, так как скорость разрушения снежно-ледяных масс превышает скорость их нарастания.

Также данный способ может использоваться для очистки от углеродных загрязнений, локализации путем связывания и осаждения выбросов боевых отравляющих и химически опасных веществ, ликвидации их разлива при авариях, с расходами реагентов и составами, которые в десятки раз меньше, чем при использовании технологии в условиях низких температур, что способствует повышению взрыво- и пожаробезопасности кораблей (судов).

Таким образом, интеграция перечисленных решений позволяет создать мобильный комплекс, способный эффективно работать в экстремальных условиях Арктической зоны и обеспечивать надежную противопожарную защиту и безопасность кораблей (судов).

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены уникальные технические решения, реализованные в мобильном комплексе получения ТАВ для борьбы с пожарами на судах и кораблях в Арктической зоне. Особое внимание уделено системам, обеспечивающим автономность, стабильную работу в условиях качки, надежность комплекса и высокое качество ТАВ.

2. Разработка и внедрение мобильного комплекса пожаротушения представляется стратегически важным шагом для обеспечения безопасности арктического судоходства. Данная технология не только значительно повышает шансы на успешную локализацию и ликвидацию пожара на ранней стадии, но и позволяет применять ее для борьбы с обледенениями и углеродными загрязнениями на кораблях (судах) в экстремальных климатических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 26 октября 2020 г. № 645.
2. Руднев Е. В. О проблемах пожаротушения в морских портах и на судах в условиях низких температур // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные риски). – 2017. – № 1. – С. 43–52. ISSN 2307–7476
3. Миронычев А. В., Потеряев Ю. К. Противопожарная защита арктических нефтегазовых платформ // Neftegaz.ru. – 2021. – № 6. – С. 42–48.
4. Таранцев А. А., Лосев М. А. Арктика. Пожары. Транспорт: Монография. – СПб.: ИПТ РАН, СПбУ ГПС МЧС России, 2021. – 164 с. – ISBN 978–5–907116–54–2
5. Роевко В. В. Стратегия использования энергоэффективных многоцелевых мобильных модулей для обеспечения безопасности нефтегазовых комплексов в Арктике // Neftegaz.ru. – 2017. – № 11 (71). – С. 80–87. ■

Проведение испытаний материалов в натурных или близких к натурным условиям необходимо для получения надежных характеристик материалов. Однако любые испытания затратны по стоимости, трудоемкости и продолжительности. Поэтому целесообразно иметь возможность оценивать характеристики материалов на моделях, позволяющих получать результаты, близкие к натурным.

Настоящая работа посвящена проверке предлагаемой модели работы оценки длительной прочности сплава. В качестве объекта используется жаропрочный сплав IN738 LC, результаты натурных испытаний которого приведены в [1].

Целью испытаний было определение возможного изменения длительной прочности сплава после предварительного его пребывания в течение 200 часов в атмосфере воздуха при температуре 1000 °С. Для испытаний были изготовлены две партии одинаковых образцов. Первая партия прошла испытания при температурах 700, 800, 900, 1000 °С. Длительность этих испытаний до разрушения образцов показана в табл. 1.

Вторая партия образцов предварительно была выдержана в атмосфере воздуха в течение 200 часов при температуре 1000 °С, в дальнейшем будем называть эту операцию «прожиг». Затем эта партия образцов была поставлена на испытания. Силовая нагрузка при этом повторяла нагрузки первой партии. Результаты этих испытаний показаны в табл. 1.

В результате «прожига» произошли окисление поверхностного слоя и потеря массы в поверхностном слое, который отвечает за прочность материала.

Толщина поверхностного – наружного – слоя, участвующего в обеспечении прочности, рассматриваемых материалов составляет около 15 мкм. Будем оценивать трансформацию наружного слоя массой 100 г и площадью 1 м². Толщина рассматриваемого слоя – 13 мкм.

Последовательность этого процесса показана в табл. 2, где приведены оценки потери массы сплава в результате окисления. Для этого оценивали доли поверхности сплава для каждого составляющего металла в соответствии с его объемом в общем объеме сплава – см. п. 1 – 4.

В п. 5 и п. 6 даны оценки потери массы металлов за рассматриваемый период – 200 часов, МПа/м².

Данные о потерях массы при окислении получены на короткой временной базе и, как показали другие работы, например [5], за счет образования защитной окисной пленки скорость этого процесса может значительно уменьшиться в несколько раз. В настоящей работе рассматривалось несколько вариантов пониженной скорости окисления, в табл.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛЬНЫХ И НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СПЛАВА IN738 LC ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 700 - 1000 °С

А.З. Багерман, канд. техн. наук,
руководитель секции «Судовые энергетические установки»
РосНТО судостроителей им. акад. А.Н. Крылова,
контакт. тел. (812) 710 4011, spntokrylov@mail.ru

Таблица 1

Результаты натурных испытаний сплава IN738 LC

№ п/п	T, °С	$\sigma_{\text{дл}}$, МПа	Время до разрушения, ч	
			до «прожига»	после «прожига»
1	700	640	296	0,014
2	800	430	98	0,2
3	900	230	77	5,0
4	1000	75	177	68

Таблица 2

Оценка изменений состава наружного слоя сплава в результате пребывания в атмосфере воздуха при температуре 1000 °С

№ п/п	Параметр	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Σ	Примечание
1	Состав сплава исходный g_i , г	63,3	16,0	8,5	1,75	2,6	3,5	3,5		
2	Удельный объем металлов V_i , см ³ /г	0,12	0,14	0,112	0,097	0,052	0,40	0,37		
3	$V_i = v_i \cdot g_i$	7,6	2,2	0,95	0,17	0,13	1,4	1,29	12,79	
4	$V_{\text{удн}} = V_i / \Sigma V_i =$ $f_{\text{удн}}$	0,59	0,17	0,07	0,01	0,01	0,11	0,10		
5	Потери массы при окислении, w_i , г/м ² ч	2,9	4,0	4,0	4,0	6,4	2,75	3,46		Данные из [2, 5]
6	$\Delta m_i = w_i \cdot 200$, г/м ²	580	800	800	800	1280	550	692		
7	$\Delta m_i \cdot 0,05$, г/м ²	29	40	40	40	64	27,5	34,6		
8	$P \cdot f_{\text{удн}}$, г	17,0	6,8	2,8	0,4	0,64	3,0	3,4		
9	g_i , гр, г	46,3	9,2	5,7	1,35	1,96	0,5	0,1		

Таблица 3

Удельные модули для оценки длительной прочности сплава IN738 LC, МПа/г

T, °С	Ni	Cr	Co*	Mo	W	Ti	Al	Fe
700	0,86	0,86	16,0	25,6	16,4	26,7	25,0	26,7
800	0,49	0,49	8,0	16,5	9,8	16,3	13,2	16,3
900	0,21	0,21	3,7	8,0	5,0	8,0	5,5	8,0
1000	0,06	0,06	1,3	3,6	2,1	3,3	2,0	3,3

* Величина удельного модуля Co оказалась зависящей от доли этого металла в сплаве. Остальные удельные модули не изменяются.

2 (см. п. 7) учитывалась 0,05 скорости по [2]. В п. 8 приведены оценки потери сплавов с учетом доли их поверхности в сплаве.

Количество металлов после окисления («прожига») в наружном слое (см. п. 9) оценивалось как разность между исходным состоянием (п. 1) и величиной потерь массы (п. 8). Такой подход основан на том, что наружный слой сплава практически не пополняется из внутренних слоев [4–6] за время работы (испытаний).

В результате окисления наружного слоя сплава его состав изменился (п. 9), изменились и соотношения между металлами. Оценены новые доли каждого металла прочностного слоя в граммах для 100 г сплава (см. табл. 3).

Для оценки характеристик длительной прочности сплава до «прожига» и после него при температуре 1000 °С использовался модульный подход [3, 4], а именно модуль удельной прочности на 1 г элементов сплава $\sigma_{100, \text{г}} / \text{г}$ [МПа/г]. «Вклад» в прочность сплава каждо-

го металла определялась как произведение удельной прочности в МПа/г на количество металла в 100 г сплава (табл. 3–5).

В табл. 4 приведены значения удельного модуля кобальта Со в зависимости от его доли в сплаве.

Оценка длительной прочности сплава за 100 часов показана в табл. 5

Как следует из табл. 5, прочность сплава IN738 LC после «прожига» понизилась. По результатам расчета были построены характеристики длительной прочности сплава в координатах Ларсона – Миллера PLM – $\sigma_{\text{дл}}$. Для параметра PLM использовалась продолжительность 100 часов, соответствующая определенному пределу длительной прочности σ_{100} . Параметр С по аналогии с [1] принят равным 19,0.

Полученные характеристики позволяют оценить влияние «прожига» на возможную длительность работы сплава. Для этого по исходной характеристике в соответствии с заданными продолжительностями испытаний (см. табл. 1) оценивались напряжения, при которых они проходили. В соответствии с этими напряжениями по характеристике сплава после «прожига» оценивалась возможная продолжительность работы сплава. Результаты оценки влияния «прожига» на ресурс сплав IN738 LC показаны в табл. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчетным путем получены результаты восьми натурных испытаний сплава при четырех температурах до «прожига» и после него. Полученные результаты практически совпали с результатами натурных испытаний.

Следовательно за время натурных испытаний масса наружного слоя сплава не пополнялась из внутренних слоев, как это принято в расчетах.

Характеристики длительной прочности материала могут быть получены по данным химического состава сплава с помощью модуля длительной прочности для Ni, Cr, Co, Mo, W, Ti, Al, как это сделано в расчетах.

Влияние окисления сплава может быть оценено через потерю его массы, как это принято в расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коломыцев П.Т. Газовая коррозия и прочность сплавов. – М.: Металлургия. 1984. 216 с.
2. Багерман А.З., Леонова И.П. Оценка скорости солевой коррозии металлов в составе сплавов // Тяжелое машиностроение. – 201. – № 1. – С.32–34.
3. Багерман А.З. Прогнозная оценка пределов длительной прочности, выносливости, ползучести и механических свойств сплавов на основе никеля // Морской вестник. – 2021. – №4(80). – С. 62–64.

Таблица 4
Удельные модули Со (МПа/г) для оценки длительной прочности сплавов в зависимости от его содержания в сплаве, %

T, °C	Удельные модули при Со, МПа, при содержании в сплаве, %			
	>0 – 6,0	6,0 – 10,0	10,0 – 14,0	14,0 – 16,0
700	35,0	30,0	19,0	16,0
800	30,0	26,0	9,0	8,0
900	27,0	20,0	6,0	3,7
1000	23,0	13,0	3,0	1,3

Таблица 5
Оценка длительной прочности сплава IN738 LC σ_{100} до «прожига» и после него, МПа

№ п/п	T, °C	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Σ	PLM	
1	–	63,3	16,0	8,5	1,75	2,6	3,5	3,5			g_i
2	700	54,4	14,0	272,0	45,0	41,0	93,0	87,0	606,0	20 433	σ_i
3	800	31,0	8,0	238,0	29,0	25,0	57,0	46,0	434,0	22 533	σ_i
4	900	13,0	3,0	187,0	14,0	13,0	28,0	19,2	277,0	24 633	σ_i
5	1000	4,0	1,0	127,0	6,0	5,0	11,0	7,0	161,0	26 733	σ_i
6		71,0	14,0	8,7	2,0	3,0	0,8	0,01			$G_{\text{пр}}$
7	700	61,0	12,0	261,0	51,0	49,0	21,0	0,3	455,0	20 433	σ_i
8	800	35,0	7,0	226,0	33,0	29,0	13,0	0,1	343,0	22 533	σ_i
9	900	15,0	3,0	174,0	16,0	15,0	6,0	0,1	229,0	24 633	σ_i
10	1000	4,0	1,0	113,0	7,0	6,0	2,0	0,1	133,0	26 733	σ_i

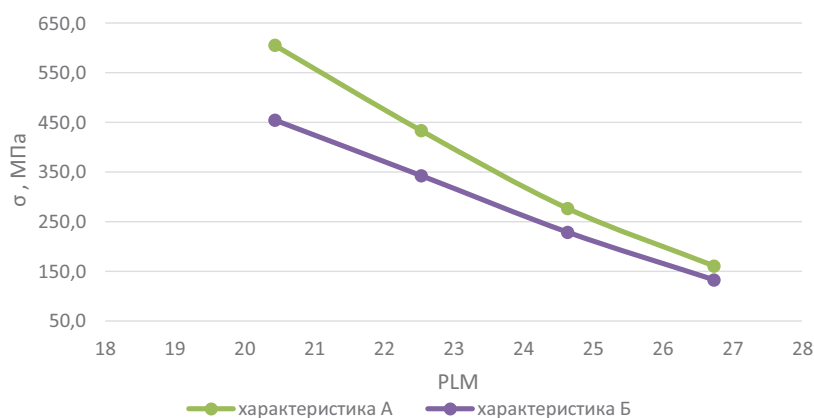


Рис. 1. Характеристики длительной прочности сплава IN738 LC
А – исходная характеристика, Б – характеристика после «прожига»

Таблица 6
Результаты сравнительных испытаний длительной прочности сплава IN738LC

Способ оценки	T, °C	Ресурс, ч		Потери ресурса, %
		исходный, (PLM)	после «прожига» (PLM)	
Расчет	700	296,9 (18 490)	0	100
Расчет	800	98,0 (22 523)	1,5 (20 600)	98,0
Расчет	900	77,0 (24 500)	10,0 (23 450)	87,0
Расчет	1000	177,0 (27 048)	57,0 (26 420)	68,0
Опыт	700	296,	0	100
Опыт	800	98,	0,2	100
Опыт	900	77,0	5,0	93,0
Опыт	1000	177,0	68,0	61,0

4. Багерман А.З., Заводов С.А., Леонова И.П. Модульный подход к оценке прочностных и других характеристик жаропрочных никелевых сплавов на основе их химического состава // Вестник РГТА им.П.А.Соловьева. – 2023. – №2(65). – С.136–139.
5. Багерман А.З., Заводов С.А., Шевцов М.А. Результаты циклических испытаний

сплава NiAl в газовом потоке при температуре 1000 °C // Тяжелое машиностроение. – 2025. – № 3. – С.27–28.

6. Багерман А.З., Кноринг С.Д. Экспериментальная оценка «остаточных» механических характеристик разрушенных образцов // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 1. – С.22–23. ■

Оптические и оптико-электронные средства (комплексы, системы, станции) широко применяются на многих научно-исследовательских испытательных полигонах (НИИП) и лабораторно-испытательных базах полигонов (ЛИБП), корабельных измерительных комплексах (КИК), космодромах, испытательных площадках [1], при доводочных (летных) испытаниях ракетно-космической (РКТ) и авиационной техники (АТ), отработке образцов вооружения и военной техники (ВВТ), для точного определения координат (азимута, угла места, дальности, а также их первых производных) летательных аппаратов (ЛА). Кроме того, они используются при полигонных испытаниях боеприпасов, стендовых испытаниях морских торпед, фиксировании траектории падения ракет, определении промаха при стрельбе по воздушным и морским целям, обнаружении стартовых позиций и запусков ракет дальнего действия; астрономических исследованиях, обработке результатов измерений и их регистрации и др. По значениям внешнетраекторных параметров (ВТП) полета испытываемых объектов (координаты, вектор скорости, угловые положения в пространстве и т.д.) оценивается качество их функционирования и выявляются причины, обусловившие возникновение нештатных ситуаций [2]. Другой сферой применения средств высокоточных траекторных измерений (СВТИ) являются испытание и калибровка вновь создаваемых радиолокационных станций (РЛС) и оптико-электронных комплексов (ОЭК).

В настоящее время достаточно полно исследованы и нашли применение следующие *методы автоматического сопровождения объектов по направлению* [3–5]:

амплитудный – путем создания направленного мощного зондирующего лазерного луча, образующего равносигнальное направление передающей или приемной оптических антенны;

фазовый – путем создания с помощью оптической модуляции грубой и точной шкал пеленгации в одном устройстве на различных частотах модулированного сигнала;

амплитудно-фазовый с коническим сканированием лазерного луча при когерентном приеме отраженного сигнала – путем использования результатов измерения радиальной скорости движения объекта на оптической несущей для сужения полосы пропускания приемоусилительного тракта;

амплитудно-фазовый с суммарно-разностной обработкой сигналов – путем осуществления фазовых сравнений принимаемых сигналов;

интерференционный – путем установки под определенным углом к падающему модулированному оптическому излучению передающих телевизионных камер, работающих в однострочном режиме, и сравнения периодов интерференционных картин, с целью выделения сигнала ошибки.

Ряд рассмотренных методов позволяет обеспечить на реализованных практически комплексах сопровождения объектов по направлению и определения параметров движения высокую точность измерения угловых координат, однако при этом реализуется точность сопровождения объектов по направлению порядка десятков угловых секунд [6–12]. На рис. 1 представлены российские и зарубежные комплексы сопровождения и измерения параметров движения объектов испытаний, на рис. 2 – оптические средства траекторных измерений (ТИ) корабля измерительного комплекса «Маршал Крылов».

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ДИНАМИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ ИЗ СОСТАВА КОРАБЕЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

С.Н. Ирютин, канд. воен. наук, доцент,

председатель Санкт-Петербургского Морского собрания,

А.Е. Шашурин, д-р техн. наук, проф.,

ректор ФГБОУВО «БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова»,

Д.П. Тетерин, д-р техн. наук, ген. директор,

В.Н. Марьян, канд. техн. наук, гл. науч. сотрудник,

ООО «НПЦ «Авиасистемы»,

В.Е. Бондырев, д-р пед. наук, д-р ист. наук, д-р юрид. наук, почетный работник науки и техники РФ, гл. специалист АО «КБП им. акад. А.Г. Шипунова»,

В.К. Дригола, канд. воен. наук, ст. науч. сотрудник НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМА им. Н.Г. Кузнецова,

контакт. тел. +7 (921) 759 6890, +7 (911) 190 4397

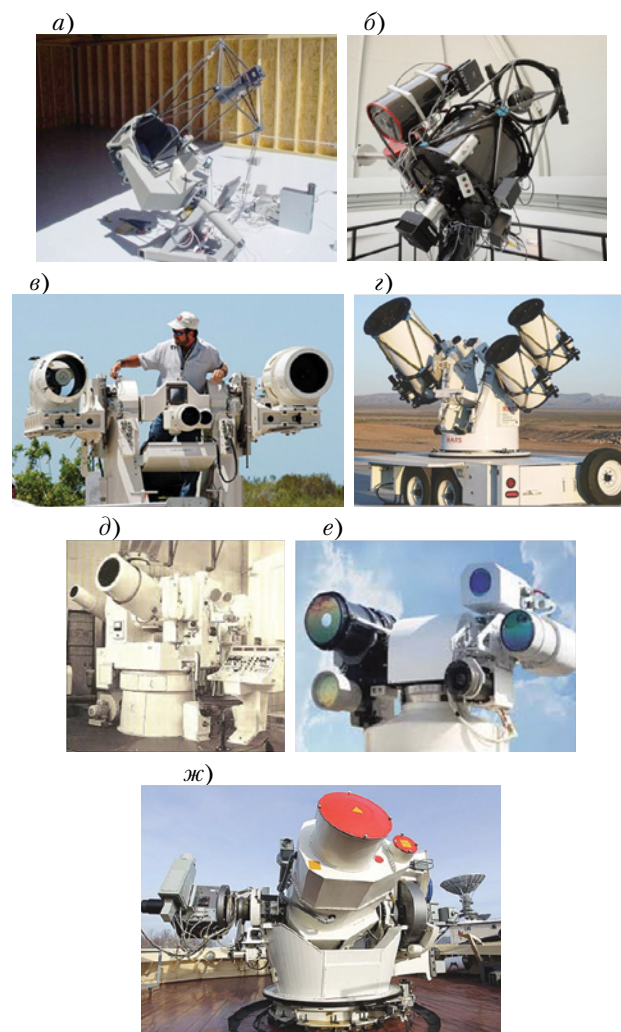


Рис. 1. Российские и зарубежные комплексы сопровождения и измерения параметров движения объектов испытаний: а – ОЭС «Центурион-18» (Франция, Германия), б – ОЭС «ЦимСМАРТ» (Франция, Германия, Великобритания), в – ОЭС фирмы Contreves-Goers (США), г – ОЭС «Mars» (США), д – ОЭС «КСТ-80» (РФ), е – ОЭС «БИНОКЛЬ» (РФ), ж – ОЭС «Сажень-Т» (РФ)

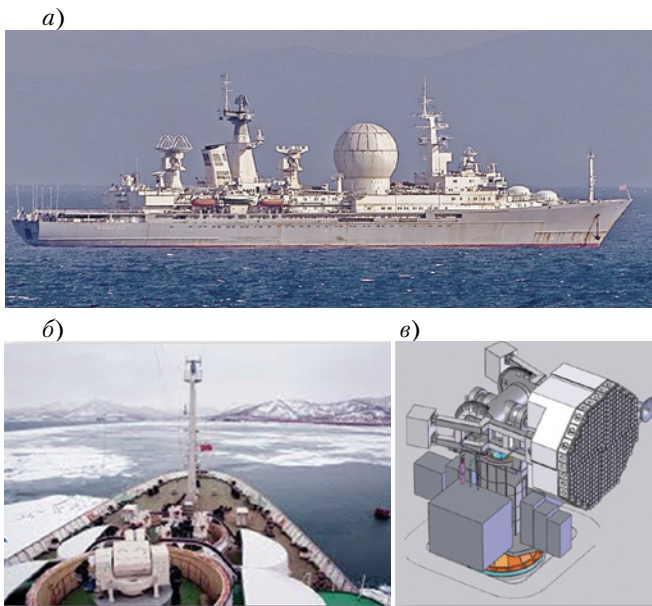


Рис. 2. Оптические средства траекторных измерений корабля измерительного комплекса «Маршал Крылов»: а – КИК «Маршал Крылов» пр. 19141, б – оптические средства, в – ППП

Кроме того, в основу ранее разработанных методов заложено применение контура наведения лазерного луча инерционной приемопередающей платформой (ППП), а реализующие их системы имеют один контур управления и не содержат в составе малоинерционных элементов управления сканированием лазерного луча.

На основе проведенного анализа [3, 4, 8, 9, 10–12] следует сделать вывод, что наиболее полно предъявляемым требованиям удовлетворяет КОС АСН, построенная на основе частотно-временного метода, разработанного в ХВВКИУ РВ им. Маршала Советского Союза Н.И. Крылова и учеными ООО «НПЦ «Авиасистемы», АО «КБ приборостроения им. акад. А.Г. Шипунова», НИИ ОСИС ВУНЦ «ВМА им. адм. Кузнецова».

Для синтеза такой системы АСН необходимо исследовать и разработать математическую модель ее функционирования, которую рассмотрим на основе математической модели лазерной радиолонии. Специальные устройства пространственно-временных модуляторов преобразуют векторы первичных сигналов $\vec{I}_c(t)$ в векторы полярной $\vec{I}_{\text{ки}}(\mathbf{v}, \xi, t)$ или прямоугольной системы координат $\vec{I}_{\text{ки}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t)$ пространств $\{\Phi\}$ канальных сигналов, имеющих мерность (число степеней свободы) сигнала $N_{\Phi i}$:

$$N_{\Phi i} = P_{ci} \cdot (\Delta x_i / \pi) \cdot q_{ci} \cdot (\Delta y_i / \pi) \cdot \omega_{ci} \cdot (T_{ci} / \pi), \quad (1)$$

где P_{ci} – волновое число, связанное с пространственной координатой X ; q_{ci} – волновое число, связанное с пространственной координатой Y ; ω_{ci} – круговая частота временного сигнала.

Данное выражение следует из теоремы Котельникова [13], обобщенной для неограниченного пространственно-временного сигнала, имеющего ограниченный спектр, в соответствии с которой каноническое разложение пространственно-временного сигнала $I(x, y, t)$ имеет вид

$$S(p, q, \omega) = \begin{cases} \iiint_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, t) e^{-j(px+qy+\omega t)} dx dy dt; \\ 0, \text{ при } |\omega| > 2\pi F_c, |p| > 2\pi F_x; \\ |q| > 2\pi F_y. \end{cases} \quad (2)$$

Мерность результирующего пространства определяется в виде

$$N_{\Phi \Sigma} = \sum_{i=1}^n N_{\Phi i}. \quad (3)$$

Для обеспечения сопровождения и измерения параметров движения исследуемого объекта (или объектов) необходимо выполнение условий

$$L = \{ |v| < v_{\max}, |\xi| < \xi_{\max}, r_{\min} < r < r_{\max} \}, \quad (4)$$

причем информация о параметрах движения должна быть обработана многопараметрической системой за время T .

При обеспечении многопараметрической оптической системой условий (4) на интервале времени измерений T , на раскрытие приемной оптической антенны системы электромагнитные колебания можно представить в виде суммы сигналов (суперпозиция дискретных сигналов):

$$\begin{cases} \vec{I}_z(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = \sum_{i=1}^m \vec{I}_{ki}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = \sum_{i=1}^m \vec{I}_i \cdot \vec{\alpha}_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t); \\ \vec{I}_z(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = \sum_{i=1}^m \vec{I}_i \vec{\alpha}_i(\tau_i, \mathbf{F}_i, \phi_i, \eta_i, \theta_i, x, y, t) + \vec{I}_m(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t), \end{cases} \quad (5), (6)$$

где τ_i – время запаздывания; $\mathbf{F}_i$ – доплеровский сдвиг; ϕ_i – начальная фаза; $\vec{I}_i$ – параметр интенсивности отраженного дискретного сигнала (цели).

Информационный сигнал представляет собой сумму отраженных от исследуемого объекта сигналов и аддитивного поля пространственно-временной помехи:

$$\left. \begin{aligned} \eta_i &= \sin v_i, & v_i & \text{– обобщенные координаты} \\ \theta_i &= \sin \xi_i, & \xi_i & \text{– обобщенные координаты} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\begin{cases} -2\pi F_c < \omega < 2\pi F_c; \\ -2\pi F_x < p < 2\pi F_x; \\ -2\pi F_y < q < 2\pi F_y. \end{cases} \quad (8)$$

Для дискретных интервалов времени

$$t = k / 2F_c; \quad x = k / 2F_x; \quad y = k / 2F_y. \quad (9)$$

Таким образом, для дискретно изменяющегося пространственно-временного сигнала $(\Delta x, \Delta y, \Delta t)$ получим следующий ряд разложения:

$$I_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = 8 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} I(k\Delta x, k\Delta y, k\Delta t) \sin 2\pi F_x(t - k\Delta t) / (t - k\Delta t) \times \quad (10)$$

$$\times \sin 2\pi F_c(x - k\Delta x) / (t - k\Delta t) \times \sin 2\pi F_y(y - k\Delta y) / (y - k\Delta y),$$

где $I_i(k\Delta x, k\Delta y, k\Delta t)$ – мгновенное значение сигнала в дискретных точках, число которых при временной и пространственной длительностях сигнала I_p , Δx , Δy и определяют число степеней свободы сигнала $N_{\Phi i}$.

На выходе передающей оптической антенны формируется групповой сигнал

$$\vec{I}_z(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = \sum_{i=1}^n \vec{I}_{ki}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = \sum_{i=1}^n \vec{I}_i \cdot \vec{\alpha}_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t); \quad (11)$$

$$\vec{I}_{cz}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = \begin{cases} \vec{I}_1 \vec{\alpha}_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) \\ \vec{I}_2 \vec{\alpha}_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) \\ \vec{I}_3 \vec{\alpha}_3(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) \\ \vdots \\ \vec{I}_n \vec{\alpha}_n(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) \end{cases} \iff \begin{pmatrix} \vec{I}_1 \\ \vec{I}_2 \\ \vec{I}_3 \\ \vdots \\ \vec{I}_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{\alpha}_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) \\ \vec{\alpha}_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) \\ \vec{\alpha}_3(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) \\ \vdots \\ \vec{\alpha}_n(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где $\vec{I}_i$ – коэффициенты разложения, численно равные мгновенному значению дискретных значений непрерывной функции спектра излучения.

Полученные параметры измеряются различными устройствами системы, обрабатываются и по ним оценивается вектор состояния объекта.

Таким образом, в общем случае осуществляются обнаружение при минимальных энергетических потерях исследуемого объекта и обработка информационных параметров источника отражения оптического информационного потока при выполнении следующих условий для объекта:

$$\begin{aligned} \tau_i - \tau_j &> r / c \cdot \Delta r; & \eta_i - \eta_j &> \Delta \eta; & \theta_i - \theta_j &> \Delta \theta; \\ |\mathbf{F}_i / v_0 - \mathbf{F}_j / v_0| &> 2\Delta r / c & \text{при } i, j = \overline{1, n}, i \neq j, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\Delta r(\Delta t)$, $\Delta r(\Delta F)$, $\Delta \theta$, $\Delta \eta$ – постоянные разрешения по дальности, радиальной скорости и углам.

Разрешение сигналов, отраженных от цели, как известно, возможно при выполнении условия

$$\{\Phi_i\} \cap \{\Phi_j\}; \quad N_{\Phi} \leq N_{\Phi i}. \quad (14)$$

Этот процесс заключается в определении вектора α_i по анализу вектора α_i и вектора $\mathbf{I}_{k_i}$ по заданному направлению вектора $\mathbf{I}_2$ и базисным векторам α_j . При этом для разделения целей необходимо, чтобы α_i были линейно независимыми и ортогональными, т.е.

условие независимости имело вид

$$\begin{cases} \mathbf{I}'_{\Sigma} = \sum \bar{\mathbf{I}}_{ki} \bar{\alpha}_i = 0; \\ \text{при } \mathbf{I}'_{k1} + \mathbf{I}'_{k2} + \dots + \mathbf{I}'_{km} = 0; \end{cases} \quad (15)$$

условие ортогональности –

$$(\vec{\alpha}_i \vec{\alpha}_j) = \begin{cases} 1, \text{ при } i = j; \\ 0, \text{ при } i \neq j. \end{cases} \quad (16)$$

В случае применения в квантово-оптических измерительных системах неортогональных сигналов возникает *явление проникновения переходных помех в другие каналы информационного зондирующего потока* в результате перекрытия спектров пространственно-временных сигналов. Применение ортогональных сигналов исключает помехи, поэтому системы, использующие ортогональные сигналы, обеспечивают получение более высоких технических и точностных характеристик.

В случае применения в координаторе ортогональных сигналов базисные сигналы e_k можно представить в виде

$$\vec{e}_k(x, y, t) = \alpha_{kk} \vec{\alpha}'_k(x, y, t) \text{ при } \alpha_{kk} \neq 0, \alpha_{ki} = 0. \quad (17)$$

Если $\mathbf{I}_2(x, y, t)$ определяется выражением (15), то для линейно-независимых ортогональных сигналов процесс разделения каналов (целей) определяется выражением

$$\bar{\mathbf{I}}_{\Sigma} \bar{\mathbf{e}}_k = \sum_{i=1}^m \bar{\mathbf{I}}_{ki} (\bar{\alpha}_i \bar{\mathbf{e}}_k) = \mathbf{I}'_{\text{KK}}, \quad (18)$$

которое для скалярного произведения непрерывных функций будет иметь вид

$$\begin{aligned} \Gamma_{\Sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t}) e_{\mathbf{k}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t}) = & \Gamma_{\Sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t}) \alpha_{\mathbf{k}\mathbf{k}} \alpha'_{\mathbf{k}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t}) = 1/T_i x y \times \\ & \times \int_{-1/2-x-y}^{1/2} \int_x^y \int_y^x \mathbf{I} \alpha_i(\tau_i, F_{ei}, \phi_i, \eta_i, \theta_i, \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t}) \rightarrow \\ & \leftarrow \alpha_{\mathbf{k}\mathbf{k}} \alpha'_{\mathbf{k}}(\tau_k, F_{ek}, \phi_k, \eta_k, \theta_k, \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t}) dx dy dt + \\ & + \int_{-1/2-x-y}^{1/2} \int_x^y \int_y^x \mathbf{I}_m(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t}) \alpha_{\mathbf{k}\mathbf{k}} \alpha'_{\mathbf{k}}(\tau_k, F_{ek}, \phi_k, \eta_k, \theta_k, \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t}) dx dy dt, \end{aligned} \quad (19)$$

где T – время визирования объекта испытаний.

Полученные выражения (18), (19) являются математической моделью функционирования лазерной радиолинии. Структурная схема многопараметрической КОС, соответствующая данной математической модели приведена на рис. 3 [14, 15].

ВЫВОДЫ

Выполненный анализ существующих методов построения КОС АСН и математической модели многопараметрической КОС, в состав которой входит подсистема АСН, показал следующее:

- применение многочастотных лазеров с синхронизированными продольными модами излучения позволяет достичь оптимальных точностных характеристик систем АСН наземного и морского базирования;
 - выполнение условий (13), (19) позволяет улучшить точностные параметры КОС АСН, а следовательно, одним из возможных путей повышения их качественных характеристик является построение АСН на основе частотно-временного метода с пространственно-временными зондирующими сигналами.
- Реализация исследуемого метода требует решения двух взаимосвязанных задач:
- обеспечение устойчивой синхронизации продольных мод излучения многочастотного лазера;
 - реализация высокоточного малоинерционного контура сопровождения объектов по направлению.

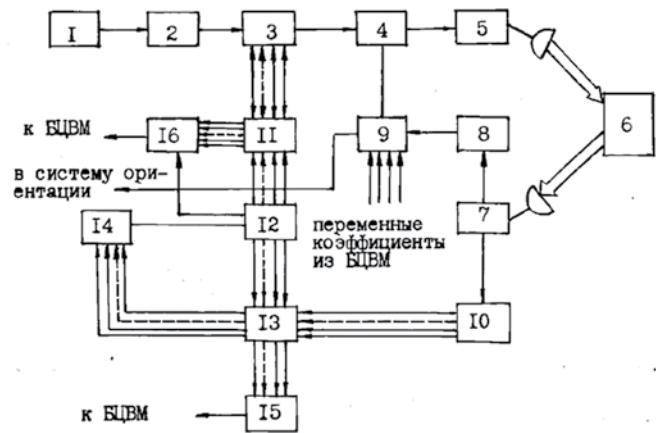


Рис. 3. Структурная схема многопараметрической КОС на основе применения многочастотного лазера с синхронизацией продольных мод излучения

1 – многочастотный лазер (МЧЛ), 2 – формирующую оптику (ФО), 3 – пространственно-временной модулятор (СПМ), 4 – блок управления и 5 – сканирующая система устройства сканирования луча (Д), 6 – объект (О: передающая и приёмная антенны, А1, А2), 7 – приёмник точного слежения за целью (ФД), 8 – преобразователь оптического сигнала (ПОС), 9 – управляющая схема (СУ), 10 – многоканальный оптический приемник (МФД), 11 – устройство слежения по частоте и задержке (СЗ), 12 – генератор канальных сигналов (ГКС), 13 – формирователь опорных сигналов (ФОС), 14 – многоканальное устройство опознавания сигналов (Ф), 15 – система «точного» измерения параметров движения (ТК), 16 – система «грубого» измерения параметров движения (ГК)

ЛИТЕРАТУРА

1. Додонов А.Г., Путятин В.Г., Валетчик В.А. Построение информационно-аналитической системы научно-исследовательского испытательного полигона // Управляющие системы и машины. – 2006. – № 4. – С. 3 – 14.
2. Оружие и технологии России: энциклопедия. XXI век / Под ред. С.Б. Иванова. – М.: ИД «Оружие и технологии», 2005. – Т. XI: Оптико-электронные системы и лазерная техника. – 719 с.
3. Информационно-измерительные системы на лазерах/ Под ред. Э.Н. Хомякова. – М.: Изд. МО СССР, 1978.
4. Рондин Ю.П., Мариян В.Н. Квантово-оптические системы траекторных измерений. – М.: Изд. МО СССР, 1990.
5. Кацнельсон В.З., Тимченко Н.И., Волков В.В. Основы радиолокации и импульсной техники. – Л.: Гидрометеоздат, 1985.
6. Николаев Ю.А., Петухов В.П., Феликсов Г.И., Чемоданов Б.К. Динамика цифровых следящих систем. – М.: Энергия, 1970.
7. Пожидаев В.М., Солдатов П.П., Быстров В.К. Специальный электропривод и электроснабжение. – Тр.НТК в/ч 13991. – М.: Изд. МО СССР, 1974.
8. Додонов А.Г., Путятин В.Г. Наземные оптические, оптико-электронные и лазерно-телевизионные средства траекторных измерений. – Киев: Математические машины и системы, 2017.
9. Адмиралтейские верфи. Люди, корабли, годы. 1926–1996./ Коллектив авторов. – СПб.: Гангут, 1996. – 393 с.
10. Павлов А. С. Военно-Морской Флот России и СНГ:Справ. – Якутск: Якутская республиканская типография им. Ю. А. Гагарина, 1992. – 160 с.
11. Сиробаба Я. Я. История командно-измерительного комплекса управления космическими аппаратами от истоков до главного испытательного центра им. Г. С. Титова. – М.: ЗАО СП «Контакт-РЛ», 2006. – 480 с.
12. Каманин Н. П. Скрытый космос. – М.: Инфортекст ИФ, 1995. – 400 с.
13. Телемеханика/ Под ред. В.М. Новицкого. – М.: Высшая школа, 1987.
14. Рондин Ю.П., Мариян В.Н. Квантово-оптическая система автоматического сопровождения объектов по направлению. – Тр.НТК в/ч 25840. – М.: Изд. МО СССР , 1987.
15. Сапрунов Б.Г., Рондин Ю.П., Мариян В.Н. Принципы построения высокоточных лазерных дальнометров на основе импульсных лазеров с синхронизацией продольных мод излучения. – Тр.НТК в/ч 13991. – М.: Изд. МО СССР, 1989. ■

Настройка и эксплуатация автоматических систем компенсации (АСК) низкочастотных электромагнитных полей кораблей в настоящее время сопряжена с рядом сложностей, требующих выполнения ряда мероприятий по их исключению или, по крайней мере, минимизации.

Электрооборудование кораблей с низким уровнем излучаемого низкочастотного электромагнитного поля (НЭМП), к которым относятся, например, корабли противоминной защиты, изначально проектируется таким образом, чтобы путем конструктивных мероприятий снизить излучение НЭМП в водную среду до минимальных значений. Поэтому введение в состав мощного электрооборудования (дизель-генераторы и главные распределительные щиты) систем АСК представляет собой финишное мероприятие по снижению уровня НЭМП, доводящее уровень поля до минимально возможных значений.

Эксплуатируемые системы АСК с аппаратурой управления, которая серийно выпускает АО «НПФ «Меридиан», заняли прочное место в составе кораблей отечественного флота. К настоящему моменту в ходе регулировочно-сдаточных и эксплуатационных работ накоплен большой опыт, позволяющий сформулировать предложения, направленные на совершенствование систем АСК.

Основные трудности, с которыми встречаются наладчики при вводе систем АСК в эксплуатацию, – это настройка исполнительных устройств, которыми в данном случае являются управляющие и компенсационные обмотки, накладываемые на источник НЭМП.

Специалисты АО «НПФ «Меридиан» констатируют, что возможности совершенствования аппаратуры управления, предназначенной для непосредственного управления токами в исполнительных устройствах, пока не исчерпаны.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ СИСТЕМЫ АСК С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рассмотрим общие принципы работы системы АСК с непосредственным управлением токами в исполнительных устройствах. Функциональная схема АСК данного типа показана на рис. 1.

В состав АСК, помимо приборной части, входят обмотки компенсационные (КО) и управляющие (УО). Компенсационные обмотки подключены к выходам усилителей УК. На вход усилителя УК подключена управляющая обмотка, выполняющая роль датчика и обеспечивающая преобразование поля источника в управляющий электрический сигнал.

МОДИФИКАЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ КОРАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ НАСТРОЙКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Б.Ю. Семёнов, начальник сектора, гл. конструктор направления СКЭМП АО «НПФ «Меридиан»,
контакт. тел. (812) 602 0375, доб. 526

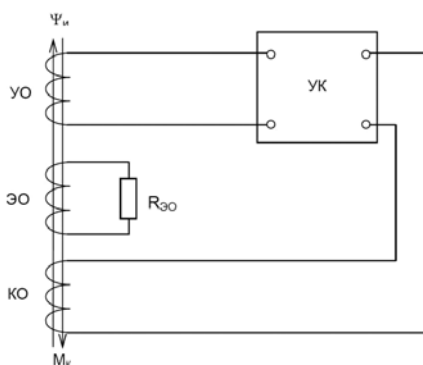


Рис. 1. Функциональная схема АСК с непосредственным управлением

Потокоцепление Ψ_{ii} источника, обладающего магнитным моментом M_{ii} , создает в управляющей обмотке напряжение $U_{вх}$, поступающее на вход УК. Усилитель УК усиливает входной сигнал и преобразует его в ток компенсационной обмотки, являющейся источником компенсирующего поля АСК со значением магнитного момента M_k . Условием компенсации в канале АСК является равенство магнитных моментов источника (или группы источников) и компенсационной обмотки ($M_{ii} = -M_k$).

Реальные условия эксплуатации систем АСК, как правило, характеризуются наличием дополнительных паразитных контуров, образуемых металлическими массами корпуса или электрооборудования, или короткозамкнутыми экранными оплетками кабелей. На рис. 1 эти контуры представлены в виде некоторого эквивалентного контура, состоящего из обмотки ЭО и сопротивления $R_{ЭО}$.

На рис. 2 показана структурная схема АСК как системы автоматического регулирования тока в компенсационной обмотке $I_{вх}(p)$ в функции напряжения $U_{вх}(p)$, индуцированного источником сигнала в управляющей обмотке. Система регулирования содержит две цепи обратной связи:

а) цепь внешней отрицательной обратной связи, осуществляемая через компенсационную и управляющую обмотки с передаточной функцией $H_{вс}(p)$ и напряжением на выходе цепи $U_{вс}$;

б) цепь внутренней знакопеременной обратной связи с передаточной функцией $H_{ос}(p)$ и выходным напряжением цепи $U_{ос}(p)$, предусмотренной в усилителе УК.

Цепь внутренней обратной связи регулирует глубину общей отрицательной обратной связи канала и, тем самым, его коэффициент передачи с целью получения значения выходного тока, которое позволяет обеспечить требуемое значение магнитного момента компенсационной обмотки.

Для обеспечения необходимой погрешности и стабильности электрических характеристик глубина эквивалентной отрицательной обратной связи, определяемая совместным действием внешней и внутренней связей цепей, должна быть оптимальной. Для АСК с непосредственным управлением это условие определяется значением петлевого усиления согласно выражению

$$A|H_{вс}(p) \pm H_{ос}(p)| \gg 1, \quad (1)$$

где A – коэффициент передачи внутреннего активного канала УК.

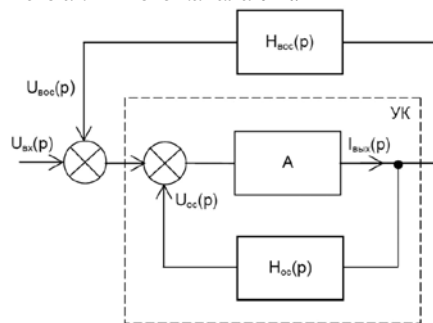


Рис. 2. Структурная схема АСК с непосредственным управлением

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Исполнительное устройство системы АСК представляет собой систему обмоток УО и КО, конструктивно изготавливаемых из одного отрезка многожильного кабеля, часть жил которого включается последовательно и образует обмотку УО, а часть – также последовательно и формирует обмотку КО.

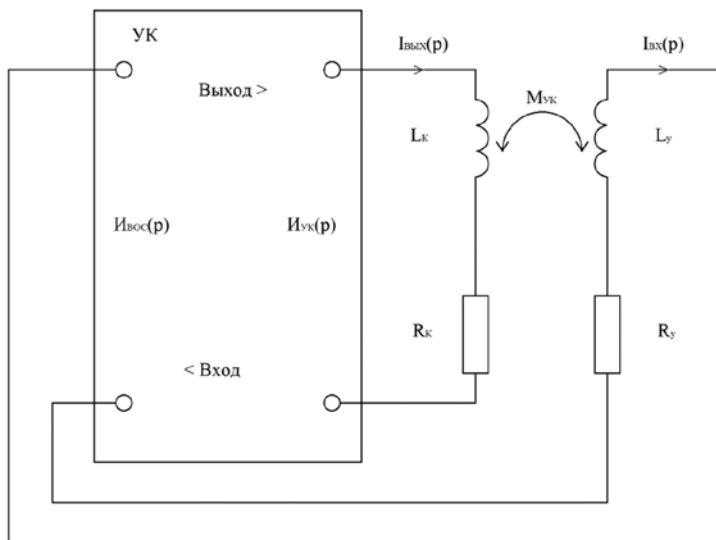


Рис. 3. Электрическая схема исполнительного устройства

Электрически такое исполнительное устройство представляет собой воздушный трансформатор с наличием сильной индуктивной связи между обмотками. На рис. 3 показана электрическая схема исполнительного устройства АСК.

Запишем выражения закона Кирхгофа для электрической схемы согласно рис. 3:

$$U_{УК}(p) = pL_k(p)I_{вых}(p) - pM_{ук}(p)I_{ух}(p) + R_k(p)I_{вых}(p); \quad (2)$$

$$U_{ВОС}(p) = pL_y(p)I_{ух}(p) - pM_{ук}(p)I_{вых}(p) + R_y(p)I_{ух}(p), \quad (3)$$

где $M_{ук}$ – взаимная индуктивность между обмотками УО и УК.

Поскольку обмотка УО работает в режиме датчика и нагружена на высокое входное сопротивление канала УК, ток $I_{ух}$ в этой обмотке можно принять нулевым. Таким образом, выражения (2) и (3) примут вид

$$U_{УК}(p) = pL_k(p)I_{вых}(p) + R_k(p)I_{вых}(p); \quad (4)$$

$$U_{ВОС}(p) = -pM_{ук}(p)I_{вых}(p). \quad (5)$$

Снова обратим внимание на рис. 2 и поясним, что первый сумматор, который находится в контуре автоматического регулирования, – это и есть обмотка УО, которая суммирует входное напряжение $U_{ух}$ с напряжением $U_{вос}$, наведенным током обмотки КО. Физически отделить напряжение $U_{ух}$ и напряжение $U_{вос}$ в управляющей обмотке невозможно, поэтому в состав аппаратуры АСК вводится внутренняя регулируемая обратная связь с передаточной функцией $H_{ос}(p)$, дифференцирующей сигнал датчика выходного тока $I_{вых}(p)$. Как правило, эта внутренняя обратная связь положительная, поэтому чем больше ее глубина, тем более подвержена неустойчивости вся система АСК.

В ряде случаев при обеспечении требуемого коэффициента передачи канала УК напряжение внешней обратной связи в управляющей обмотке $U_{вос}$ может существенно превышать напряжение полезного сигнала $U_{ух}$. Подобная ситу-

ация наблюдается при наличии небольших величин магнитных моментов источников НЭМП. Это обстоятельство существенно влияет на устойчивость и работоспособность АСК и, более того, имеет определенные ограничения.

Отношение $U_{вос}/U_{ух}$ определяет важный параметр канала АСК, обозначенный σ («сигма»). Параметр «сигма» регламентирует пределы использования УК и вычисляется согласно выражению

$$\sigma = \frac{U_{вос}}{U_{ух}} = \frac{\omega M_{ук} I_{вых}}{U_{ух}}, \quad (6)$$

где ω – круговая частота, преобладающая в спектре источника НЭМП.

Параметр «сигма» определяет допустимый коэффициент передачи УК при заданном значении параметра $M_{ук}$, определяющего коэффициент передачи внешней обратной связи. В случае, если «сигма» более 5, работа канала может сопровождаться неустойчивостью, восприимчивостью к внешним помехам, ухудшением погрешности при полном нарушении работоспособности вследствие самовозбуждения.

При проведении настройки системы АСК параметр «сигма» вычисляется по данным измерений следующим образом:

а) при отключенной системе АСК и включенном источнике НЭМП измеряется напряжение $U_{ух}$ на обмотке УО;

б) при включенной системе АСК и отключенном источнике НЭМП устанавливается номинальный компенсационный ток в обмотке КО, измеряется напряжение $U_{вос}$ на обмотке УО;

в) вычисляется параметр «сигма» по формуле (6).

Затем, при необходимости, осуществляется подбор витков обмоток УО и КО таким образом, чтобы напряжение $U_{ух}$ и параметр «сигма» соответствовали требованиям к аппаратуре управления.

Опыт настройки систем АСК показал, что соответствие параметра «сигма» требованиям наблюдается крайне редко,

чаще всего «сигма» превышает установленные требования в 2–3 раза. Только после нескольких итераций по подбору витков обмоток УО и КО удастся обеспечить заданные требования.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Разделение напряжений $U_{ух}$ и $U_{вос}$ при совместной работе АСК с включенным источником НЭМП в существующей конструкции обмоток УО и КО не представляется возможным. Разделение обмоток со снижением коэффициента взаимной индуктивности $M_{ук}$ позволяет решить задачу лишь частично, поскольку при значительной площади обмоток существенно ослабить индуктивную связь в пределах габаритов источника НЭМП не удастся. Кроме этого, система АСК становится чувствительной к взаимному расположению обмоток, и любое нарушение геометрии изменит передаточную функцию $H_{ос}(p)$. Система АСК в данном случае легко может войти в автоколебательный режим.

Разделить потоки магнитной индукции источника $\Psi_{и}$ и компенсационной обмотки $\Psi_{к}$ возможно, если использовать в качестве дополнительного элемента-датчика кольцевой магнитопровод из ферромагнитного материала, через отверстие которого пропущены жилы обмоток УО и КО (рис. 4).

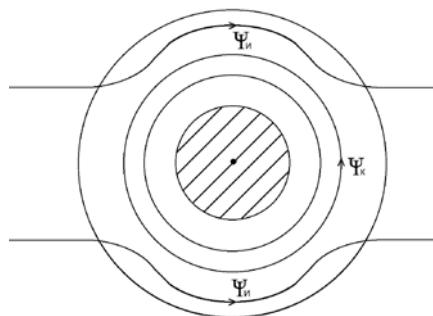


Рис. 4. Элемент-датчик магнитного потока обмотки КО

В этом случае поток $\Psi_{и}$ источника НЭМП не замыкается внутри кольцевого магнитопровода, и его силовые линии при симметричном прохождении сквозь магнитопровод будут взаимно компенсироваться. В то же время круговые силовые линии потока $\Psi_{к}$ компенсационной обмотки КО замкнутся внутри магнитопровода и при наложении на него еще одной обмотки (рис. 5) создадут напряжение $U_{восд}$, в котором будет отсутствовать составляющая, связанная с $U_{ух}$. Далее, соединяя последовательно выводы обмотки УО и обмотки элемента датчика, напряжение $U_{восд}$ будет вычитаться из напряжения $U_{вос}$, поэтому на выходе сразу же сформируется напряжение $U_{ух}$, равное (или близкое) к напряжению, которое индуцируется потоком источника НЭМП.

Регулировать напряжение $U_{\text{вос.д}}$ при изменении числа витков обмотки УО или КО можно путем переключения отводов обмотки элемента-датчика. Собственно, в этом случае нет необходимости точной компенсации напряжения $U_{\text{вос}}$ напряжением $U_{\text{вос.д}}$, достаточно лишь уменьшить параметр «сигма» до 1–2 единиц и далее настраивать аппаратуру с увеличенным запасом диапазона штатных регулировок.

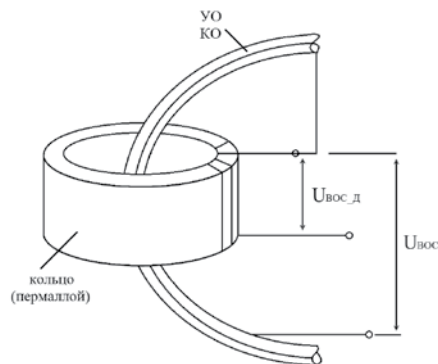


Рис. 5. Применение элемента-датчика для установки параметра «сигма»

Модифицированная схема канала УК с введенным элементом-датчиком (TrT) показана на рис. 6. Данное решение не требует существенной доработки серийной аппаратуры. Единственное, что необходимо будет выполнить, – это разработать конструкцию корпуса элемента-датчика с необходимой степенью защиты IP и встроенным регулировоч-

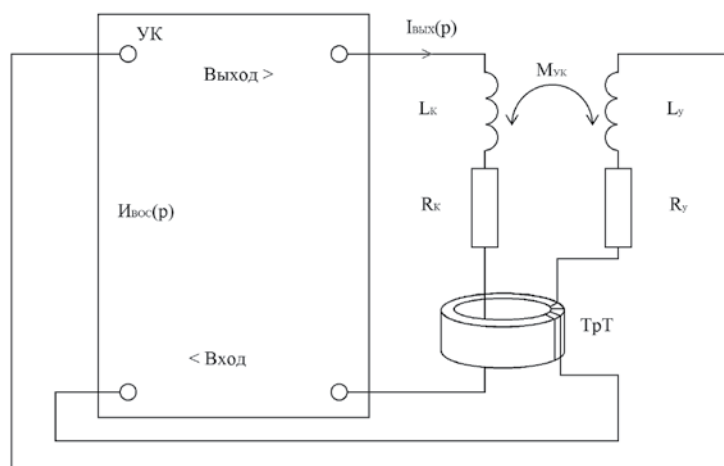


Рис. 6. Модифицированная электрическая схема исполнительного устройства

ным устройством, позволяющим оперативно переключить витки вторичной обмотки элемента-датчика при регулировке параметра «сигма».

Работоспособность предлагаемого технического решения подтверждена с помощью электронной модели в программе MicroCap. На рис. 7 приведена схема канала АСК, использующегося в серийной аппаратуре с установленной амплитудой входного сигнала 15 мВ и параметром «сигма», равным 1. В данном случае «сигма» отрегулирована заданием коэффициента связи между обмотками L1 и L2 (заданное значение – 0,05). Коэффициент усиления внутренней обратной связи (на схеме он устанавливается каскадом X9) со-

ставляет 41 для номинального тока с амплитудой 8,4 А, что вполне приемлемо для обеспечения устойчивости канала АСК. Данное значение немного превышает коэффициент усиления внутренней обратной связи (30), при котором устанавливается усиление каскада X3 в режиме УК (с отключенной внешней обратной связью).

Теперь увеличим коэффициент «сигма» до значения 5,6 (коэффициент связи между обмотками L1 и L2 установим равным 0,3), что будет соответствовать верхней границе требований для серийного изделия, и убедимся, что для установки той же амплитуды номинального выходного тока 8,4 А необходимо установить коэффициент

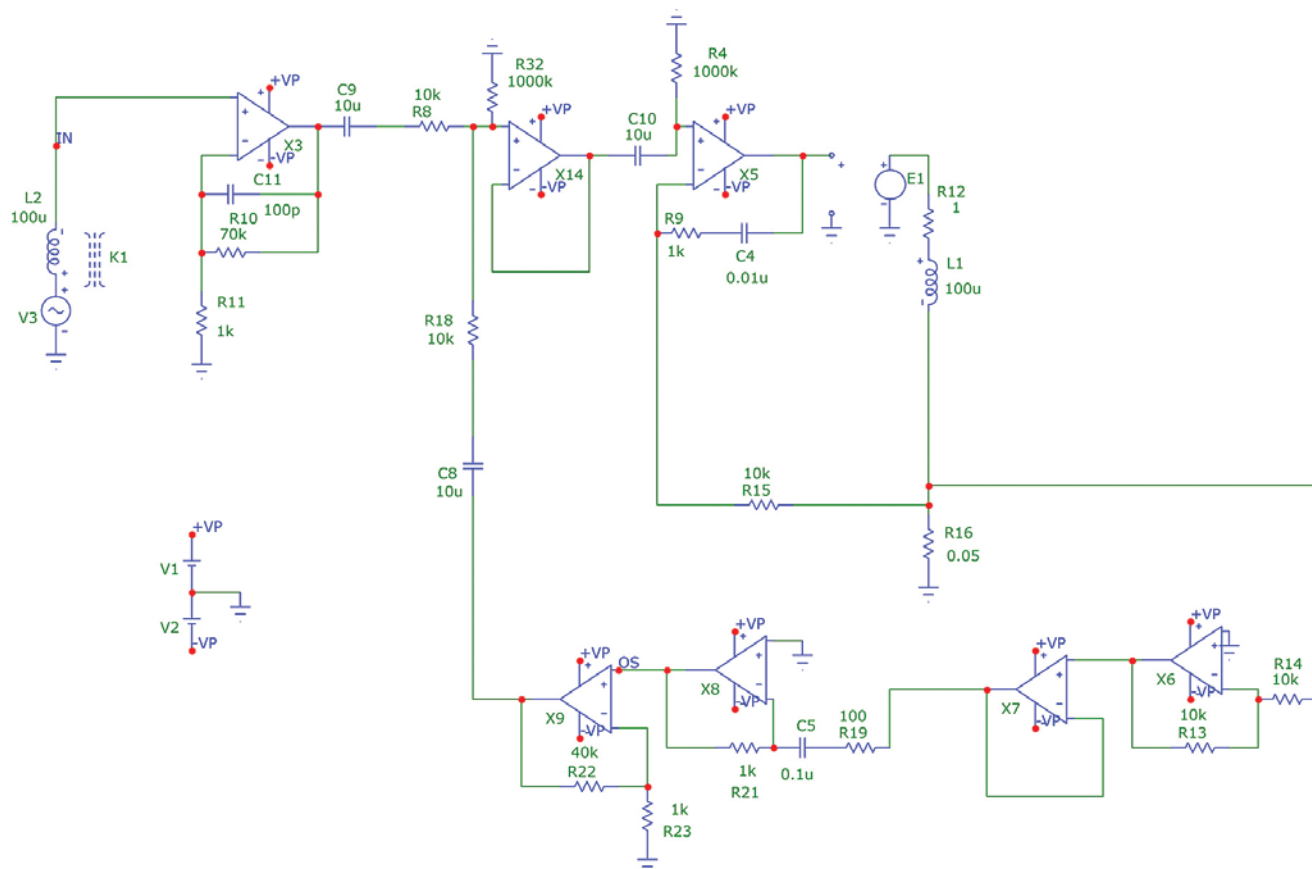


Рис. 7. Модель канала АСК серийной аппаратуры

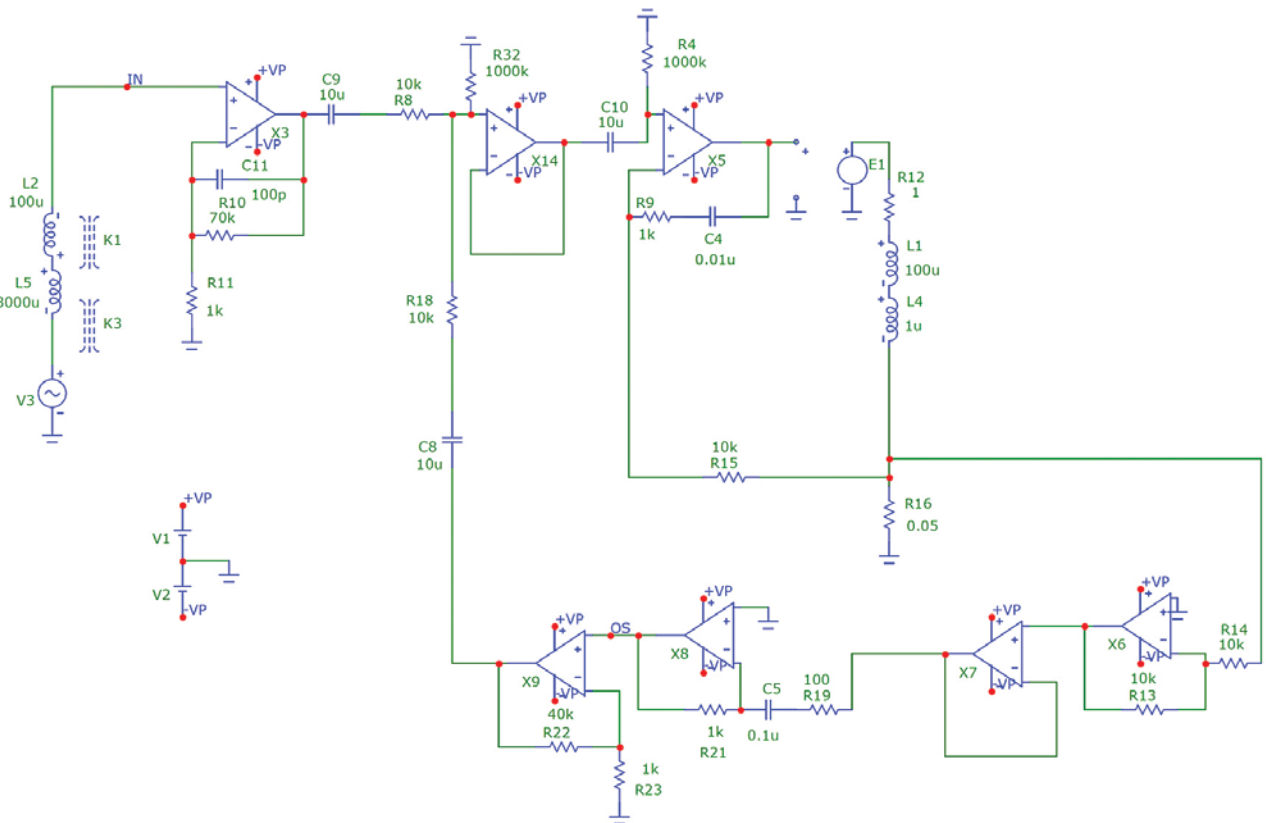


Рис. 8. Модель канала АСК серийной аппаратуры с модифицированным исполнительным устройством

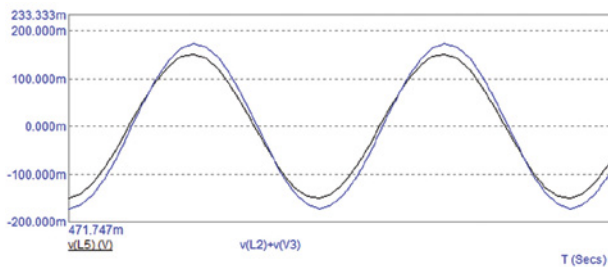


Рис. 9. Сравнение сигналов обмотки УО и сигнала элемента-датчика

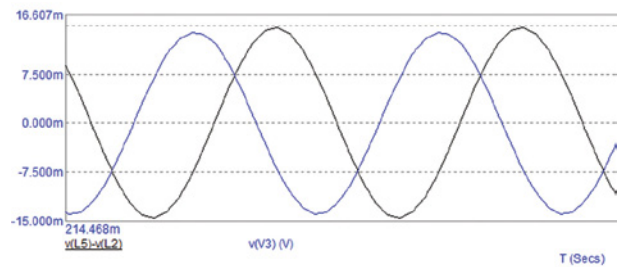


Рис. 10. Сравнение сигнала от источника магнитного момента и сигнала, наведенного обмоткой КО

усиления внутренней обратной связи, равным 391. Это существенно ухудшает устойчивость петли обратной связи к технологическим и температурным отклонениям параметров цепи внутренней обратной связи (входные токи операционных усилителей, температурная нестабильность пассивных компонентов и т.д.).

Наконец, установим коэффициент «сигма» около 10, что существенно превышает требования к серийному изделию. Данная ситуация не является экзотической, а часто наблюдается при вводе серийных изделий в эксплуатацию с реальными обмотками. В данном случае коэффициент усиления внутренней обратной связи получается равным 801, и образуется крайне высокая чувствительность канала к стабильности установки коэффициента усиления. На практике настройка серийного изделия с высокой «сигмой» выражается в нестабильной работе канала АСК: любая импульсная помеха способна вывести канал в режим автогенерации.

Модифицируем схему, введя модель элемента-датчика в виде магнитосвязанных индуктивностей L4 и L5. Коэффициент связи, учитывая наличие замкнутого магнитопровода, установлен равным 0,999. С помощью подбора индуктивности L5 (что эквивалентно изменению числа витков) приведем эквивалентный параметр «сигма» близким к 1. При указанных на рис. 8 номиналах и настройке «сигмы» коэффициент усиления внутренней обратной связи стал равным 41 – при фактической «сигме» около 10.

На рис. 9 показаны совмещенные формы напряжений обмотки УО АСК (кривая V(L2)+V(V3)) и выходной обмотки элемента-датчика (кривая V(L5)). На рис. 10 отображен разностный сигнал (V(L5) – V(L2)), наведенный на вход канала от обмотки КО и сигнал V(V3), наведенный на вход канала от источника компенсируемого магнитного момента.

Хорошо видно, что амплитуда фактически наведенного обмоткой КО сигнала в 10 раз превышает амплитуду

сигнала, наведенного источником магнитного момента, однако благодаря наличию элемента-датчика амплитуда сигнала внешней обратной связи сравнивается с амплитудой сигнала от компенсируемого источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемое решение проверено к настоящему времени на работоспособность только в электронной модели и требует, по крайней мере, экспериментальной проверки в составе макета АСК. Экспериментальная проверка и внедрение результатов в состав эксплуатируемых кораблей позволит качественно улучшить ТТХ систем АСК, построенных с применением традиционного непосредственного управления по уровню поля. Также это решение открывает возможность создания унифицированных исполнительных устройств, настраиваемых на объектах только путем переключения штатных коммутационных элементов, без применения пайки и иных трудоемких операций. ■

Современные подводные технические комплексы должны обладать высокой автономностью и точностью наведения даже при полном отсутствии внешних сигналов навигации. В этих условиях ключевую роль играют инерциальные измерительные блоки (IMU — Inertial Measurement Unit), основанные на акселерометрах и гироскопах. Такие модули формируют основу инерциальной навигационной системы (INS — Inertial Navigation System), обеспечивающей определение координат, курса и ориентации подводного аппарата относительно начальной точки без участия внешних источников данных [1].

Для современных подводных аппаратов INS решает задачи стабилизации курса, компенсации возмущений, управления глубиной и формирования траектории самонаведения. Высокие требования предъявляются к точности акселерометров, температурной стабильности и устойчивости к вибрациям, характерным для подводных пусков [2].

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Акселерометр представляет собой чувствительный элемент, преобразующий механическое ускорение в электрический сигнал. В современных системах управления подводными автономными аппаратами применяются два основных типа датчиков: кварцевые и MEMS-акселерометры. Кварцевые сенсоры основаны на пьезоэлектрическом эффекте и обладают высокой стабильностью во времени, малым дрейфом нуля и линейной характеристикой. Они применяются в высокоточных системах стабилизации [3].

MEMS-акселерометры (Micro-Electro-Mechanical Systems) строятся на кремниевой технологии микромеханической обработки, что позволяет интегрировать несколько осей в одном корпусе и существенно снизить массу и энергопотребление [4]. Однако им присущи большой шум и температурный дрейф, что требует программной компенсации и калибровки.

РОЛЬ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В СИСТЕМАХ НАВЕДЕНИЯ

Акселерометры — ключевой элемент инерциальной навигационной системы (INS) подводных аппаратов, измеряющий продольные и поперечные ускорения корпуса. На основе этих данных INS вычисляет траекторию движения, скорость и ориентацию объекта в пространстве. При отсутствии GPS и радионавигационных сигналов именно данные акселерометров определяют точность позиционирования подводного объекта на всем протяжении его автономного хода [5].

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМИ АВТОНОМНЫМИ АППАРАТАМИ

М.А. Еремеев, руководитель направления навигационных систем
ООО «ДиЭлКом»,
контакт. тел. (812) 339 4597



Рис. 1. Внешний вид кварцевых акселерометров навигационного класса [6]

В типичной схеме INS данные акселерометров объединяются с информацией от гироскопов и магнитометров. Наиболее распространенным методом обработки является фильтр Калмана, который позволяет оценить истинные значения ускорений и скоростей при наличии шумов и случайных возмущений.

Однако точность INS во многом определяется *долговременной стабильностью нулевого смещения акселерометров* — даже небольшие отклонения могут привести к значительному накоплению ошибки координат.

Для систем навигации подводных автономных аппаратов характерны специфические условия эксплуатации:

- высокие динамические перегрузки при пуске (до 100 g);
- многокомпонентные вибрации корпуса при движении в плотной среде;
- перепады температур в диапазоне от -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$ (при хранении до -40°C);
- ограниченные размеры и массы навигационного блока.

В таких условиях особое значение имеют *кварцевые акселерометры* (рис. 1). Они построены на пьезоэлектрическом эффекте и используют упругие элементы из монокристаллического кварца, который обладает минимальным температурным коэффициентом

упругости и высокой стабильностью параметров во времени. Благодаря этому кварцевые акселерометры обеспечивают:

- смещение нуля менее $\pm 5\text{ mg}$;
- низкий уровень плотности шума (до $5\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$);
- устойчивость характеристик при температурных колебаниях;
- отсутствие необходимости частой перекалибровки [3].

В системах навигации подводных технических комплексов кварцевые сенсоры используются в составе высокоточных INS, таких как «БИНС-М» или зарубежных аналогов Honeywell HG9900 и Safran Sigma 40XP. Их применение обеспечивает минимальный дрейф координат — порядка 5–10 м за 10 минут автономного хода, что обеспечивает требуемую точность наведения на цель при дальности до 20 км.

Таким образом, кварцевые акселерометры формируют основу высокоточных инерциальных систем, применяемых в современных подводных аппаратах. МЭМС-акселерометры, напротив, используются в более легких и малогабаритных образцах, где требуются низкое энергопотребление и компактность, но допускается больший дрейф. Характеристики кварцевого акселерометра приведены ниже.

Типичные параметры кварцевого акселерометра*

Параметр	Значение (тип.)
Диапазон измерений, g	$\pm 50 \dots \pm 100$
Смещение нуля, mg	$\leq \pm 5$
Нестабильность смещения (1σ , 1τ), μg	10–30
Полоса пропускания, Гц	0...500, 800...2500
Рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	$-55 \dots +85$

*Источник: QA2000 (Honeywell) [3]

Сегодня стремятся объединить достоинства обеих технологий – стабильность кварцевых элементов и миниатюрность МЭМС-структур – в гибридных INS нового поколения.

МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРЫ И ТЕНДЕНЦИИ МИНИАТЮРИЗАЦИИ

Развитие микромеханических технологий за последние два десятилетия радикально изменило подход к построению инерциальных систем. Если ранее МЭМС-акселерометры рассматривались исключительно как элементы бытовой электроники, то сегодня их точностные характеристики позволяют использовать их и в оборонной продукции, включая подводные навигационные системы [4].

МЭМС-акселерометры изготавливаются на основе кремниевых микроструктур, образующих подвижную массу, закрепленную на упругих балках. При ускорении масса смещается, а встроенные ёмкостные или пьезорезистивные датчики регистрируют изменение параметров. Главное преимущество таких устройств – *высокая степень интеграции*: в одном корпусе можно реализовать трехосевое измерение ускорений, встроенные АЦП и интерфейсы передачи данных. Это позволяет создавать компактные IMU, пригодные для установки даже в малогабаритных автономных подводных аппаратах (рис. 2).

Тем не менее МЭМС-акселерометры чувствительны к температурным изменениям. Колебания температуры приводят к изменению механических свойств кремния, что вызывает смещение нуля и изменение чувствительности. В современных военных решениях эти эффекты компенсируются как аппаратно (путем стабилизации температуры внутри корпуса), так и программно (через таблицы поправок, формируемые при калибровке) [5].

Рис. 3 иллюстрирует типичную температурную зависимость чувствительности МЭМС-акселерометра, полученную при стендовых испытаниях навигационного модуля военного класса. Из рисунка видно, что при росте температуры от -40 до $+80$ °C чувствительность возрастает примерно на 8%, что при отсутствии термокомпенсации может привести к систематической ошибке измерения ускорения и, как следствие, к дрейфу INS.

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КВАРЦЕВЫХ И МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

При выборе типа акселерометра для подводных и навигационных систем важно учитывать не только чувствительность и уровень шумов, но и устойчивость сенсора к внешним воздействиям. Особое значение имеют радиационная стойкость, стабильность параметров при вибрациях, температурных колебаниях и длительной работе.

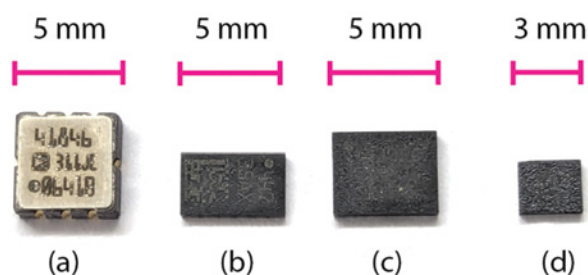


Рис. 2. МЭМС-акселерометры миниатюрного форм-фактора (для масштаба – на фоне спички) [7]

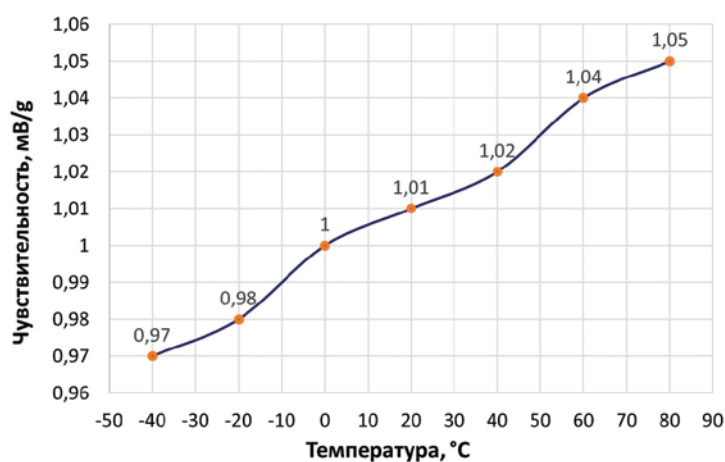


Рис. 3. Зависимость чувствительности МЭМС-акселерометра от температуры

Таблица 1
Сравнение характеристик кварцевых и МЭМС-акселерометров

Параметр	Кварцевый акселерометр (например, ER-QA-03A3, Honeywell QA-2000)	МЭМС акселерометр (например, ADXL355, MS9001, Silicon Sensing)
Тип чувствительного элемента	Маятниковый (кварцевый пьезоэлемент)	Кремниевый емкостный или тензорезистивный
Диапазон измерений, g	$\pm 10 \dots \pm 50$	$\pm 2 \dots \pm 200$ (в зависимости от модели)
Разрешение / шум, $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	1–10	50–300
Смещение нуля (bias), mg	0,5–5	10–200
Нестабильность смещения нуля (bias stability), μg	10–50	100–1000
Температурная зависимость смещения, $\mu\text{g}/^\circ\text{C}$	20–50	300–2000
Диапазон рабочих температур, °C	$-55 \dots +85$ (до -60 °C в спец. исполнении)	$-40 \dots +85$ °C (до -55 °C для mil-класса)
Энергопотребление (при 12–15 В)	10–30 мА $\rightarrow$ 0,12–0,45 Вт	0,3–10 мА при 3,3 В $\rightarrow$ 1–30 мВт
Габариты, мм	25–40 корпус	3–10 мм кристалл (или корпус 5×5 мм, усредненно)
Срок службы и надёжность, ч	>100 000, высокая радиационная устойчивость	10 000–30 000, чувствительны к ударам и влаге
Типичные области применения	Навигация, подводные автономные аппараты, авиация	Дроны, бытовая электроника, вспомогательные INS

Кварцевые акселерометры демонстрируют высокую стабильность нуля и крайне низкий температурный дрейф благодаря монокристаллической пьезоэлектрической структуре. Это делает их

предпочтительными для навигационных и боевых систем, работающих в агрессивных условиях, включая повышенные радиационные поля и длительные циклы хранения.

Таблица 2

Примерная зависимость дрейфа INS от характеристик сенсоров

Тип сенсора	Смещение нуля, μg	Дрейф INS, м/мин	Погрешность за 10 мин, м
Кварцевый	5	1.2	7–10
MEMS (коммерческий)	100	6.5	50–70
MEMS (военного класса)	20	2.0	15–20

МЭМС-акселерометры, напротив, обеспечивают компактность, низкое энергопотребление и технологичность массового производства, однако их характеристики сильнее зависят от условий среды и стабильности электронной схемы. Сравнение характеристик этих акселерометров приведено в табл. 1.

ИНТЕГРАЦИЯ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ (IMU) В СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Инерциальный измерительный блок (IMU) объединяет три акселерометра и три гироскопа, обеспечивая измерение линейных и угловых ускорений. На основе этих данных INS вычисляет ориентацию, скорость и координаты подводного аппарата относительно инерциальной системы отсчёта. В навигационных комплексах подводных аппаратов используются две базовые архитектуры INS:

- платформенные (гиростабилизированные) системы с карданным подвесом – традиционный выбор для тяжелых навигационных платформ;
- бесплатформенные (strapdown) системы, где инерциальный блок жестко закреплен в корпусе.

Бесплатформенные INS являются более современным решением, однако они требуют более точных сенсоров, но при этом обеспечивают меньшую массу, повышенную виброустойчивость и надежность при длительной эксплуатации. Для компенсации ошибок, связанных с дрейфом нуля (табл. 2) и температурными влияниями, применяются алгоритмы выравнивания, адаптивные фильтры Калмана, а также гибридизация с гидроакустическими и магнитными измерительными подсистемами [10].

Такие методы позволяют корректировать инерциальную информацию по данным внешних навигационных источников (например, гидроакустических маяков или глубиномеров), повышая устойчивость решения навигационной задачи в течение длительного автономного хода подводного аппарата.

Также одним из ключевых параметров, определяющих качество инерциальных измерительных блоков, является дрейф нуля (bias stability) – изменение выходного сигнала при отсутствии ускорения или вращения. Данный показатель напрямую влияет на долговременную точность инерциальной навигации: даже малые смещения нуля приводят к накоплению ошибок координат и скорости, накапливаясь во времени.

На рис. 4 приведены усредненные значения дрейфа нуля для инерциальных систем на кварцевых и на МЭМС-

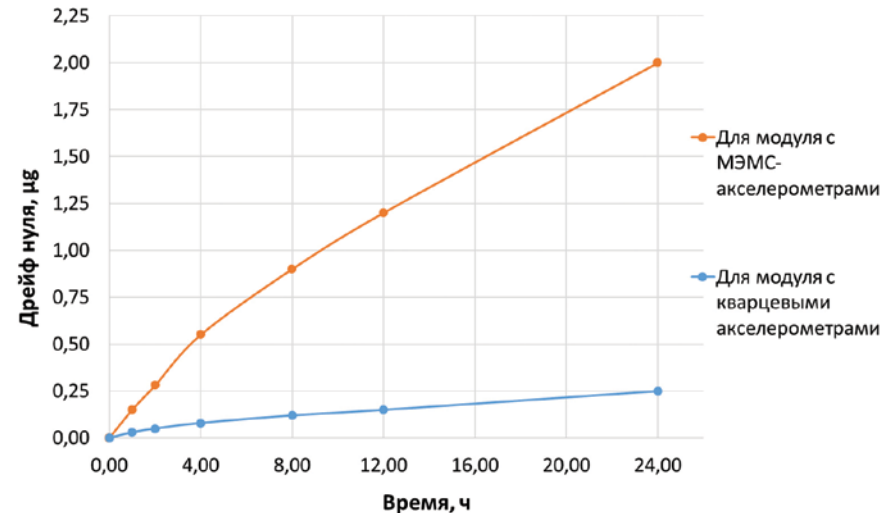


Рис. 4. Дрейф нуля (bias stability) во времени для инерциальных систем на кварцевых и на МЭМС-акселерометрах

акселерометрах, соответствующих навигационному и тактическому классам. Кварцевые системы демонстрируют высокую стабильность и минимальный рост смещения за сутки непрерывной работы. МЭМС-модули, напротив, характеризуются большей зависимостью от температуры и внутренних шумов, что требует регулярной коррекции и температурной компенсации.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ И НАПРАВЛЕНИЯ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Развитие инерциальных систем для подводного вооружения в России ведется с середины XX в. по сей день. За это время отечественные разработки прошли путь от механических гироскопических систем наведения первых поколений до современных цифровых инерциальных навигационных систем (INS), основанных на микромеханических сенсорах и адаптивных алгоритмах обработки данных. В последние десятилетия особое внимание уделяется созданию отечественной элементной базы, полностью независимой от зарубежных поставок.

Работы под руководством А. Г. Дмитриенко и коллег [9] показали возможность создания инерциальных модулей на базе отечественной технологии объемной микромеханики, позволяющих реализовывать акселерометры с чувствительностью 10–20 μg и температурной стабильностью на уровне 0,01%/°C. Эти решения могут использоваться в навигационных системах малогабарит-

ных автономных подводных аппаратов и наведения подводных дронов.

В российских организациях ОПК (АО «НПО Электромеханика», АО «ВНИИ Сигнал», АО «ЦНИИ Электронприбор», Санкт-Петербург) ведутся разработки интегрированных инерциальных модулей типа «БИНС-М», ориентированных на использование в подводных навигационных комплексах автономных аппаратов.

Модули включают трехосевые кварцевые акселерометры, волоконно-оптические гироскопы и цифровые блоки компенсации дрейфа и вибрационных воздействий. Важным направлением стала разработка автокомпенсационных сенсоров, обеспечивающих сохранение точности при длительном хранении и резких температурных колебаниях. Примером является автокомпенсационный угловой акселерометр, разработанный в МГТУ им. Н. Э. Баумана [11], обладающий высокой линейностью и пониженной зависимостью смещения нуля от внешних перегрузок.

Дополнительно в отечественной практике исследуются способы точной установки IMU-модулей в корпусе подводного аппарата с использованием лазерных трекеров и цифровой юстировки [12]. Такая методика позволяет снизить систематическую ошибку углового выравнивания с 0,3° до 0,05°, что критически важно при пуске с подводной платформы.

Научно-исследовательские коллективы также работают над создани-

ем гибридных INS, объединяющих данные от IMU, магнитометров и доплеровских лагов. Применение адаптивных фильтров Калмана и корреляционной обработки данных позволило сократить накопление ошибок при длительной автономной работе (до 15 мин) в 2–3 раза по сравнению с чисто инерциальными системами

Таким образом, отечественные разработки постепенно приближаются по точности и надежности к зарубежным аналогам (Honeywell, Safran, Northrop Grumman), при этом обладают преимуществами в термостабильности и устойчивости к внешним вибрациям благодаря более массивным корпусам и глубокой программной фильтрации сигналов.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Перспективы развития инерциальных систем для автономных подводных комплексов тесно связаны с прогрессом МЭМС-технологий и цифровой обработки сигналов. Основные направления продвижения:

- *рост точности MEMS-сенсоров*. Совершенствование технологий глубинного травления (DRIE) и методов компенсации остаточных напряжений позволит существенно снизить шум и дрейф, сближая характеристики MEMS с показателями кварцевых датчиков при заметном сокращении массы и стоимости;
- *интеллектуальная обработка данных*. Внедрение нейросетевых моделей и адаптивных алгоритмов (например, LSTM) дает возможность прогнозировать и корректировать дрейф IMU в реальном времени, снижая зависимость от внешних ориентиров;
- *термостабилизация и конструктивная защита*. Применение материалов с малым тепловым расширением (Invar, керамика) и локальных нагревателей повысит стабильность чувствительности при широких температурных колебаниях;
- *гибридизация с внешними датчиками*. Интеграция IMU с гидроакустикой, доплеровскими лагами и магнитными картами позволит проводить локальную коррекцию траектории в ближней зоне цели и уменьшить накопление ошибок при длительном автономном ходу;
- *импортозамещение и локальное производство*. Локализация МЭМС-производства и выпуск собствен-

ных кремниевых пластин открывают путь к массовому производству навигационных сенсоров и снижению зависимости от зарубежных поставок;

- *модульные и кластерные архитектуры*. Объединение нескольких IMU в интеллектуальные кластеры с взаимной перекалибровкой позволит компенсировать деградацию отдельных модулей и поддерживать точность в течение продолжительных операций.

В сумме эти направления ведут к созданию умных, адаптивных и автономных ИНС, способных обеспечивать высокую точность наведения в условиях отсутствия внешних ориентиров и активного радиоэлектронного противодействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акселерометры и инерциальные измерительные модули остаются фундаментальными элементами систем управления и навигации подводных автономных аппаратов и специальных морских комплексов. Их роль заключается не только в обеспечении точного измерения ускорений и ориентации, но и в гарантии автономности навигации при полном отсутствии внешних ориентиров.

Кварцевые сенсоры продолжают удерживать лидерство в точности, стабильности нуля и температурной устойчивости, оставаясь эталоном для навигационного класса приборов. В то же время развитие микроэлектромеханических технологий позволило MEMS-акселерометрам существенно сократить разрыв – по ключевым характеристикам они уже приближаются к кварцевым аналогам, при этом выигрывая в массе, энергоэффективности и технологичности интеграции в сложные электронные системы.

Особое значение приобретают отечественные инициативы в области микроэлектромеханики и навигационной электроники. Формирование национальной элементной базы, включая производство МЭМС-сенсоров и ИНС-модулей полного цикла, создает предпосылки для технологического суверенитета и долгосрочной независимости оборонно-промышленного комплекса.

Таким образом, вектор развития инерциальных систем для подводных навигационных комплексов направлен на объединение высокой точности классических кварцевых технологий с

адаптивностью и компактностью новых MEMS-платформ, что в перспективе обеспечит создание полностью автономных систем навигации следующего поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Titterton D.H., Weston J.L. Strapdown Inertial Navigation Technology// IET, 2004. – ISBN: 978-0-86341-358-2; e-ISBN: 978-1-84919-093-0; DOI: 10.1049/PBRA017E.
2. Wang B., Liu J., Deng Z., Fu M. A Model-Free Calibration Method of Inertial Navigation System and Doppler Sensors// IEEE Sensors Journal. – Vol. 21. – Issue 2. – 2021, p. 2219.
3. Honeywell Aerospace. QA2000 Quartz Flexure Accelerometer Data Sheet, 2022.
4. Liu H., Sun Y., Wang X., Li J., Chen Q. High-Performance MEMS Inertial Sensors: A Review // IEEE Sensors Journal. – 2022. – Vol. 22. – №1. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.petsci. 2022.06.005
5. Jekeli C. Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications. – Walter de Gruyter, 2001.
6. Beitia J., Clifford A., Fell C., Loisel P. Quartz Pendulous Accelerometers for Navigation and Tactical Grade Systems. – InnaLabs Technical Paper, 2019. – 12 p.
7. Fléty E., Bevilacqua F. Wireless Inertial Measurement Units in Performing Arts// Sensors. – 2025. – T. 25. – № 19. – P. 6188. DOI: 10.3390/s25196188. License CC BY 4.0.
8. Emami M., Taban M.R. A Low Complexity Integrated Navigation System for Underwater Vehicles // Journal of Navigation. – 2018. – Vol. 71. – №5. – P. 1161–1177. – DOI: 10.1017/S0373463318000140.
9. Дмитриенко А. Г., Панко А. А., Торшин С. И., Кирянина И. В. Об исследовании возможности создания инерциальных модулей на основе отечественных технологий объёмной микроэлектромеханики // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль, 2013. – № 3 (5). – С. 45–53.
10. Ma H., Mu X., He B. Adaptive Navigation Algorithm with Deep Learning for Autonomous Underwater Vehicle // Sensors. – 2021. – T. 21. – № 19. – P. 6406. – DOI: 10.3390/s21196406.
11. Сорока А.И., Колесников А.В., Лихоеденко К.П., Сидоркина Ю.А., Тунгушаев А.А. Особенности проектирования высокочувствительного автокомпенсационного углового акселерометра с использованием оптронно-световодных элементов // Изв. вузов. Поволжский регион. – Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 94–107. DOI:10.21685/2072-3059-2021-4-8
12. Маслов Н. А., Гисметулин А. Р. Установки инерциальных систем навигации с применением высокоточных систем лазерного трекинга // Вестник науки. – 2021. – Т. 3, № 1 (34). – С. 143–150. ■

Эта статья основана на личном опыте руководства серийным производством радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и призвана выделить процесс подготовки производства и вообще серийного выпуска в качестве самостоятельного и крайне важного процесса в жизненном цикле изделий военной техники (ВТ).

К сожалению, в последнее время на очень многих форумах, в интернете, в комментариях, статьях и пр. зачастую звучит такое мнение: «Продукт создан, осталось только наладить серийное производство», или иначе «масштабировать». Приводится мнение, что вот, мол, наша промышленность не способна адаптироваться под нужды потребителя. Даже в речах многих высоких руководителей звучит: «Мы разрабатываем сложную технику в отличие от конвейерного производства». Или еще интереснее: «Мы будем выпускать сложнейшую космическую и авиационную технику «конвейерным способом». Ну или самое «глубокая» мысль от заместителя руководителя одной из крупнейших госкорпораций о том, что можно на пару лет распустить по домам завод и через два-три года собрать весь его заново, и он без каких-либо проблем, в отличие от НИИ, продолжит выпускать продукцию. Прекрасная иллюстрация глубокого непонимания сути производственных предприятий, производства как бизнеса, причем не менее многогранного, чем разработка каких-либо новых, пусть и сложных, изделий ВТ.

Между тем серийный выпуск продукции – это самый сложный процесс, который начинается с освоения изделий в производстве, проходит многие стадии – отладки, коррекции технологий и конструкции самого изделия и, безусловно, ремонта, расширения возможностей эксплуатации и много еще чего. Количество разрабатываемых документов при этом может в разы превышать количество разрабатываемой документации в рамках НИОКР. А управление этим процессом, внедрение разрабатываемой документации и технологий само по себе являются отдельными видами деятельности, которые «выращиваются» на предприятиях десятилетиями, и имеют свои принципы и традиции.

Сегодня при всей кажущейся простоте вопроса очень немногие предприятия профессионально владеют процессами серийного выпуска РЭА. Более того, после 2009 г., когда изменилась формула ценообразования, многие научные организации предприняли шаги по сворачиванию кооперационных связей в пользу самостоятельного производства радиоэлектронной продукции. Отсутствие опыта, «школы» организации такого рода деятельности привело к различным результатам, но, как правило негативным,

СЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КАК НЕОТЪЕМЛЕМАЯ ЧАСТЬ СОЗДАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

Е. А. Рылов, канд. техн. наук, ген. директор,
В. Л. Филимонов, гл. конструктор,
А. В. Долгов, гл. инженер,
К. В. Яшин, гл. технолог,
АО «НПО «Завод «Волна»,
контакт. тел. (812) 313 6181

как в части качества, так и в части стоимости конечной продукции.

РАЗДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЙ «СЕРИЙНОГО» И «НЕСЕРИЙНОГО» ПРОИЗВОДСТВА

В связи с тем, что понятия «серийное» и «несерийное» производства порой по-разному воспринимаются, имеет смысл определиться с этими терминами во избежание неверного толкования. «Серийное» или «несерийное» производство не зависит от величины серии конкретного типа продукции. «Серийность» выпуска зависит от наличия или глубины технологической проработки производственных процессов. Имеется масса примеров выпуска крупных партий изделий без какой-либо минимальной подготовки производства. Такой тип организации работы характерен для опытных производств при научных предприятиях. На таких заводах основой качества изготовления изделия или даже партий изделий является квалификация рабочих и инженеров при минимальном участии технологов. (*Самый яркий пример – фабрика АО «Концерн «Созвездие»*).

Серийное производство предполагает его подготовку путем разработки технологий и соответствующей документации, изготовления оснастки, специализированных рабочих мест, обучения персонала, даже в случае изготовления единичного образца. (*Изготовление космической техники по РК-98. РК-2011 и т. д.*). Соответственно, при серийном производстве значительно вырастают затраты на его подготовку и освоение продукции, которые компенсируются серией выпуска.

Конвейерное производство – частный случай серийного производства, предполагающее самые значительные затраты на подготовку производства, детальную отработку технологических процессов и конструкции изделий, контроль производственных переделов и обучение персонала.

Для несерийного производства, как иногда называют опытное производство,

характерны минимальные затраты на освоение новой продукции и подготовку производства. Однако в данном случае имеется ряд существенных трудностей при повторяемости, достижении качества, освоении новых технологий и т. п.

Реалии говорят об отсутствии четких правил отнесения того или иного метода производства к серийному или несерийному. Как быть, например, с технологией поверхностного монтажа? Подготовка производства в данном случае для применения этой технологии проводится в обязательном порядке. Главное для серийного производства – это разработка технологической документации и ее сопровождение во время всего периода выпуска того или иного изделия. Из вышесказанного вытекают следующие выводы:

- необходимость процесса подготовки производства на заводе, выпускающем серийную продукцию, является аксиомой. При отсутствии крупных серий и не будучи опытным производством такой завод должен определяться как завод малых и средних серий, т. е. это предприятие находится между классическим серийным и опытным.
- с экономической точки зрения такое производство является самым экономически необоснованным. Учитывая эту особенность и необходимость развития, сделать рентабельным работу предприятия целесообразно и возможно только через увеличение номенклатуры выпускаемой продукции;
- в целях развития серийного завода представляется целесообразным и перспективным отнести технологические службы к центрам компетенций по подготовке производства, в том числе и кооперации холдингов, значительно усилив их и возложив на них решение технологических задач по унификации, освоению, инструментальному производству, в том числе созданию универсальных рабочих мест производства радиоаппа-

туры и пр., решив тем самым дилемму экономики серийного производства и проблемы его подготовки.

ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА

Подготовка производства (ПП) к серийному выпуску военной РЭА – это длительный и ресурсоемкий этап, который можно считать отдельным проектом. Его цель – разработать устойчивый, воспроизводимый и контролируемый процесс.

Технологическое проектирование и аттестация процессов: на основе переданной конструкторской документации (КД) технологи разрабатывают маршрутные карты (МК), операционные карты (ОК) и карты технологического процесса (КТП). Ключевое отличие – обязательная аттестация технологических процессов. Это означает, что каждый ТП (пайки, герметизации, монтажа) проходит экспериментальную проверку, по результатам которой подтверждается его способность стабильно обеспечивать параметры, заложенные в КД. Результаты аттестации оформляются актом.

Разработка и изготовление оснастки: для серийного производства проектируется и изготавливается комплекс специальной оснастки:

- сборочная оснастка – стапели, кондукторы, шаблоны, обеспечивающие точную пространственную компоновку компонентов;
- контрольно-проверочная аппаратура (КПА) – специализированные автоматизированные стенды, которые проводят 100%-ный или выборочный функциональный контроль изделий, имитируя рабочие режимы;
- инструмент – специальный монтажный, паяльный и демонтажный, прошедший поверку.

Квалификация поставщиков и материалов: формируется реестр квалифицированных поставщиков. Каждый потенциальный поставщик комплектов (микросхем, резисторов, конденсаторов, печатных плат) проходит аудит. Партии материалов и компонентов допускаются в производство только после проведения «входного контроля» с составлением протокола. В современных условиях особую важность приобретает задача импортозамещения и проверки компонентов на отсутствие «закладных элементов».

Подготовка и аттестация персонала: рабочие и инженеры, допущенные к сборке военной РЭА, проходят обязательное обучение и последующую аттестацию. Особенно это касается операторов, выполняющих критические операции: монтаж ВГА-компонентов (микросхем в корпусах с шариковой решёткой), волоконно-оптическую коммутацию, вакуумную пайку, герметизацию корпусов.

Все это проводится в автоматическом режиме на предприятиях, которые позиционируют себя как серийные, несмотря на кажущуюся сложность. Понятно, что все это делается в соответствии с ГОСТ РВ 15.301, но наличие целой конструкторско-технологической службы в данном случае является обязательным.

СЕРИЙНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО

Серийное конструкторское бюро (СКБ) – ключевое техническое звено на промышленном предприятии, которое осуществляет подготовку производства и непрерывное сопровождение изделий в процессе их серийного изготовления. В отличие от опытно-конструкторского бюро (ОКБ), которое создает принципиально новые разработки, СКБ решает задачи освоения изделий, адаптации и поддержания решения технических задач в процессе выпуска уже освоенной продукции. При этом на серийном КБ лежит огромный функционал, обеспечивающий бесперебойное изготовление продукции:

- решение текущих производственных проблем – инженеры СКБ оперативно реагируют на вопросы, возникающие в цехах (сложности сборки, несоответствия материалов, отклонения в размерах);
- консультационная поддержка – оказание помощи технологам и рабочим в чтении и интерпретации конструкторской документации;
- анализ и устранение дефектов – проведение оперативного анализа брака и разработка мер по его предотвращению;
- управление изменениями конструкторской документации;
- инициирование изменений: выявление необходимости модификаций в ходе производств;
- разработка корректирующей документации – извещения об изменениях, управление заделами и сроками внедрения изменений;
- согласование изменений – взаимодействие с заказчиком по вопросам модификации конструкции;
- работы по модернизации и унификации;
- разработка модификаций – создание исполнений изделий под различные требования заказчика;
- унификация компонентов – замена устаревших или дефицитных элементов современными аналогами;
- локализация производства – организация замены импортных комплектующих отечественными аналогами;
- снижение себестоимости – поиск и внедрение решений по оптимизации стоимости производства;
- анализ рекламаций – обработка претензий от потребителей;

- прогнозирование развития продукции – анализ тенденций совершенствования изделий.

Функционал СКБ охватывает полный цикл сопровождения серийной продукции от запуска до снятия с производства. При этом надо понимать, что в сопровождении серийного производства формируются своя «школа», свои устои, и зачастую инженер серийного производства решает самые сложные задачи, которые, как правило, не под силу инженеру-разработчику. Например, управление заделами на разных стадиях производства или решение технических вопросов с учетом необходимости сохранения задела и уже понесенных затрат на его изготовление.

КОРРЕКЦИЯ КД И ТД В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА И ВЫПУСКА СЕРИЙНОЙ ТЕХНИКИ

Процесс коррекции – это не признак неудачи, а естественный этап «обкатки» документации в реальных производственных условиях.

Выявление нетехнологичных решений – конструкция, оптимальная для ручной сборки опытного образца, может быть неприемлема для серийного. Например, сложность доступа к точкам пайки, отсутствие монтажных отверстий, нестандартный крепёж. Технологи и инженеры СКБ предлагают изменения, не влияющие на электрические и функциональные параметры РЭА, но упрощающие сборку.

Замена электронных компонентов (ЭК) – это одна из самых частых причин изменений. ЭК могут сниматься с производства, попадать под санкционные ограничения или меняться их спецификации и т. д. Процесс коррекции конструкторской и технологической документации – постоянный и для серийного производства является возмущающим. Особенно важна отработка заделов, ведь изготовление изделий может начинаться на разных этапах производства. Более того, поскольку покупные элементы, обеспечение ЭРИ может находиться на разных этапах, вплоть до оплаченной, но не полученной закупки, наиболее целесообразно принять парадигму: «задел неизвестен никогда». И действительно, никакая из служб завода не знает всей картины многоменклатурных закупок. Поэтому имеет смысл отрабатывать задел с пониманием его полной доработки и доукомплектования, с принятием решения непосредственно в производстве, исходя из текущих производственных планов. И все это – работа КБ сопровождения производства, т. е. СКБ. Для многономенклатурного производства постоянная отработка и коррекция КД естественны и требуют много усилий для функционирования этих процессов.

СВЯЗЬ СТОИМОСТИ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА С СЕРИЙНОСТЬЮ ВЫПУСКАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

Экономика серийного производства военной РЭА имеет ярко выраженную нелинейную зависимость:

- высокие постоянные затраты (капитальные вложения) – затраты на ПП (аттестация ТП, разработка и изготовление оснастки, КПА, квалификация поставщиков) являются единовременными и весьма значительными. Они не зависят от объема выпуска;
- низкие переменные затраты (операционные расходы) – после отладки процесса стоимость производства одной единицы продукции складывается в основном из затрат на материалы и оплату труда;
- эффект масштаба – для «мелкосерийного» производства (1–10 единиц в год) доля постоянных затрат на каждое изделие колоссальна, что делает его крайне дорогим. Крупносерийный выпуск (сотни и тысячи единиц) позволяет распределить капитальные затраты на большой объем, резко снизив себестоимость единицы. Это экономически обосновано для создания унифицированных платформ и модульных архитектур в военной технике.

Связь между стоимостью подготовки производства и серийностью выпускаемых изделий является фундаментальным законом экономики предприятия. Затраты на подготовку выступают как постоянные инвестиции, эффективность которых напрямую зависит от объема выпуска. Грамотное управление этой взаимосвязью – нахождение баланса между уровнем инвестиций в ПП, размером серии и гибкостью производства – является залогом конкурентоспособности и финансовой устойчивости компании в современной высоко динамичной среде. И кроме этого, серьезную экономию может дать постоянная отработка подготовки производства как самостоятельного и главного процесса на серийном предприятии.

КОРРЕКЦИЯ КД И ТД КАК НЕОТЪЕМЛЕМАЯ ЧАСТЬ ПРОЦЕССА СЕРИЙНОГО ВЫПУСКА ИЗДЕЛИЙ ВТ

Система управления изменениями при выпуске ВТ – это стратегический актив. Ее остановка означает заморозку конструкции со всеми недостатками и неспособность адаптировать к новым вызовам. Этапы процесса внесения изменения:

- инициация – фиксация проблемы или предложения по улучшению (Акт о проблеме, изменению);
- проработка – технико-экономическое обоснование, анализ влияния изменения на смежные системы;

- согласование – внутреннее согласование на заводе (технологи, производство, ОТК) и внешнее – с головным разработчиком (ОКБ) и заказчиком (военная приёмка);
- внедрение – издание приказа о внесении изменения, обновление КД и ТД, информирование персонала;
- валидация – контроль первых серийных изделий, выпущенных по новой документации.

ПЕРЕХОД НА ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТООБОРОТ (ЭДО)

Оборонно-промышленный комплекс (ОПК) является локомотивом высоких технологий, однако процессы управления документацией на многих предприятиях до сих пор остаются архаичными. Тысячи чертежей, спецификаций, технологических карт и отчетов циркулируют в бумажной форме, что создает риски для безопасности, замедляет темпы разработки и модернизации вооружений. Переход на ЭДО в ОПК – это не опция, а необходимое условие сохранения конкурентоспособности и выполнения госзаказа в сжатые сроки. Несмотря на сложности, преимущества перехода являются стратегическими:

- ускорение выполнения ГОЗ – сокращение времени на согласование конструкторской и технологической документации с заказчиком (Минобороны) и смежниками;
- повышение сохранности гостайны – электронная система с протоколированием обеспечивает лучший контроль, чем бумажный документ, который можно скопировать или вынести. Легко отследить, кто и когда работал с документом;
- снижение рисков человеческих ошибок – исключается работа по устаревшим версиям чертежей, обеспечивается централизованное хранение единственной актуальной версии;
- эффективная кооперация – создание защищенных сегментов ЭДО для взаимодействия с сотнями предприятий-смежников без риска утечки информации;
- цифровой след и ауди – формирование полной цифровой истории создания изделия, что критически важно для анализа дефектов, модернизации и ремонта техники на протяжении всего ее жизненного цикла;
- единое информационное пространство – все участники работают с актуальными версиями КД и ТД;
- сквозная прослеживаемость – система хранит полную историю изменений для каждого узла и изделия, что критически важно для расследования инцидентов;
- защита информации – жесткое разграничение прав доступа, электрон-

но-цифровая подпись (ЭЦП), шифрование данных защищают гостайну и интеллектуальную собственность;

- интеграция с системами автоматизированного проектирования (САПР) – прямая связь позволяет передавать 3D-модели на станки с ЧПУ, исключая ошибки перевода «чертеж > программа».

Переход на электронный документооборот технической документации в ОПК – это сложный, но неизбежный шаг, главное – это использование инструмента, но не подмена отлаженных процессов оборота технической документации.

КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДИСЦИПЛИНЫ И СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ КАК ФАКТОРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА

Понимание качества как суммы усилий всех служб в обеспечение общих целей является стержнем борьбы за организацию бездефектного производства. Иными словами, качество достигается в процессе производства. Основным фактором обеспечения качества – вовсе не контроль, а, напротив, соблюдение технологической дисциплины. Технологическая дисциплина – это закон, не терпящий нарушений. Контроль соблюдения технологий на серийном производстве РЭА должен осуществляться по всей цепочке технологических переделов, по всей цепочке точек контроля, так как контроль – это тоже технология. Отношение к технологической документации должно вырабатываться у руководителей всех рангов как к базе осуществления и адаптации производства к постоянно развивающейся технике. Поддержание производственной среды – это тоже часть технологической дисциплины, влияющая буквально на всё. По состоянию производственной среды легко определить отношение руководителей к системе обеспечения качества в целом. Таким образом, если на предприятии начинает выявляться брак, это недоработка руководства и, безусловно, конструкторских, технологических и контролирующих служб.

Говоря о качестве, хочется вспомнить слова легендарного технического директора, руководившего с 1981 по 2011 г. технической службой Ярославского радиозавода И. Б. Флегонтова, который говорил: «Есть три службы на любом предприятии: конструктора, технологи и ОТК, которые не позволяют рабочему сделать брак». Точнее не скажешь.

ВЫВОДЫ

- Организация серийного производства военной РЭА представляет собой не этап тиражирования, а сложную, непрерывно развивающуюся систему, являющуюся самостоятельным

и крайне важным процессом жизненного цикла изделий ВТ.

- Глубина и тщательность подготовки производства напрямую определяют стабильность, себестоимость и темпы освоения выпуска серийной техники.
- Регламентированный процесс коррекции КД и ТД, осуществляемый через СКБ, является инструментом непрерывного совершенствования и адаптации изделия к реальным условиям, обеспечивая его актуальность и технологическую независимость.
- Экономическая эффективность се-

рийного производства напрямую зависит от его масштаба, что диктует необходимость расширения номенклатуры, модульного подхода и унификации.

- Современные информационные решения и гибкие производственные методики являются конкурентными преимуществами только при их продуманном внедрении.
- Краеугольным камнем, гарантирующим высочайшее качество и надежность каждого образца выпускаемой техники, является неукоснительное

соблюдение технологического обеспечения качества в производстве.

Таким образом, отлаженное и устойчивое серийное производство может существовать или создаваться вновь только при соответствующем отношении к нему как к отдельному виду научно-технической деятельности со своими принципами построения, специально подготовленными кадрами, соответствующим инженерным и организационным опытом и, главное, при понимании важности роли организации серийного выпуска РЭА в жизненном цикле ВТ. ■

ВВЕДЕНИЕ

В рамках федеральной программы субсидирования российских организаций, которые выполняют комплексные проекты по разработке, созданию и внедрению в серийное производство судового комплектующего оборудования, АО «Концерн «НПО «Аврора» (далее – Общество), выполняет работу под шифром «Замещение–приборы АСУ ТП», цель которой – создание линейки типовых приборов (всего 23 шт.) для применения в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) судов и плавучих сооружений с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ).

Разработка этой продукции отвечает:

- стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 г., которая предусматривает развитие магистральной транспортной инфраструктуры, в том числе за счет обеспечения функционирования и роста грузопотока Северного морского пути (СМП) как полноценного международного транспортного коридора, включая развитие ледокольного флота;
- стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 г., в качестве одной из целей которой определено удовлетворение потребностей государства и бизнеса в современной продукции отечественного судостроения и кораблестроения;
- стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г., которая в целях модернизации и развития инфраструктуры арктической транспортной системы, обеспечивающей сохранение СМП как единой национальной транспортной магистрали России, предусматривает рост объемов грузоперевозок по этому пути, в том числе за счет государственной

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРИБОРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ С ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

А. В. Ишанин, канд. техн. наук, гл. конструктор комплексных систем управления АО «Концерн «НПО «Аврора»,
контакт. тел. (812) 297 2311

поддержки строительства судов ледокольного, аварийно-спасательного и вспомогательного флотов.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ ТИПОВЫХ ПРИБОРОВ

Линейка новых типовых приборов нацелена на решение проблем в сфере судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений, а именно:

- удовлетворение потребности судостроительной отрасли в современной продукции в области систем автоматизированного управления;
- повышение доли отечественной продукции в судостроительной отрасли;
- развитие импортозамещения;
- развитие и поддержание научно-технического, технологического, промышленного и кадрового потенциалов на уровне, обеспечивающем выпуск высокотехнологичной конкурентоспособной продукции.

Разрабатываемые типовые приборы должны обеспечить выполнение следующих функций в составе систем управления:

- автоматическое дистанционное управление, регулирование, защита

и контроль параметров реактора, а также защита по технологическим параметрам реакторной установки во всех эксплуатационных режимах и при проектных авариях;

- формирование управляющих команд на исполнительные органы систем безопасности реакторных установок и контроль за их работой;
- автоматическое управление расходом питательной воды в реакторной установке, регулирование параметров активных каналов системы аварийного расхолаживания и паротурбинных установок.

АНАЛИЗ РЫНКА И ОСНОВАНИЯ К ДЕКОМПОЗИЦИИ СИСТЕМ, ТИПИЗАЦИИ ПРИБОРОВ И ИХ ПАРАМЕТРОВ

Проведенный на первом этапе разработки КД типовых приборов системы управления и защиты реакторной установки и системы управления реакторной установкой из состава АСУ ТП анализ открытых источников показал, что современные отечественные и зарубежные аналоги типовых приборов отсутствуют, поскольку отсутствуют

аналогичные судовые объекты управления, разработанные и построенные за последние 25 лет без привлечения АО «Концерн «НПО «Аврора».

Наиболее близким действующим отечественным аналогом АСУ ТП является комплексная система управления техническими средствами (КСУ ТС) для атомных ледоколов пр. 22220.

Ключевыми требованиями, оказывающими влияние на формирование структуры КСУ ТС пр. 22220 и аппаратно-конструктивного исполнения приборов из ее состава являются:

- обеспечение выполнения функций безопасности при наличии двух отказов в системе управления;
- резервирование электропитания аппаратуры;
- контроль линий связи с датчиками, сигнализаторами и исполнительными органами на введенной установке;
- соответствие судовым условиям (климатико-механические требования к аппаратуре): виброустойчивость, удароустойчивость, качка, тепло-, холодоустойчивость, водозащищенность, электромагнитная совместимость.
- кибербезопасность. Это меры безопасности, применяемые для защиты от уязвимостей, возникающих в результате ненадлежащей эксплуатации, интеграции, обслуживания и проектирования компьютеризированных систем, и от преднамеренных и непреднамеренных киберугроз.

Однако примененные в составе указанной КСУ ТС приборы не могут быть использованы на заказах других проектов из-за отличий в Перечнях контролируемых параметров систем реакторной установки, Перечнях автоматизированных механизмов, ДУА и регуляторов систем реакторной установки заказов пр. 22220 от аналогичных Перечней заказов прочих проектов. При этом в КСУ ТС пр. 22220 применен комплекс автоматизации на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) иностранного производителя.

Проведенный анализ перечисленных Перечней, ДУА и регуляторов систем реакторной установки заказов различных проектов, а также требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии и Правил Российского морского регистра судоходства позволил определить основные типовые приборы указанных систем управления реакторной установки и разделить их на функционально достаточные группы:

- приборы системы управления и защиты реакторной установки (СУЗ);
- приборы системы управления реакторной установкой (СУ РУ);

– приборы системы управления расходом питательной воды (СУ ПВ).

С учетом требований Перечней автоматизированных механизмов, ДУА и регуляторов систем реакторной установки и имеющихся исходных данных по размещению приборов на заказах различных проектов, а также применяемых типов датчиков, сигнализаторов и исполнительных органов в составе каждой из функционально достаточных групп типовых приборов выделены:

- типовые образцы приборов системы управления и защиты реакторной установки (шифр – ТМР), а именно приборы:
 - регулирования и контроля технологических параметров (ПРКТП),
 - распределения питания контроля (ПРПК),
 - управления компенсирующими группами (УКГ),
 - аварийной защиты (ПАЗ),
 - взведения аварийной защиты (ПВАЗ),
 - контроля мощности и температуры (КМТ),
 - распределения питания приводов с фильтром (ПРПП),
 - пусковой аппаратуры (ПА);
- типовые образцы приборов системы управления реакторной установкой (шифр – ТШК), а именно приборы:
 - ввода-вывода информации,
 - выходных устройств,
 - логического управления,
 - сбора информации,
 - гальванической развязки,
 - коммутатор сети Ethernet,
 - сигнализации для местных постов;
 - распределения питания,
 - размножения сигналов;
- типовые образцы приборов системы управления расходом питательной воды (шифр – ТВГ), а именно приборы:
 - управления и регулирования расхода питательной воды,
 - управления и регулирования параметров паротурбинной установкой (ПТУ),
 - следящего управления,
 - распределения питания для расходов,
 - распределения питания для арматуры ПТУ,
 - релейный прибор размножения сигналов.

Исходя из количества подключаемых линий кабельных связей и интерфейсов передачи информации в пределах помещений заказов проектов атомных ледоколов и плавучих энергоблоков определены оптимальные количества и типы входов, выходов, интерфейсов, параметров электропитания и виды конструктивных исполнений указанных типовых приборов.

СПОСОБЫ ИНТЕГРАЦИИ ВНОВЬ СОЗДАВАЕМЫХ ТИПОВЫХ ПРИБОРОВ В СУДОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЯЭУ

Возможность применения типовых приборов в уже реализованных и вновь создаваемых проектах основана на следующих технических решениях:

- использование стандартных протоколов информационно-технического сопряжения: Ethernet, EtherCat и пр.;
- применение стандартных конструктивов шкафов с апробированными габаритными и установочными размерами;
- применение программно-логического контроллера «АвроПЛК», спроектированного под задачи импортозамещения иностранной платформы автоматизации (широко распространенной на ранее спроектированных изделиях Общества) и обеспечивающего кроссплатформенность, взаимозаменяемость, интероперабельность [1].

В ходе проработки вопросов функционирования типовых приборов в составе систем управления созданы комплексы программного обеспечения компьютерных моделей (КМ) типовых приборов, обеспечивающих выполнение алгоритмов управления ЯЭУ. ПО компьютерных моделей приборов позволяет обрабатывать в виртуальном режиме разработанные алгоритмы и отладку общесистемного и функционального программного обеспечения типовых приборов системы управления и защиты реакторной установки и типовых приборов системы управления реакторной установкой из состава АСУ ТП.

Комплексы ПО КМ приборов типа ТМР и ТВГ функционируют в среде операционной системы ЗОСРВ Нейтрино, КПДА 2021. ПО КМ разработано с использованием отечественной среды динамического моделирования SimInTech.

Комплексы ПО КМ приборов типа ТШК позволяют обработать алгоритмы сбора информации о состоянии оборудования реакторной установки (РУ), формировать заданные уставки и выдавать информацию в смежные приборы системы управления РУ. Комплексы ПО КМ ТШК функционируют в среде независимой операционной системы Linux. Функциональное ПО разработано с использованием языков программирования ST и FBD (в соответствии с МЭК 61131-3).

В целях подтверждения достигнутых характеристик эффективности и безопасности, предусматривается на последующих этапах выполнения работы проведение стыковки приборов АСУ ТП (опытных образцов) с компьютерными моделями функционирования («гибридный стенд») на базе вычислительно-моделирующего комплекса (ВМК), реали-

Многолетний опыт разработки многофункциональных радиоэлектронных комплексов (МРЭК) для ВМФ в АО «Концерн «Гранит-Электрон» позволяет сформулировать несколько ключевых принципов формирования МРЭК различного базирования: морских – для надводных кораблей (НК) различного водоизмещения и назначения, подводных лодок (ПЛ), как неатомных ПЛ, так и подводных крейсеров, а также береговых – стационарных и мобильных.

К таким принципам можно отнести следующие:

- Создание МРЭК как части единой интегрированной системы боевого управления НК или тактической группы (ТГ) НК и обеспечение необходимыми средствами для обмена информацией. В то же время МРЭК может функционировать и как самостоятельная система.
- Обеспечение многофункциональности (многозадачности) МРЭК, что позволяет решать большинство боевых задач управления оружием и вспомогательных задач в пределах НК или ТГ НК. К числу таких задач в существующих и перспективных МРЭК следует отнести [1]:
 - обеспечение навигационной безопасности;
 - помехоустойчивое освещение воздушной и надводной обстановки с повышенной скрытностью: обнаружение одиночных и групповых надводных целей в активном режиме и их автоматическое сопровождение. Определение координат и параметров движения сопровождаемых целей с селекцией движущихся и неподвижных целей;
 - освещение дальней надводной обстановки по излучениям радиоэлектронных средств, их пеленгование и определение параметров излучаемых сигналов (задачи радиотехнической разведки, РТР);
 - классификация целей с определением типа РЛС и ее носителя с использованием априорной базы данных и актуальных разведданных, как собственных, так и от сторонних источников. Определение степени опасности целей;
 - выработка данных целеуказания (ЦУ) ракетному оружию, артиллерийским и торпедным комплексам НК и зенитно-ракетным комплексам при обеспечении противовоздушной обороны;
 - информационно-логическое взаимодействие и прием информации от авиационных комп-

КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

А. С. Долгополов, канд. техн. наук,
В. А. Кружалов, канд. физ.-мат. наук,
С. А. Львовский, гл. конструктор (по направлению),
Ю. Ф. Подоплёкин, д-р техн. наук, проф., академик РАН,
 АО «Концерн «Гранит-Электрон»,
 контакт. тел. (812) 578 0251, +7 (981) 902 0761

лексов разведки и целеуказания;

- выработка ЦУ ракетному оружию взаимодействующих НК ТГ для обеспечения формирования единого информационного поля.
- прием информации о надводной обстановке от космических аппаратов (КА);
- определение государственной принадлежности целей;
- выполнение функции радиоэлектронного противодействия радиоэлектронному вооружению противника с использованием собственной аппаратуры.

Совокупность задач, решаемых конкретным комплексом, определяется заказчиком в соответствии с техническим заданием и зависит от боевого назначения носителя и условий размещения и эксплуатации;

- Расширение функциональных возможностей МРЭК за счет интегрирования в одной системе данных от разнородных информационных датчиков.
- Обеспечение скрытности функционирования МРЭК за счет применения квазинепрерывных шумоподобных сигналов малой мощности.
- Параметрическая и конструктивная унификация различных функциональных подсистем (в дальнейшем – модулей) комплексов для носителей разных типов. Это подразумевает, что унификация имеет две составляющие. Во-первых, каждая функциональная подсистема, обеспечивающая решение соответствующей задачи в различных комплексах, имеет близкие (идентичные) технические параметры, и, во-вторых, каждая такая подсистема имеет единое конструктивное решение. Это позволяет сформулировать следующий принцип построения МРЭК – модульный принцип.

В этом случае отдельный функциональный модуль, выполняющий определенную задачу из перечисленных выше, имеет законченное конструктивное решение, и полная конструкция МРЭК может быть образована из унифицированных модулей, обеспечивающих решение совокупности поставленных задач.

- Оптимизация приборного (модульного) состава в соответствии с функциональным назначением МРЭК.
- Оптимизация экономических показателей в соответствии с оптимальным приборным составом и применением инновационных технологических решений.

В соответствии с изложенными положениями в предлагаемом материале рассматриваются перспективные варианты технологий разработки и изготовления базовых функциональных модулей, обеспечивающих комплектацию МРЭК освещения надводной и воздушной обстановки, целеуказания ракетному, артиллерийскому и торпедному оружию, корабельных пунктов приема информации, станций обнаружения радиосигналов. Функциональные модули разрабатываются на базе твердотельной СВЧ электроники и высокотехнологичных цифровых устройств обработки информации. Кроме того, создается соответствующая стендовая база для отладки и регулировки радиоэлектронных комплексов.

В том числе рассматривается комплектование МРЭК для малотоннажных НК (корветов, катеров пограничной охраны и безэкипажных катеров), а также радиолокационных комплексов систем ПЛ, располагаемых на подвижных устройствах.

Разработка вышеозначенной технологии (технологий) позволит создать на ее базе ряд радиотехнических комплексов морского и берегового базирования (в том числе мобильных) для выработки ЦУ ракетному и торпедному

оружию в интересах ТГ НК и ПЛ ВМФ в сложной метеорологической и помеховой обстановке.

Исходя из обозначенных выше задач, можно назвать ряд базовых функциональных модулей, которые могут иметь завершённое конструктивное воплощение с той или иной степенью унификации, пригодной для комплектации МРЭК различного базирования. Логически и исторически МРЭК разрабатывается как совокупность функционально связанных приборов в виде конструктивно оформленных единиц, соединённых между собой линиями связи, что обусловлено целесообразностью и возможностью размещения составных частей МРЭК на конкретном носителе (НК, ПЛ, автомобиле, береговой платформе). Антенные приборы (антенные посты – АП), содержащие, как правило, совокупность различных антенн с приводами и входные каскады приемников или оконечные каскады передатчиков, располагаются на надстройках или верхних палубах НК или выдвижных устройствах ПЛ. Приборы обработки и индикации, а также приборы питания и другие вспомогательные приборы устанавливаются в отсеках и соединяются с АП кабельными и волноводными линиями, длина которых может достигать в отдельных случаях многих десятков и даже сотен метров. Последнее обстоятельство может привести к существенному ослаблению передаваемого сигнала, и поэтому требуется либо компенсация потерь с помощью трактовых усилителей, либо радикальное решение проблемы с помощью использования волоконнооптических линий передачи. Целесообразность, а также преимущества и недостатки использования последнего варианта как отдельного элемента МРЭК будут рассмотрены ниже.

В традиционной терминологии прибор как составная часть МРЭК может выполнять несколько вышеозначенных функций и, предлагая концепцию модульного построения, необходимо отметить следующие моменты:

- функциональный модуль в рассматриваемом контексте подразумевает некую унифицированную конструкцию, обеспечивающую механическое сопряжение различных модулей в единый конструктив, который может иметь различную комплектацию, соответствующую задачам отдельного прибора или МРЭК в целом и при этом обеспечивает минимальные габариты и удобства обслуживания;
- унификация и модульный принцип построения экономически целесообразны как для производителей

модулей, так и для разработчиков и изготовителей комплексов. При таком подходе существенно снижаются затраты на проектирование и отработку и значительно снижаются сроки разработки. Упрощается разработка программно-математического обеспечения управления и обработки информации.

Исходя из вышеозначенного перечня задач, решаемых МРЭК, в ряд унифицированных функциональных модулей следует включить:

- антенные модули, обеспечивающие различные информационные каналы, а именно: активный радиолокационный канал, пассивный канал РТР (станция обнаружения радиосигналов) с возможным разбиением на частотные поддиапазоны, канал связи с авиационными носителями (в том числе с БПЛА), каналы обмена информацией с КА, канал госопознавания и др.);
- модули генерирования и усиления радиосигналов;
- модули приема радиосигналов сложной формы, в том числе с преобразованием или переносом частоты на базе твердотельной электроники;
- модули первичной и вторичной обработки сигналов;
- модули отображения информации с элементами искусственного интеллекта;
- модули радиоэлектронного противодействия.

Общая задача создания полного ряда унифицированных модулей как базы формирования различных МРЭК является предметом самостоятельного исследования, которое предполагается выполнить в рамках соответствующей НИР в 2026–2028 гг. Однако уже сейчас можно предложить перспективные варианты таких модулей, проработанных в инициативных работах в качестве научно-технического задела. Ниже будут рассмотрены некоторые из них.

Наиболее сложной конструктивной задачей является создание унифицированных антенных субмодулей, на базе которых можно было бы комплектовать антенные приборы с различным набором информационных каналов, как упомянуто выше. Сложность задачи обусловлена несколькими причинами, а именно:

- многообразием задач, требующим применения антенн различных типов с диаграммами направленности разного вида,
- широким диапазоном рабочих частот, например, для канала РТР,
- необходимостью обеспечения заданного сектора обзора (сканиро-

вания) в условиях ограничений, связанных с размещением,

- необходимостью обеспечения электромагнитной совместимости при одновременной работе различных каналов и компоновке их антенных систем в непосредственной близости друг от друга.

Кроме того, антенные приборы требуют наличия радиопрозрачного обтекателя, защищающего внутреннюю аппаратуру от внешних воздействий, в частности от гидростатического давления для АП, размещаемых на выдвижных устройствах ПЛ. Унификация обтекателей для различных АП имеет ограниченные рамки и возможна только для приборов с близкими габаритами.

В качестве примера АП, укомплектованного унифицированными антенными модулями, решающими частные задачи, можно рассмотреть следующую компоновку. Общая конструкция составляется из нескольких этажей, в каждом из которых расположен отдельный унифицированный модуль или субмодуль. На верхнем этаже располагается антенный модуль активного радиолокационного канала, совмещенный с антенным модулем канала обмена информацией с КА. Указанный совмещенный модуль выполнен в виде плоской многослойной конструкции на базе печатных антенных решеток и снабжен двухосным электрическим приводом вращения, который обеспечивает обзор верхней полусферы, необходимый для связи с КА. Подобная конструкция, проработанная и испытанная в рамках инициативной НИР в АО «Концерн «Гранит-Электрон», показала хорошие результаты и может быть рекомендована в качестве унифицированного антенного модуля для комплектования МРЭК различного базирования.

На нижних этажах АП могут быть расположены несколько антенных субмодулей канала РТР, обеспечивающих прием сигналов в нескольких наиболее информативных частотных диапазонах. Антенная система таких субмодулей образована кольцевыми антенными решетками (КАР), содержащими от 6 до 8 широкополосных элементарных излучателей с электронным переключением, обеспечивающим круговой обзор по азимуту. Такая схема канала РТР отработана в ряде комплексов, в том числе серийных, и может быть основой для создания унифицированных модулей для МРЭК. Следует отметить, что задача РТР подразумевает пеленгование источников радиосигналов с определенной точностью, которую желательно иметь порядка нескольких угловых градусов.

Указанные выше КАР с простым переключением антенн имеют угловое разрешение порядка ширины диаграммы отдельного излучателя, т.е. в лучшем случае $\sim 45^\circ$, поэтому для повышения углового разрешения следует отработать более совершенные методы обработки, например, за счет сравнения амплитуд или фаз сигналов с различных элементов КАР. Для этого диаграммы направленности отдельных излучателей должны иметь гладкую форму (без колебаний) в условиях близкого расположения различных конструктивных элементов, что требует дополнительной отработки общей конструкции с применением широкополосных радиопоглощающих материалов.

Также в виде отдельного этажа в АП может быть скомпонована антенная система канала государственного опознавания, обеспечивающая круговой сектор обзора по азимуту. Она также может представлять собой КАР из нескольких излучателей, сигнал от которых объединяется сумматором. Необходимо при этом иметь в виду, что в канале госопознавания используются достаточно высокие уровни мощности и антенная система должна быть рассчитана на требуемую величину.

Отдельно следует остановиться на инновационной технологии изготовления антенных систем, основанной на использовании печатных СВЧ-плат большого размера [2]. Такая технология уже реализована в антенной системе (АС) модуля канала обмена информацией с КА. АС представляет собой многослойную печатную плату, в каждом из слоев которой расположена система печатных излучателей (антенная решетка) различных частотных диапазонов и системы распределения сигнала. В реализованном случае на одном антенном полотне размещены излучатели 3-и 10-сантиметровых диапазонов, причем излучатели 3-сантиметрового диапазона размещены между излучателями 10-сантиметрового диапазона, как показано на рис. 1.

Элементарные ячейки излучателей объединяются в единую излучающую апертуру в виде антенной решетки с помощью распределительных систем, расположенных в нижних слоях. Связь между слоями осуществляется с помощью межслойных переходов или окон связи в экранирующем проводнике. Полный размер и форма апертуры определяются требуемыми антенными параметрами и в представленном случае составляют величину ~ 700 мм. Преимуществами такой технологии является малый габарит по глубине АС ($\sim 15\text{--}20$ мм) и возможность простого масштабирования по площади апертуры для достижения необходимых пара-

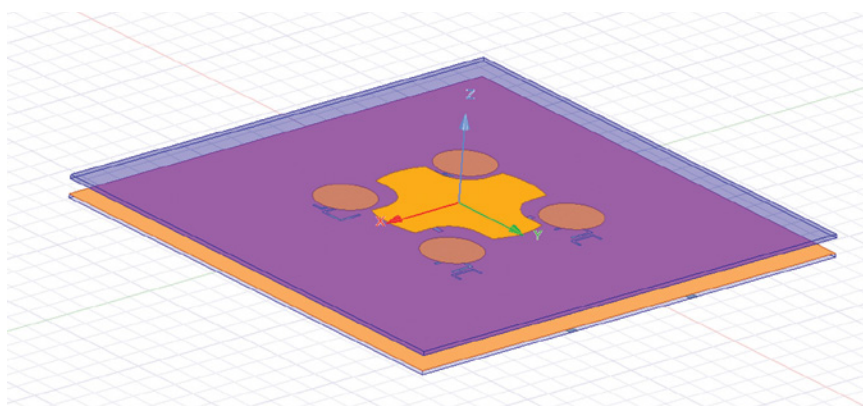


Рис. 1. Структура элементарной ячейки излучателей совмещенной двухдиапазонной антенной решетки

метров при отработанных элементарных излучателях и элементах системы распределения сигнала.

По аналогичной технологии могут быть созданы и элементы КАР, входящие в состав субмодулей системы РТР, например, на базе широкополосных спиральных излучателей.

В качестве унифицированного субмодуля приемного устройства канала РТР может быть рассмотрен широкополосный преобразователь (транспонатор) частоты, переносящий входной сигнал (частота которого может быть в пределах от 0,1 до 18 ГГц или даже до 40 ГГц) в стандартную полосу, например, от 1,5 до 2 ГГц с сохранением закона модуляции. Это позволяет использовать единое устройство во всех частотных поддиапазонах канала РТР для дальнейшей обработки. Для охвата всей полосы радиочастот обеспечивается последовательный просмотр частотных поддиапазонов либо может быть осуществлен параллельный многоканальный обзор. В последнем случае обеспечивается одновременность обзора, но усложняется аппаратная часть.

В настоящее время модульный подход в наиболее полной мере реализован при построении вычислительных систем, которые являются составной частью устройств обработки информации, как первичной, так и вторичной, а также устройств отображения.

Ниже приводятся некоторые соображения относительно принципов создания унифицированных вычислительных систем для модульного построения МРЭК.

Конечная первичная обработка информации в комплексе осуществляется в цифровых системах обработки сигналов. Сигналы преобразуются в цифровую форму посредством быстродействующих цифроаналоговых микросхем (АЦП). Современные АЦП позволяют преобразовывать сигналы в цифровые образы с сохранением как амплитуд-

ных, так и фазовых соотношений в полосе до нескольких гигагерц.

Существующая элементная база позволяет в принципе реализовать такие системы при соответствующих финансовых затратах. Однако в перспективе реализация таких систем может быть существенно эффективней как с аппаратной, так и с экономической точки зрения при разработке специализированной элементной базы.

Основной интегральный элемент обработки может иметь структуру, представленную на рис. 2.

Структура содержит быстродействующий АЦП, программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), сигнальный процессор (СП), универсальный риск-процессор (УРП), память программ и интерфейсный блок. Выполненный в одном корпусе (кристалле) такой элемент обработки существенно повысил бы эффективность системы в целом при значительном снижении стоимости.

Аналогичные представленной на рис. 2 структуры элементов могли бы содержать схемы быстрого преобразования Фурье, цифровые полосовые и гребенчатые фильтры и т.д. Объединенные в регулярные вычислительные структуры подобные элементы обработки значительно повышают общую производительность подсистемы первичной обработки сигналов и могут служить базой для создания унифицированных модулей первичной обработки.

Модульный принцип построения МРЭК, как было отмечено выше, предполагает в том числе конструктивную унификацию. Если конструктивная унификация антенных систем имеет ограниченные возможности реализации ввиду многообразия типоразмеров антенн, то унификация конструкций модулей приема и передачи сигналов, а также модулей обработки представляет собой не столь сложную задачу. В настоящее время устройства приема

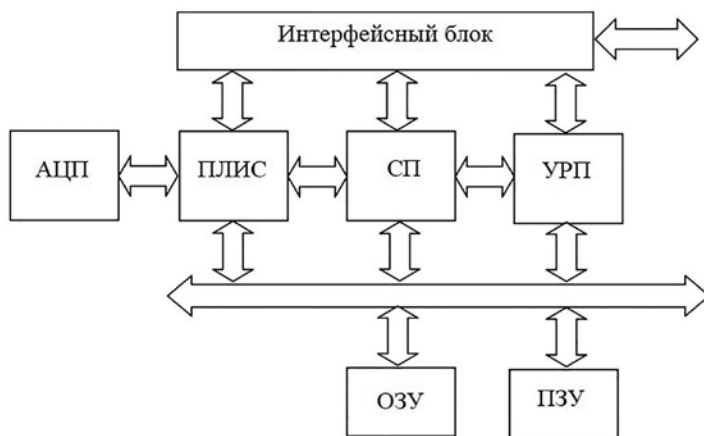


Рис. 2. Структура интегрального элемента обработки

и передачи, а также обработки и отображения информации, как правило, располагаются в отсеках НК или ПЛ и конструктивно выполнены на базе стандартных приборных шкафов (СПШ).

Для комплектования МРЭК различного базирования с разным модульным наполнением может быть предложена специализированная конструкция приборного шкафа, представляющая собой односекционный сборный 7-этажный каркас, повторяющий габаритные и присоединительные размеры каркаса СПШ. Данная конструкция позволяет применить рамы-проставки, что увеличивает полезный объем шкафа. Конструктив шкафа разработан таким образом, что изготовление шкафа возможно любой высоты, кратной высоте полок шкафа. Принципиальное отличие предлагаемой конструкции шкафа от СПШ заключается в технологии изготовления, которая исключает литье и сварку, что обеспечивает простоту сборки и удешевляет производство.

Еще одна составляющая часть МРЭК, которую следует рассмотреть в рамках данной темы, но которая формально не подпадает под определение модуля, это различные виды линий связи, прежде всего кабельные линии между антенным прибором и рубочной (отсечной) аппаратурой, передающие радиосигнал от антенных систем в аппаратуру приема и генерирования сигналов и аппаратуру обработки и отображения. Поскольку антенные приборы, как правило, расположены на верхней палубе или на надстройках НК (или на выдвижных устройствах ПЛ) на расстоянии до нескольких десятков метров от рубочных приборов, то величина потерь мощности радиосигнала может быть значительной – до десятков децибел, что негативно сказывается на характеристиках МРЭК в целом. Потери могут быть компенсированы включением в линию дополнительных трактовых малошумящих усилителей, но более

радикальный способ компенсации потерь при большой длине трактов – это использование волоконнооптических линий связи (ВОЛС).

Здесь уместно сделать несколько замечаний относительно передачи сигналов по оптоволокну. Передача электрических сигналов с помощью ВОЛС требует двойного преобразования: сначала электрического сигнала в оптический, а затем обратно – из оптического в электрический, что сопряжено со значительными потерями на преобразование. Поэтому целесообразность использования ВОЛС определяется суммарным выигрышем в потерях в сравнении традиционной линией и линией с ВОЛС. Линии передачи на базе ВОЛС достаточно давно и успешно используются при передаче цифровых сигналов. При этом надо иметь в виду, что параметры сигналов, с которыми приходится иметь дело в радиолокации, радикально отличаются от параметров цифровых сигналов. Это прежде всего частотный диапазон (до 40 ГГц), динамический диапазон (до 120 дБ и выше) и шумовые характеристики [3]. Предварительные исследования, выполненные в рамках инициативной НИР, показывают, что радиосигнал может быть успешно передан с помощью ВОЛС на несколько сот метров с динамическим диапазоном до 120 дБ и с приемлемым уровнем шума в частотном диапазоне, по крайней мере до 12 ГГц с возможным расширением до 18 ГГц. Исходя из этих результатов можно предложить в качестве унифицированного элемента МРЭК многоканальную линию передачи СВЧ-сигнала на базе ВОЛС, применяемую для передачи сигнала от антенных приборов в отсечную аппаратуру. Такая линия представляет собой несколько (по числу частотных поддиапазонов, например, системы РТР) независимых ВОЛС, конструктивно объединенных в единой защитной оболочке и снабженных соответствующи-

ми многоканальными оптическими соединителями. Использование такой унифицированной многоканальной линии целесообразно прежде всего для замены протяженных (десятки и сотни метров) отсечных и палубных трактов на НК, для которых в настоящее время используются металлические волноводы и коаксиальные кабели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формулирование ключевых принципов построения МРЭК различного базирования на базе опыта создания многочисленных образцов радиоэлектронного вооружения для ВМФ позволяет предложить перспективную концепцию разработки таких комплексов на базе унифицированных функциональных модулей.

Интенсивное развитие цифровых технологий, широкое применение цифрового управления функциональными модулями и внедрение цифровых методов обработки информации позволяет в настоящее время создать унифицированные системы для радиоэлектронного вооружения.

Модульный принцип построения МРЭК экономически целесообразен как для производителей модулей, так и для разработчиков комплексов. Производители модулей за счет увеличения серийности снижают удельные затраты на разработку и изготовление таких модулей. Разработчики комплексов уменьшают свои затраты на проектирование и отработку и значительно сокращают сроки разработки. Упрощается разработка программно-математического обеспечения управления и обработки информации. Основные затраты приходятся на отладку ПМО управления и обработки информации.

Актуальность и целесообразность предлагаемого подхода подтверждена специалистами предприятий судостроения и главного командования ВМФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горинов М. С., Иванов В. П., Кружалов В. А., Кружалов К. А. Комплексные сверхширокополосные антенные системы, обеспечивающие функционирование современных многофункциональных радиоэлектронных комплексов и радиолокационных комплексных систем // Морской вестник. – 2016. – Спецвыпуск № 1 (12). – С. 11–14.
2. Высоцкий И. А., Львовский С. А., Кружалов В. А. «Гранит-ГЭ» – радиолокационный комплекс для гражданского применения на основе военных технологий // Точно в цель, 2022. № 3 (31). С. 36–69.
3. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника. – В 4-х т. – Т. 1, гл. 1. – М.: Советское радио. – 1977. ■

Работа линий морской подвижной радиосвязи строго регламентирована приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 9.12.2022 г. №486 «Об утверждении Правил радиосвязи морской подвижной службы и морской подвижной спутниковой службы».

Как правило, линии радиосвязи (ЛРС) морской подвижной службы (МПС) организуются для решения следующих задач [1–3]:

- оперативное управление деятельностью судов и организаций, связанных с эксплуатацией судов;
- передача информации о безопасности мореплавания, гидрометеорологической и навигационной информации, информации о поиске и спасении людей на море;
- управление движением судов;
- обеспечение безопасности мореплавания и охраны человеческой жизни;
- передача данных для корректуры электронных навигационных карт;
- передача данных для автоматизированных систем управления деятельностью судов и организаций, связанных с эксплуатацией судов;
- обмен информацией.

Вместе с тем высокая загруженность частотного диапазона, особенно диапазона коротких и промежуточных волн (КВ и ПВ), нередко приводит к возникновению радиоэлектронных конфликтов (РЭК) [4–6]. Другим аспектом РЭК является преднамеренная постановка помех при организации радиоподавления (РП).

Таким образом, РЭК на море можно характеризовать как противоборство двух антагонистических подсистем [7, 8]. С одной стороны, это – подсистема организации ЛРС МПС (далее – подсистема организации радиосвязи, или ПОРС), а с другой – подсистема деструктивных воздействий, в качестве которой в равной степени могут выступать как автоматизированная станция помех (АСП), так и радиостанция стороннего источника радиоизлучения (далее – подсистема деструктивных воздействий, или ПДВ).

Для оценки возможных последствий РЭК для ЛРС МПС необходимо формализовать конфликтную ситуацию и оценить вероятность перехода ПОРС в допустимые квазустойчивые состояния, а также выявить факторы, оказывающие доминирующее влияние на достижение требуемого уровня информационного урона, наносимого со стороны ПДВ, для определения направления повышения помехозащищенности ЛРС МПС.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ РЭК

С целью формализации РЭК будем полагать, что каждая из подсистем ПОРС и ПДВ имеет свой потенциал [9]:

ЧАСТНАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КОНФЛИКТА НА ЛИНИЯХ МОРСКОЙ РАДИОСВЯЗИ

В.А. Долгих, ген. директор АО «НТИ «Радиосвязь»,

Д.В. Васильева, ст. преподаватель ГУАП,

С.В. Дворников, д-р техн. наук, проф., ГУАП и ВАС им. С.М. Будённого, контакт. тел. (812) 247 9400

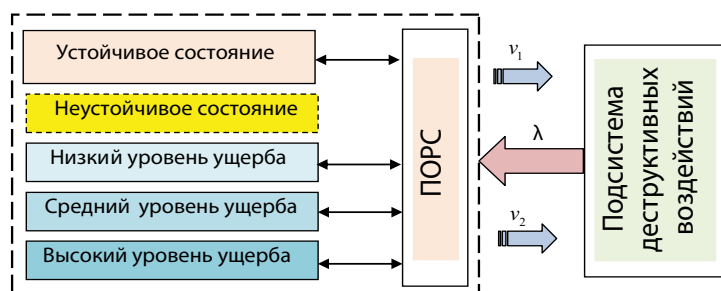


Рис. 1. Структура частной модели РЭК

λ – интенсивность воздействия ПДВ; v_1 – интенсивность выявления стратегии воздействия ПДВ; v_2 – интенсивность нейтрализации последствий деструктивных воздействий

- $\Phi_{\text{ПОРС}}$ – потенциал ПОРС, который включает технические возможности передающих и приемных радиосистем, помехозащищенные режимы работы, включая пространственную селекцию сигналов;
- $\Phi_{\text{ПДВ}}$ – потенциал ПДВ, определяемый возможностями ее подсистем радиомониторинга и подсистемы радиоподавления (РП); при преднамеренной постановке помех – боевыми характеристиками АСП, при непреднамеренной постановке – ТТХ передатчика стороннего источника радиоизлучений.

С учетом рассмотренного определим результат деструктивного воздействия, приводящего к нарушению связи [10], который можно характеризовать с учетом требований ГОСТ Р 53111–2008 «Методика оценки соответствия сети электросвязи заданным требованиям обеспечения устойчивости ее функционирования», где уровень последствий внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ) определен в следующих градациях ущерба: высокий, средний, низкий.

В таблице представлены вероятностные показатели, характеризующие сохранение работоспособности элементов

Таблица

Вероятность сохранения работоспособности элементов ПОРС от ущерба, причиняемого им воздействием ВДФ

Ущерб, в соответствии с градациями ВДФ	Вероятность сохранения работоспособности ПОРС
До 50	0,5
До 30	0,7
До 10	0,9

ПОРС в зависимости от градаций влияния ВДФ [11].

С рассмотренных позиций РЭК представляет противоборство стратегий между ПОРС и РДВ, что позволяет структурную схему конфликтной ситуации представить в виде схемы (рис. 1).

Таким образом, регулируя интенсивность воздействия, определяемого λ , ПДВ стремится перевести ПОРС в неустойчивое состояние [12]. В свою очередь ПОРС за счет мощности противодействия, определяемого арсеналом режимов помехозащиты, и регулируемых определяемых интенсивностей v_1 и v_2 (далее обозначим как v), стремится сохранить устойчивость функционирования ЛРС МПС.

СТРАТЕГИЯ ПОВЕДЕНИЯ ПОРС В УСЛОВИЯХ РЭК: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для постановки задачи на разработку стратегии поведения ПОРС в условиях РЭК необходимо определить показатель, в качестве которого выбрать текущее значение превышения мощности энергии помехи к мощности энергии сигнала в точке приема K_{Π}^T .

Тогда критерием целесообразно определить условие, при котором K_{Π}^T соответствует значению коэффициента подавления для используемого вида модуляции и режима работы ЛРС МПС [13, 14]:

$$K_{\Pi}^T \rightarrow \begin{cases} \text{если } K_{\Pi}^T > K_{\Pi} \text{ ПОРС неустойчива,} \\ \text{если } K_{\Pi}^T < K_{\Pi} \text{ ПОРС устойчива.} \end{cases} \quad (1)$$

Для стационарных условий решение задачи, характеризуемой выражением (1), не вызывает затруднений, поскольку величина K_{Π}^T может быть рассчитана с учетом коэффициентов усиления антен-

ных систем ПОРС и ПДВ $G_C, G_{П}$, а также мощности передатчиков ПОРС и АСП $P_C, P_{П}$. Вариативным параметром будут выступать дистанции связи и РП: D_C и $D_{П}$.

В соответствии с [15], в упрощенном варианте, предусматривающем использование ненаправленных антенных систем, текущее значение показателя $K_{П}^T$ может быть рассчитано по формуле

$$K_{П}^T = \frac{P_{П} G_{П} D_C^2}{P_C G_C D_{П}^2}. \quad (2)$$

Учитывая, что объекты МПС являются мобильными, величина $K_{П}^T$ становится высоко динамическим показателем, который целесообразно определить через энергетические потенциалы ПОРС и ПДВ:

$$\mathcal{E}_{П} = P_{П} G_{П} / D_{П}^2 \text{ и } \mathcal{E}_C = P_C G_C / D_C^2.$$

С таких позиций показатель $K_{П}^T$ можно рассматривать как некоторый функционал $K_{П}^T(\mathcal{E}_C, \mathcal{E}_{П})$ [16]. Тогда общую постановку задачи стратегии поведения ПОРС в условиях РЭК можно записать следующим образом:

$$K_{П}^T(\mathcal{E}_C, \mathcal{E}_{П}) \rightarrow \max_{I_C, I_{П} = \text{const}}, \quad (3)$$

где $I_C = P_C G_C$ и $I_{П} = P_{П} G_{П}$ – эквивалентная изотропная излучаемая мощность, соответственно передатчика ПОРС и АСП.

Анализ условия (3) позволяет сделать вывод, что его обеспечение возможно только при системном рассмотрении функционирования предложенной модели, изображенной на рис. 1. Для этого предлагается использовать аналитический аппарат Марковских цепей и процессов [19, 20].

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ ПОВЕДЕНИЯ ПОРС В УСЛОВИЯХ РЭК

Для анализа условий выбора необходимой стратегии поведения ПОРС в ходе РЭК воспользуемся аналитическим аппаратом однородной цепи Маркова в предположении, что возможны лишь два устойчивых состояния, в которых может находиться ПОРС [5]:

- ЛРС ПМС находится в устойчивом состоянии и функционирует с требуемым качеством;
- ЛРС ПМС находится в неустойчивом состоянии, определяемом одной из градаций информационного ущерба – см. таблицу.

Обозначим, что вероятность пребывания ЛРС ПМС в первом состоянии определяется начальной вероятностью $p_{\Phi}(0) = p_1^0$; а вероятность ее пребывания во втором начальном состоянии соответственно $p_{\Pi}(0) = p_2^0$. Причем $p_1^0 + p_2^0 = 1$. (4)

Далее будем полагать, что вероятности перехода определяются следующим образом [17]:

$$p_{11} = 1 - \alpha; p_{12} = \alpha; p_{21} = \beta; p_{22} = 1 - \beta. \quad (5)$$

При этом исключим из рассмотрения такие варианты событий, при которых или не происходит изменения состояний:

$$\alpha + \beta = 0 \text{ (т.е. } \alpha = \beta = 0), \quad (6)$$

или же смена состояний происходит детерминированно:

$$\alpha + \beta = 2 \text{ (т.е. } \alpha = \beta = 1). \quad (7)$$

События, определяемые (6) и (7), исключают случайный характер изменения состояния $K_{П}^T$, обусловленный вариативностью энергетических потенциалов $\mathcal{E}_C$ и $\mathcal{E}_{П}$.

Для определения вероятности перехода $p_{jk}(n)$ за n шагов рассмотрим системы из K линейных алгебраических уравнений, характеризующих финальные вероятности [12, 18]:

$$p_k = \sum_{j=1}^K p_j^0 p_{jk}, \quad (8)$$

где $k = 1, \dots, K$,

$$\sum_{k=1}^K p_k = 1 \text{ при условии, что } p_k \geq 0. \quad (9)$$

Поскольку все K уравнений, определяемых условием (8), линейно зависимые, то для вычисления результирующих значений вероятностей p_k необходимо использовать $(K-1)$ уравнение (8). Данное утверждение доказано в [19]. Учитывая, что предлагаемая модель определяется двумя состояниями, т.е. $K = 2$, имеем систему, состоящую из двух уравнений: одного уравнения согласно (8) и одного уравнения, определяемого условием (9):

$$\begin{cases} p_1 = p_1(1 - \alpha) + p_2\beta; \\ 1 = p_1 + p_2. \end{cases} \quad (10)$$

Далее из системы (10) находим значения результирующих вероятностей

$$\begin{cases} p_1 = \frac{\beta}{\alpha + \beta}; \\ p_2 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}. \end{cases} \quad (11)$$

Учитывая, что для простой однородной цепи Маркова матрица вероятностей перехода за n шагов равна n -й степени матрицы одношаговых вероятностей [20], выражение вероятностей перехода будет иметь вид

$$p^n = \begin{bmatrix} \frac{\beta}{\alpha + \beta} + \frac{\alpha}{\alpha + \beta}(1 - \alpha - \beta)^n & \frac{\alpha}{\alpha + \beta}[1 - (1 - \alpha - \beta)^n] \\ \frac{\beta}{\alpha + \beta}[1 - (1 - \alpha - \beta)^n] & \frac{\alpha}{\alpha + \beta} + \frac{\beta}{\alpha + \beta}(1 - \alpha - \beta)^n \end{bmatrix}. \quad (12)$$

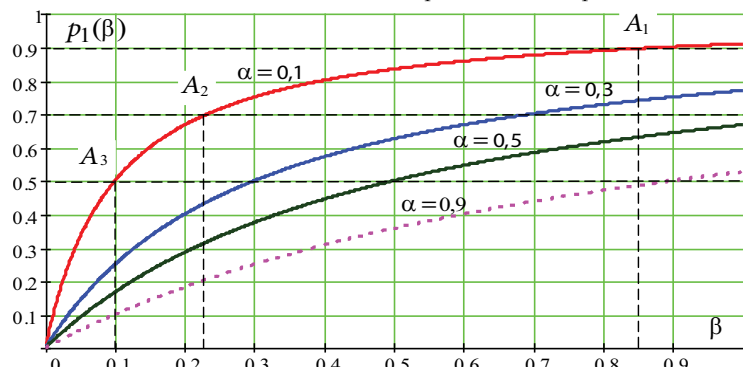


Рис. 2. Вероятностная оценка сохранения устойчивости ЛРС МПС в различных условиях протекания РЭК

Поскольку значения α и β удовлетворяют требованиям

$$|1 - \alpha - \beta| < 1 \text{ при } \alpha + \beta \neq 0 \text{ и } \alpha + \beta \neq 2, \quad (13)$$

то

$$(1 - \alpha - \beta)^n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0. \quad (14)$$

Следовательно, матрицу (12) можно с учетом выполнения требований (13) и (14) переписать в виде

$$p^n = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_1 & p_2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Согласно [21] для простой однородной цепи Маркова матрица вероятностей характеризуется уравнением

$$s^T(n) = s^T(0)p^n, \quad (16)$$

где T – знак транспонирования; $s^T(0) = [p_1^0, p_2^0, \dots, p_N^0]$ – матрица-строка начальных вероятностей; $s^T(n)$ – матрица-строка безусловных вероятностей различных значений процесса на n -м шаге.

Тогда безусловные вероятности состояний, получаемые через n шагов, будут определяться как

$$\begin{aligned} s^T(n) &= [p_1^0, p_2^0] p^n = \\ &= \frac{1}{\alpha + \beta} [\beta + (\alpha p_1^0 - \beta p_2^0)(1 - \alpha - \beta)^n + \\ &\quad + \alpha(\beta p_2^0 - \alpha p_1^0)(1 - \alpha - \beta)^n]. \end{aligned} \quad (17)$$

Из (17) следует, что при $n \rightarrow \infty$ формула вырождается к виду, определяемому выражением (11), что подтверждает правомерность теоретических заключений, позволяющих выражение

$$p_1 = \beta / (\alpha + \beta) \quad (18)$$

рассматривать как условие, при котором обеспечивается устойчивость функционирования ЛРС МПС, определяемой ПОРС.

В свою очередь второе выражение в (11)

$$p_2 = \alpha / (\alpha + \beta) \quad (19)$$

характеризует эффективность функционирования ПДВ в ходе РЭК [12].

На рис. 2 демонстрируются графики зависимости вероятностной оценки, характеризующей эффективность функционирования ПОРС, обеспечивающей устойчивую работу ЛРС МПС в различных условиях РЭК.

Зависимость $p_1(\beta)$ на рис. 2 представлена как функция вероятности устойчивости функционирования ЛРС МПС от вероятности сохранения этого состоя-

ния, определяемого параметром β .

В качестве исходных значений приняты вероятности перехода в неустойчивое состояние, характеризующее нанесенным ущербом – значениями $\alpha = 0,2$, $\alpha = 0,7$ и $\alpha = 0,9$, согласно табл. 1, а также дополнительно показан график, соответствующий $\alpha = 0,1$.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью анализа полученных результатов будем полагать, что требования к устойчивости функционирования ЛРС МПС определяют, исходя из данных табл. 1 (на рис. 2 отмечены вертикальными пунктирными линиями, соответствующими значениям $\beta = p_1$).

С учетом введенных допущений можно сделать следующие заключения:

1. Для значений $\alpha = 0,1$ переход ЛРС МПС в состояние $p_1 = 0,9$ обеспечивается при $\beta = 0,86$ (точка A_1), состояние $p_1 = 0,7$ – при $\beta = 0,23$ (точка A_2), состояние $p_1 = 0,5$ – при $\beta = 0,1$ (точка A_3).

2. Для значений $\alpha = 0,3$ переход ЛРС МПС в состояние $p_1 = 0,9$ вообще не обеспечивается ни при каких значениях β . Переход в состояние $p_1 = 0,7$ возможен при $\beta = 0,7$, а состояние $p_1 = 0,5$ – при $\beta = 0,3$.

3. Для значений $\alpha = 0,5$ переход ЛРС МПС в состояние $p_1 = 0,9$ и $p_1 = 0,7$ не обеспечивается, переход в состояние $p_1 = 0,5$ возможен при $\beta = 0,5$.

4. Для значений $\alpha = 0,1$ переход ЛРС МПС в состояние $p_1 = 0,9$ и $p_1 = 0,7$ не обеспечивается, а переход в состояние $p_1 = 0,5$ возможен не менее чем при $\beta = 0,9$.

Решение системы уравнений (10) проведено для независимых параметров α и β , которые применительно к частной модели РЭК можно интерпретировать как $\beta \rightarrow \nu$, а $\alpha \rightarrow \lambda$.

Следует отметить, что полученные результаты соответствуют условиям сопоставимости энергетических потенциалов ПОРС и ПДВ. Таким образом, полученные выводы и заключения правомерны при размещении ПОРС и ПДВ на кораблях одного класса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют заключить, что обеспечение устойчивости ЛРС МПС возможно только за счет изменения соотношений между значениями λ и ν непосредственно за счет повышения эффективности функционирования ПОРС.

Поскольку на судах и кораблях сложно обеспечить повышение энергетического потенциала ЛРС за счет только увеличения мощности излучения, то, следовательно, необходимо совершенствовать способы повышения помехоустойчивости приема и разрабатывать новые модели сигнальных конструкций, изначально обладающих высокой помехозащищен-

ностью, или же повышать разведзащищенность ЛРС ПМС [22, 23], например, за счет перехода на шумоподобные виды передач [24, 25].

ЛИТЕРАТУРА

1. Рушко М. В. Разработка программного комплекса по оценке качества цифрового канала связи морской подвижной спутниковой службы // Вестник Балтийского федерального ун-та им. И. Канта. – Серия: Физико-матем. и техн. науки. – 2019. – № 2. – С. 47–55. – EDN SQRSFU.
2. Базаров Ю.И., Исмаилов М.И., Рогов А.Н. Новая морская цифровая связь для e-Навигации // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 3(76). – С. 48–54. – EDN XRLKNN.
3. Колодкин А.Л., Лукьянова А.В. Международная организация подвижной спутниковой связи (ИМСО) // Международное право и международные организации. – 2010. – № 2. – С. 18–23. – EDN PWBVWD.
4. Дворников С.В., Марков Е.В., Манюши Э.А. Повышение помехозащищенности передач декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – Т. 15. – № 6. – С. 4–9. – DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9. – EDN KHPWMU.
5. Макаренко С.И., Михайлов Р.Л. Информационные конфликты – анализ работ и методологии исследования // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 3. – С. 95–178. – DOI: 10.24411/2410-9916-2016-10304
6. Долгих В.А., Николаев В.И., Свердел В.Ф. Результаты теоретико-игрового анализа радиоэлектронного конфликта // Теория и техника радиосвязи. – 2019. – № 1. – С. 13–17. – EDN ZRHNAV.
7. Дворников С.В., Дворников С.С., Желов К.Д. Помехоустойчивость сигналов однополосной модуляции с управляемым уровнем несущего колебания // Информатика и автоматизация. – 2023. – Т. 22. – № 2. – С. 261–288. – DOI 10.15622/ia.22.2.2. – EDN KBTKQA.
8. Кучмин Н.А. Устойчивость радиосистем связи с помощью ППРЧ, модель радиоэлектронного конфликта с применением теории игр // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – № 2-2(101). – С. 84–87. – DOI 10.24412/2500-1000-2025-2-2-84-87. – EDN ZEOTJE.
9. Дворников С.В., Пшеничников А.В. Помехозащитная модель радиолинии в условиях динамического преднамеренного воздействия // Изв. вузов России. – Радиотехника. – 2017. – № 2. – С. 16–22. – EDN YREKPT.
10. Вакуленко А.А., Шевчук В.И. Математическая модель динамики конфликта радиоэлектронных систем // Радиотехника. – 2011. – № 1. – С. 56–59. – EDN NTMCFX.
11. Терентьева Ю.Ю., Стариков П.П., Синев С.Г. ГОСТ Р 53111-2008 (Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки): аргументы за и против // Электросвязь. – 2022. – № 6. – С. 65–70. – DOI 10.34832/ELSV2022.31.6.009. – EDN NIPAH.
12. Владимиров В.И., Лихачев В.П., Шляхин В.М. Антагонистический конфликт радиоэлектронных систем: методы и мат. модели / Под ред. В. М. Шляхина. – М.:

Радиотехника, 2004. – EDN QMNELN.

13. Маевский Ю.И. Теоретико-игровой подход к поиску оптимальных стратегий сторон в радиоэлектронном конфликте // Радиотехника. – 2009. – № 6. – С. 37–40. – EDN KZUSUB.
14. Дворников С.С., Дворников В.С., Бибарсов М.Р., Москалец Г.Н. Анализ помехоустойчивости передач морской радиосвязи ПВ/КВ диапазона // Морской вестник. – 2024. – № 1(89). – С. 93–97. – EDN NGTIZX.
15. Радзиевский В.Г. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии. – М.: Радиотехника, 2006. – 424 с.
16. Дворников С.В., Якушенко С.А. Управление параметрами устойчивости инфокоммуникационной системы в условиях деструктивных воздействий // Радиотехника. – 2023. – Т. 87. – № 6. – С. 23–31. – DOI 10.18127/j00338486-202306-03. – EDN EXKZON.
17. Защита от структурных помех радиоканалов с частотной манипуляцией // Дворников С.В., Дворников С.С., Иванов Р.В. [и др.] // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23. – № 3. – С. 193–198. – EDN YHCWCR.
18. Детков А.Н. Оптимальное оценивание дискретно-непрерывных марковских процессов по наблюдаемым цифровым сигналам / Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66. – № 8. – С. 748–759. – DOI 10.31857/S0033849421080027. – EDN YZWYNN.
19. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – 2-е изд., стереотип. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
20. Моделирование процесса взаимодействия в информационно-вычислительной сети как системе с марковскими процессами / Малафеев О. А., Зайцев И. В., Шлаев Д. В. [и др.] // Изв. вузов. – Сер.: Приборостроение. – 2021. – Т. 64. – № 6. – С. 444–451. – DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-6-444-451. – EDN OTLDKQ.
21. Березин М.В. Алгоритм и компьютерная программа вычисления предельных вероятностей простой однородной цепи Маркова // Вестник молодых ученых СПбГУ технологии и дизайна. – 2023. – № 2. – С. 89–93. – EDN ZOTHVE.
22. Дворников С.В., Дворников С.С., Пшеничников А.В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Информационно-управляющие системы. – 2019. – № 4(101). – С. 62–68. – DOI 10.31799/1684-8853-2019-4-62-68. – EDN VUYUFO.
23. Вольхин С.Д. Анализ обеспечения живучести системы связи и ее элементов в современном вооруженном конфликте // Стратегическая стабильность. – 2024. – № 3(108). – С. 67–69. – EDN WBWMHV.
24. Дворников С. В., Манаенко С.С., Дворников С.С. Параметрическая мимикрия сигналов, модулированных колебаниями и сформированных в различных функциональных базисах // Информационные технологии. – 2015. – Т. 21. – № 4. – С. 259–263. – EDN TQMSBX.
25. Дворников С.В., Дворников С.С., Желов 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. ■

Автомное судовождение, плавание судов в акваториях со стесненными условиями (прибрежная зона, подходы к портам, узкости, мелководье) является наиболее сложным в навигационном отношении. Здесь тактическая и навигационная обстановка постоянно изменяется из-за наличия малых глубин, течений, изменения гидрометеорологических условий, сложной конфигурации фарватера, возможного появления малых судов (быстроходные катера и скутеры, яхты, рыбаки), следующих отличающимися от рекомендованных курсами, и т.д.

По мере возникновения опасных тактических или навигационных ситуаций системой управления автономного судна или судоводителем решается задача расхождения (уклонения) с опасными целями за счет изменения вектора скорости своего судна.

Существуют и применяются различные приемы, подходы и методики поддержки управления судном, маневрирующим в сложных навигационных условиях [1–14]. Это методы и системы искусственного интеллекта, семантические сети, траекторные подходы, оценки и прогнозирования навигационной ситуации, зональная навигация, ситуационное управление, анализ иерархий, ключевых индикаторов и др. Недостатком этих систем поддержки безопасности судоходства является затрачиваемое время для расчетов и выработки рекомендаций по расхождению с опасными целями.

Значительно меньшее время требуется при использовании аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС), так как они опираются на априорные обучающие выборки [15]. ИНС здесь применяются во вторичной обработке поступающих с радара (а также от гидролокатора, АИС, беспилотных летательных аппаратов, береговой системы наблюдения) сигналов (рис. 1) для обучения по специальной выборке, состоящей из формальных математических представлений возможных рекомендуемых (безопасных) вариантов маневрирования судна.

Поясним суть метода на следующем примере простейшей ситуации управления судном. Предположим, что транспортное средство движется в определенной акватории с помощью управляющего элемента, который имеет определенный радиус «зрения» (наблюдения). Для упрощения используем круг обзора, но можно рассматривать и реальный усеченный шестью пересекающимися плоскостями конус. Стоит отметить, что управляющий элемент в нашей ситуации – функция, которой на вход подаются внешние факторы из радиуса обзора, а на выход – реакция судна на эти факторы. В связи с тем, что таких

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ НАВИГАЦИИ В БЛИЖНЕЙ МОРСКОЙ ЗОНЕ

С.И. Биденко, д-р техн. наук, проф., гл. эксперт АО НПО «Импульс»,
А.В. Дегтярёв, капитан дальнего плавания,
 капитан танкера/газовоза «Limra»,
А.В. Сорокин, зам. ген. директора – гл. конструктор,
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



Рис 1. Источники информации о тактической и навигационной обстановке

факторов может быть несколько, то есть несколько входов и выходов, будем использовать нейронную сеть обратного распространения, так как она позволяет аппроксимировать такие функции. По сути, такая сеть представляет собой многослойный перцептрон, в котором метод обратного распространения ошибки обучает все слои за один проход [15].

Пример используемой архитектуры сети приведен на рис. 2.

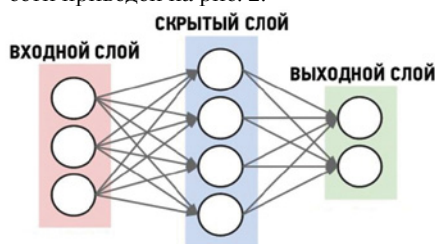


Рис. 2. Общая схема архитектуры используемой нейросети

Преимущество данной сети – ее обучаемость, что упрощает задачу расстановки весов для нейронов. Для решения поставленной задачи будем рассматривать нейронную сеть, состоящую из шести слоев. Экспериментальным путем установлено, что достаточная точность достигается при минимуме в четыре слоя, однако при шести слоях точность вычислений выше, при этом дальнейшее

увеличение числа слоев не дает ощутимого прироста точности, одновременно значительно увеличивая время работы программы и нагрузку на машинные мощности. Во входном слое для упрощения модели разместим три нейрона, в выходном – два. В промежуточных слоях расположим по девять нейронов (дальнейшее увеличение их числа не имеет смысла, так как не дает прироста в точности, но замедляет систему).

В качестве функции активации нейрона будем использовать сигмовидную функцию

$$S(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}. \quad [16]$$

Данная функция, как известно, позволяет усиливать слабые сигналы, что делает ее предпочтительной для решения конкретной задачи. Кроме того, она позволяет существенно сократить вычислительную сложность метода обратного распространения ошибки.

Для того чтобы вычислить положение, необходима позиция (x, y) каждого объекта, положение (x, y) судна и угол транспортного средства (рис. 3). Также необходимы r (радиус окружности) и d_{right} , d_{left} – векторы между судном и линиями L_{right} и L_{left} параллельными направлению движения судна. Оба вектора перпендикулярны линиям. Для простоты представ-

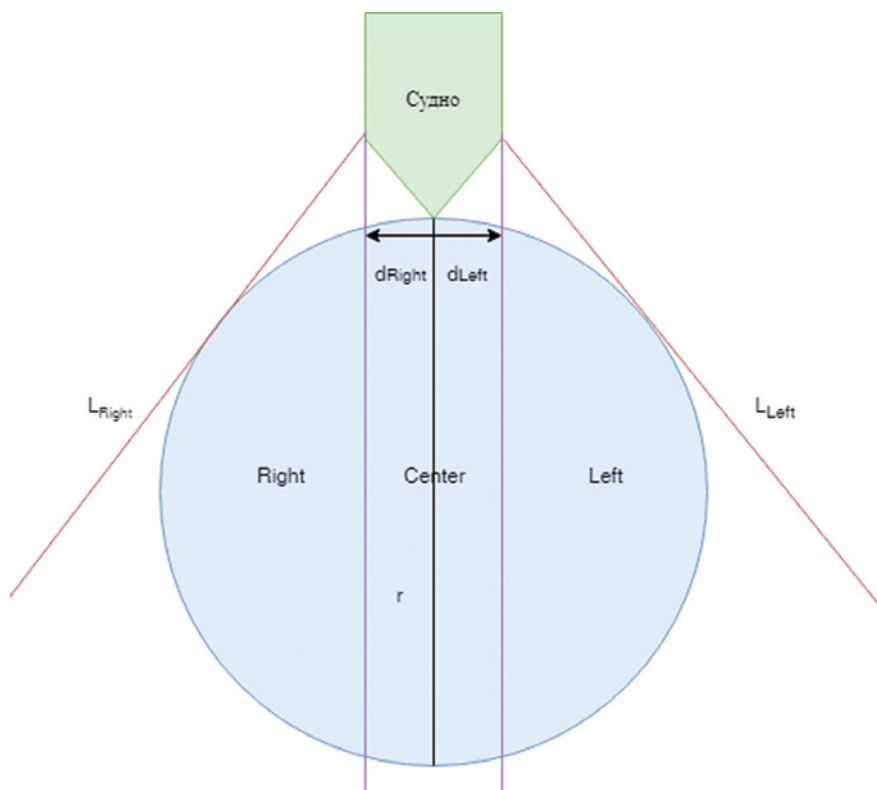


Рис. 3. Схема тактической обстановки в ближней зоне

вим, что наша модель двумерная, так как корабль не может двигаться в третьем измерении, поскольку он не взлетает и не ныряет. Таким образом, заметим, что в данной модели не учитываются рифы и подводные объекты. Для учета данных объектов необходимо усложнение модели и введение третьего измерения.

Для каждого объекта в радиусе обзора определяем, находится ли он в левом поле зрения, правом или по центру. На вход в нейронную сеть подается массив A . Расстояния до ближайшего препятствия слева, в центре и справа от транспортного средства будут храниться в $A[0]$, $A[1]$ и $A[2]$ соответственно.

Вычисляем уравнения линий L_{right} и L_{left} , которые помогут нам определить, находится ли препятствие справа, слева или по центру от судна:

$$a_R \cdot x + b_R \cdot y + c_R = 0, \quad (1)$$

где $a_R = d_x^{Right}$; $b_R = d_y^{Right}$.

Тогда определяем координаты точки на линии

$$x_1 = V_x + d_x^{Right}; \quad x_2 = V_y + d_y^{Right}, \quad (2)$$

где V_x и V_y – положение судна.

Теперь вычисляем

$$c_R = -x_1 \cdot a_R - y_1 \cdot b_R. \quad (3)$$

Аналогично выводим уравнение линии L_{left} с помощью вектора d_{left} . Далее необходимо вычислить центр окружности. Все, что внутри круга, будет видно управляющему элементу. Центр окружности $C(x, y)$ на расстоянии r от положения судна $V(x, y)$:

$$C_x = V_x + r \cdot \sin(\alpha); \quad C_y = V_y + r \cdot \cos(\alpha), \quad (4)$$

где V_x , V_y – положение судна; C_x , C_y – центр круга.

Затем проверяем, находится ли объект в пределах круга. Если

$$\sqrt{(O_x - C_x) \cdot (O_y - C_y)} \leq r, \quad \text{то объект находится в круге, где } O_x, O_y - \text{координаты препятствия.}$$

Для каждого объекта в пределах круга следует проверить, находится ли он справа, слева или по центру от судна. Если $a_R \cdot x + b_R \cdot y + c_R > 0$, то объект находится в правой части круга, если $a_L \cdot x + b_L \cdot y + c_L > 0$, то в левой части, иначе – по центру. Вычислим расстояние от объекта до судна

$$DIST = \sqrt{(O_x - C_x) \cdot (O_y - C_y)}.$$

Теперь сохраняем расстояние в соответствующей части массива ($A[0]$, $A[1]$ или $A[2]$) при условии, что ранее сохраненное расстояние больше, чем только что вычисленное. Изначально, массив A должен быть инициализирован значениями $2r$. После проверки каждого объекта, у нас есть массив A с расстояниями до ближайших объектов справа, по центру и слева от судна. Если не было найдено ни одного объекта в данном поле зрения, элемент массива будет иметь значение по умолчанию 0, что означает отсутствие объектов в радиусе обзора.

Поскольку нейронная сеть использует сигмовидную функцию, входные данные должны лежать в пределах от 0,0 до 1,0 [17]. При этом 0,0 будет означать, что объект касается транспортного средства, и 1,0 – что нет объектов в пределах видимости. Поскольку мы установили максимальное расстояние, на котором может видеть управляющий элемент,

легко можем привести все расстояния к диапазону от 0,0 до 1,0:

$$A[i] = A[i] / (2r). \quad (5)$$

На выходе получаем указания по изменению скорости судна и направления. Это могут быть ускорение, торможение и угол поворота рулевого колеса. Так что нам нужно два выхода: один будет значением ускорения/торможения (торможение – отрицательное ускорение), а другой будет указывать изменение направления.

Результат находим между 0,0 и 1,0 по той же причине, что и входные данные. Для ускорения 0,0 означает «стоп машина»; 1,0 – «полный вперед» и 0,5 – отсутствие торможения или ускорения. Для рулевого управления 0,0 означает «лево руля», 1,0 – «право руля» и 0,5 – не изменять направление. Кроме того, необходимо перевести результаты в значения, которые могут быть использованы:

$$\begin{aligned} Acc &= (Out[0] - 0,5) \times 2 \times MAcc; \\ Str &= (Out[0] - 0,5) \times 2 \times MStr. \end{aligned} \quad (6)$$

«Отрицательное ускорение» будет означать торможение, если транспортное средство движется вперед, либо движение в обратном направлении, если судно находится в состоянии покоя. Кроме того, «положительное ускорение» означает торможение, если транспортное средство движется в обратном направлении.

Стоит также отметить, что данная нейронная сеть нуждается в длительном обучении на большом количестве наборов. Кратко рассмотрим алгоритм обучения сети в данном случае:

1. Прямой проход сети.
2. Вычисление ошибки выходного элемента.
3. Расчет величины корректировки весов связей.
5. Определение ошибки элементов первого скрытого слоя.
6. Корректировка веса связей.
7. Определение величины корректировки оставшихся весов – собственно завершение обратного прохода сети.

Отметим, что в данном случае классические проблемы алгоритма обратного распространения ошибки, связанные с возможностью бесконечного обучения, решаются выбором шага спуска, который вычислялся опытным путем. Также набор обучающих данных был сформирован на основе практических наблюдений за поведением нейронной сети на симуляторе и состоит из 500 обучающих наборов, т. е. из 500 векторов, состоящих из пяти значений: трех, соответствующих входам, и двух, соответствующих выходам.

Кроме того, следует отметить ряд проблем, возникающих при использовании данной модели. Они возникают из-за принятых упрощений в рассматриваемой модели пространства.

Судно может оставаться на месте на время, поскольку оно колеблется в решении вопроса – идти вправо или влево. Исправить это не так легко, пытаясь настроить веса нейронной сети. Решением может выступать добавление принудительного действия в случае остановки более чем на указанное время. К тому же судно не различает небольшой разрыв между двумя рифами. Поскольку в модель изначально не закладывался высокий уровень точности в зрении (только три позиции: слева, в центре, справа), два объекта, находящиеся близко друг к другу, будут для искусственного интеллекта похожи на стену. Для решения данной проблемы необходимо ввести больше различных позиций положения препятствий.

Для ускорения работы данной сети в ситуациях с более сложной областью зрения и большей точностью принятия решения можно использовать графические процессоры, однако данная оптимизация выходит за рамки данной статьи.

Сама по себе рассматриваемая нейронная сеть не имеет четкой цели движения, однако при добавлении конкретной цели и присоединении нейронной сети, анализирующей обстановку в ближней зоне, получается полноценный формальный аппарат, отвечающий за

передвижение судна либо иного морского средства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Артемьев А.В., Гриняк В.М., Комаровский Ю.А. и др.* Актуальные проблемы автономного судовождения. – М.: Моркнига, 2024. – 252 с.
2. *Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л.* Поддержка решений по расхождению с судами. – Одесса: Феникс, 2010. – 229 с.
3. *Васьков А.С., Мироненко А.А.* Навигация и лоция. Автономные методы контроля движения судна : учебник для вузов. – М.: Юрайт, 2025. – 226 с.
4. *Васьков А.С., Мироненко А.А.* Система поддержки принятия решений в судовождении // Сб. науч. тр. – Новороссийск: НГМА. – 2003. – Вып.8. – С. 5–11.
5. *Васьков В.А.* Некоторые принципы системы поддержки принятия решения в судовождении // Сб. науч. тр. – Новороссийск: НГМА, 2013. – Вып.3. – С. 15–21.
6. *Дмитриев В.И., Фарофонов В.И.* Современные навигационные системы и безопасность судовождения. – М.: Моркнига, 2010. – 160 с.
7. *Мальцев А.С., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я.* Маневрирование судов при расхождении: – Одесса: ЦПАП, 2005. – 208 с.
8. *Мелихов А.Н.* Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990.
9. *Родионов А.И.* Автоматизация судовождения. – М.: Транспорт, 1992. – 192 с.
10. *Смоленцев С.В.* Автоматический синтез решений по расхождению судов в море // Вестник ГУМРФ. – 2016. – Вып.2 (36). – С. 7 – 15.
12. *Смоленцев С.В., Афанасьев Б.В., Филяков А.Е., Куниц Д.В.* Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов // Эксплуатация морского транспорта. – 2012. – № 4 (70). – С. 11–14.
13. *Смоленцев С.В.* Проблема оценки навигационной ситуации в море // Вестник ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. – 2015. – № 6 (34). – С. 23–28.
14. *Субанов Э.Э.* Разработка моделей эффективной оценки опасности столкновения судов при принятии решения методом анализа иерархий. – Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.19. – Новороссийск, 2012. – 24 с.
15. *Субанов Э.Э., Миронов А.В.* Использование модифицированной модели метода анализа иерархий для безопасного расхождения морских судов // Эксплуатация морского транспорта. – 2014. – № 1. – С. 24 – 28.
16. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. – 2-е изд./ Пер. с англ. – М.: ИД «Вильямс», 2006.
17. *Joey Rogers.* Object-Oriented Neural Network in C++. – San Diego: Academic Press, CA, 1997.
18. *Hagan M.T., Demuth H.B. and Beale M.H.* Neural Network Design. – Boston: PWS Publishing, MA, 1995. ■

При обработке сигналов первичных когерентно-импульсных радиолокационных станций (РЛС) широко используются алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ) [1].

Известно, что использование алгоритмов БПФ при обработке пакета импульсных радиолокационных сигналов, отраженных от целей, с конечным числом импульсов, обусловленных ограниченным временем наблюдения целей в пределах ширины диаграммы направленности сканирующей антенны РЛС, приводит к искажению результатов измерения параметров спектральных составляющих сигнала [2].

Искажение результатов измерения параметров спектральных составляющих сигналов вследствие ограниченного объема данных можно представить как результат умножения входного сигнала на весовое окно прямоугольной формы. Так как умножение во времени эквивалентно свертке в частотной области, то каждому значению БПФ может быть поставлен в соответствие узкополосный фильтр, настроенный на частоту $2\pi K/N$ (где N – число обрабатываемых импульсов, K – текущий номер импульса), с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), определяемой выражением

$$H_k(\omega) = \sin(\omega N/2) / \sin(\pi K/N + \omega/2), \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f/F$ – текущая круговая частота, нормированная к частоте повторения F .

Наличие боковых лепестков АЧХ приводит к «размыванию» частотных составляющих сигнала в пределах всей ши-

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ПЕРВИЧНЫХ КОГЕРЕНТНО-ИМПУЛЬСНЫХ РЛС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛГОРИТМОВ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ С АДАПТИВНЫМ ВЗВЕШИВАНИЕМ

С.С. Быбин, начальник НТО систем связи,
Е.А. Сеницын, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник,
А.П. Борина, канд. техн. наук, инженер НТО систем связи,
В.М. Тургалиев, канд. техн. наук, гл. специалист НТО систем связи,
 АО «Навигатор»,
М.Н. Ещенко, канд. экон. наук,
 директор Института инновационных решений и технологий СПбГМТУ,
 контакт. тел. (812) 740 1518, доб. 1015, 3701, apborina@gmail.com

рины анализируемого диапазона частот. Одним из наиболее простых и доступных эффективных способов борьбы с «размыванием» является весовая обработка импульсных выборок принимаемого сигнала.

Из выражения (1) можно определить, что максимальный уровень боковых лепестков в случае прямоугольной весовой функции равен 13,3 дБ.

В таблице представлены наиболее употребительные весовые функции (так называемые окна), отличающиеся от прямоугольной формы, которые уменьшают модуль весовых коэффициентов в начале и в конце выборки сигнала. При этом

Весовые функции БПФ

Весовая функция	Коэффициенты весовой функции во временной области	Максимальный уровень боковых лепестков АЧХ, дБ	Расширение главного лепестка АЧХ
Прямоугольная	$\omega_i = \begin{cases} 1, & i = 0 \div N-1 \\ 0, & \text{пр. } i \end{cases}$	- 13,3	1
Хемминга	$\omega_i = \alpha + (1 - \alpha) \cos 2\pi i / N$ ($\alpha = 0,54$)	- 42,7	1,52
Кайзера	$\omega_i = \frac{I_0 \left(\alpha \sqrt{1 - [2i / (N-1)]^2} \right)}{I_0(\alpha)}$ ($\alpha = 3,38$)	- 40	2,23
Дольфа-Чебышева	$\omega_i = \frac{\cos \sqrt{(2\pi i / N)^2 - \alpha^2}}{ch(\alpha)}$ ($\alpha = 5,30$)	- 40	1,35

изменяются показатели формы АЧХ и происходит желаемое уменьшение уровня боковых лепестков АЧХ [3–5].

Весовая обработка наряду с существенным снижением уровня боковых лепестков одновременно расширяет главный лепесток АЧХ [3–7]. Соотношение между шириной главного и уровнем боковых лепестков определяется величиной параметра α весовой функции.

Если эхо-сигнал цели и помеха достаточно разнесены по частоте, то выигрыш от весовой обработки может достигать 30–40 дБ [3].

Однако, если движущаяся помеха и цель имеют близкие радиальные скорости, использование окна с малым уровнем боковых лепестков, но широким главным лепестком может ухудшить обнаружение полезного сигнала. Для устранения указанного недостатка предлагается техническое решение адаптивной весовой обработки, заключающееся в нахождении такого значения параметра α весового окна, которое максимизировало бы коэффициент улучшения $K_y(K)$ каждого фильтра БПФ:

$$K_y(K) = N / \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[j2\pi K / N(i-n)\omega_i(\alpha)\omega_n(\alpha)r_{in}] \right\}, \quad (2)$$

где r_{in} – элемент корреляционной матрицы R_{nn} помехи; i, n – соответственно i -я и n -я выборки, $i, n = 0, \dots, N-1$; $K = 0, \dots, N-1$ – номер фильтра БПФ; N – порядок БПФ.

Из возможных вариантов весовой функции рассмотрим применение предлагаемого технического решения на примере окна Хемминга. Подстановка вместо $\omega(\alpha)$ в формуле (2) соответствующей функции из таблицы

$$\partial K_y(K) / \partial \alpha = 0$$

относительно α позволяют получить оптимальное значение параметра окна:

$$\alpha(K) = A_1(K) / A_2(K), \quad (3)$$

где

$$\hat{A}_1(K) = - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (\cos 2\pi i / N + \cos 2\pi n / N + 2\cos 2\pi i / N \cdot \cos 2\pi n / N) \times r_{in} \exp[j2\pi K(i-n) / N]; \quad (4)$$

$$\hat{A}_2(K) = 2 \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (1 + \cos 2\pi i / N + \cos 2\pi n / N + \cos 2\pi i \cdot \cos 2\pi n / N) \times r_{in} \exp[j2\pi K(i-n) / N]. \quad (5)$$

В ряде практических случаев целесообразно вместо корреляционных использовать спектральные характеристики помехи.

Будем полагать, что помеха является стационарным процессом. Тогда из выражений (4) и (5) получим зависимости для вычисления величин функций знаменателя и числителя для выражения (3):

$$\hat{A}_1(K) = -N - 2 \sum_{i=0}^{2N-1} \hat{R}'_i \cdot \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^{N-1} \gamma_n \exp[-j\pi n(2K+i) / N] \right\}; \quad (6)$$

$$\hat{A}_2(K) = 1,5N + 2 \sum_{i=0}^{2N-1} \hat{R}'_i \cdot \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^{N-1} \beta_n \exp[-j\pi n(2K+i) / N] \right\}, \quad (7)$$

где $\hat{R}'_i$ – оценка значений энергетического спектра помехи;

$$\gamma_n = \sum_{m=0}^{N-1-n} \left[\cos 2\pi m / N + \cos 2\pi(n+m) / N + 2\cos 2\pi m / N \cdot \cos 2\pi(n+m) / N \right];$$

$$\beta_n = \sum_{m=0}^{N-1-n} \left[1 + \cos 2\pi m / N + \cos 2\pi(n+m) / N + \cos 2\pi m / N \cdot \cos 2\pi(n+m) / N \right].$$

Результат оценки величины коэффициентов $\alpha(K)$ по выражению (3) с использованием выражений (6) и (7) позволяет с помощью весовой обработки получить оптимальную АЧХ для каждого K -го частичного фильтра БПФ, $K = 0, \dots, N-1$ по критерию максимизации K_y .

С целью упрощения, чтобы не выполнять N раз БПФ для всех значений параметра $\alpha(K)$, можно воспользоваться эквивалентностью умножения во временной и сверткой в частотной области.

Используя свойства АЧХ окна Хемминга, выражение для свертки приводим к виду

$$X_{\omega}(K) = \alpha(K)X(K) - [1 - \alpha(K)][X(K-1) + X(K+1)] / 2, \quad (8)$$

где $X(K)$ – выходные значения БПФ.

На рис. 1 представлена структурная схема устройства, реализующего адаптивную весовую обработку, содержит оперативное запоминающее устройство для текущего хранения входных данных, модули 8- и 16-точечного БПФ, устройство возведения выборок текущего сигнала в квадрат ($\bullet^2$), модуль усреднения $\bar{\Sigma}$ и коммутации, модуль $\hat{\alpha}$ оценки коэффициентов $\hat{\alpha}_m$, $m = 0, 1, \dots, 7$ и блок весовой обработки.

В ходе работы устройства выполняются следующие основные процедуры: оценка энергетического спектра помехи, вычисление оптимальных значений коэффициентов $\alpha(K)$, перенос сигнала с помощью 8-точечного БПФ в частотную область и последующая весовая обработка.

В оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) накапливается пять выборок сигнала по 16 отсчетов в каждой, соответствующие пяти соседним элементам дальности.

Восемь последовательных отсчетов из третьей выборки, задержанные на четыре точки азимута, обрабатываются 8-точечным блоком БПФ, а первая, вторая, четвертая и пятая выборки поступают в блок оценки энергетического спектра помехи. Блок оценки содержит последовательно соединенные 16-точечные БПФ, схему вычисления квадрата модуля и накопитель.

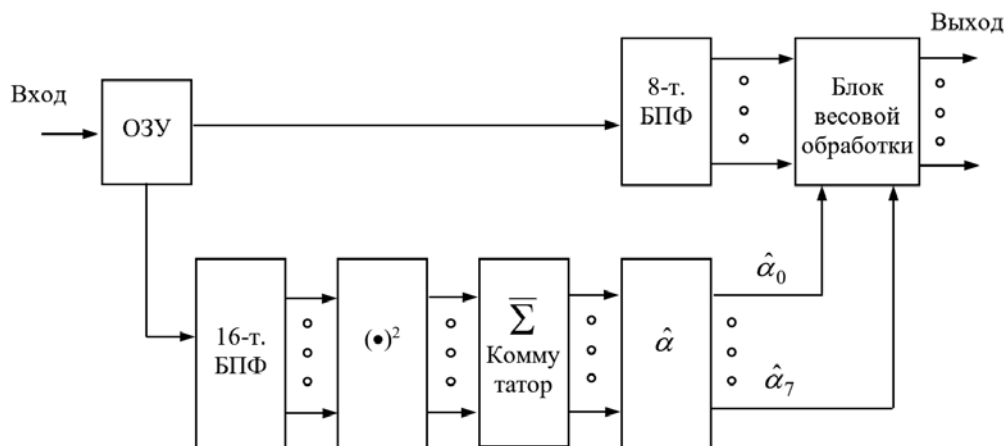


Рис. 1. Устройство обработки с адаптивным весовым взвешиванием БПФ

Накопитель осуществляет усреднение оценки энергетического спектра, которая подается на схему вычисления параметров окна, последовательно реализующую алгоритмы (6), (7) и (3).

В блок весовой обработки, который реализует алгоритм (8), подаются отсчеты с выхода 8-точечного БПФ и оценки оптимальных значений коэффициентов $\hat{\alpha}(K)$.

Сравнительный анализ работы устройства адаптивной весовой обработки, БПФ с прямоугольным окном и окном Кайзера ($\alpha = 3,38$) проводился в соответствии с формулами (2)–(5). Полагалось, что помеха с нормальным распределением имеет доплеровский сдвиг спектра, соответствующий сдвигу по фазе $\varphi_n = \pi/8$, что характеризует самую неблагоприятную ситуацию выделения полезного сигнала, когда спектр помехи находится между нулями АЧХ парциальных фильтров БПФ.

В ходе исследований получены зависимости выигрыша в коэффициенте улучшения устройства адаптивной весовой обработки от ширины спектра помехи, представленные на рис. 2, для случая, когда разность доплеровских частот цели и помехи равна $0,19 F_n$.

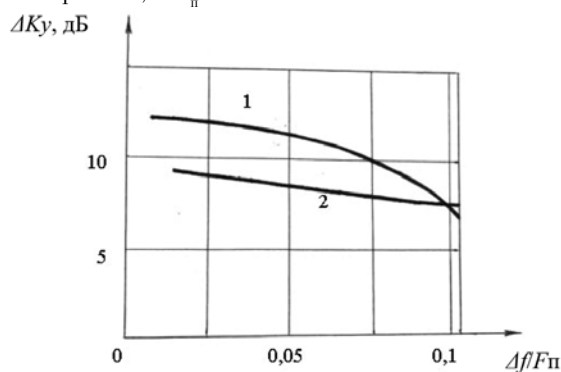


Рис. 2. Зависимости выигрыша в коэффициенте улучшения устройства обработки с адаптивным весовым взвешиванием БПФ от ширины спектра помехи

На рис. 2 кривая 1 соответствует выигрышу относительно БПФ с прямоугольным окном, а кривая 2 – БПФ с окном Кайзера. Отметим, что если разность доплеровских частот цели и помехи $\Delta f_{\text{цп}} = 0,31 F_n$, то выигрыш составляет соответственно 19,5 и 2,2 дБ, а при в случае, когда $\Delta f_{\text{цп}} = 0,44 F_n$, выигрыш равен соответственно 20 и 0,2 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное устройство, реализующее предлагаемую адаптивную весовую обработку БПФ ограниченного коли-

чества выборок входного радиолокационного сигнала целей на фоне помех в первичных когерентно-импульсных РЛС, обеспечивает повышение коэффициента улучшения блоков БПФ по сравнению с известными неадаптивными способами взвешивания сигнала.

Рассмотренная обработка сигналов при помощи алгоритмов быстрого преобразования Фурье с адаптивным взвешиванием улучшает отношение сигнал/помеха по сравнению с традиционными способами взвешивания сигнала при произвольном отличии частот Доплера цели и помехи. Наибольшие преимущества такой обработки проявляются при незначительной разнице доплеровских частот цели и помехи.

Результаты сравнительного анализа позволяют сделать вывод о том, что предлагаемое техническое решение адаптивной весовой обработки обладает практической значимостью и полезностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошелев В. И., Кирдяшкин В. В., Сычев М. И., Ясенцев Д. А. Актуальные вопросы радиолокации / Под ред. П. А. Бакулева. – М.: Изд-во МАИ. – 216 с.
2. Методы формирования и обработки сигналов в первичных радиолокационных станциях / Ситицын В. А., Ситицын Е. А., Страхов С. Ю., Матвеев С. А. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет «Военмех», 2016. – 213 с. – ISBN 978-5-85546-952-3.
3. Василенко Н.Т. Радиолокационные системы движущихся целей // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Радиотехника. – 198. – №23. – С. 3–151.
4. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. Нью-Джерси. 1975/ Пер. с англ. Под ред. Ю.Н. Александрова. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
5. Abatzoglou Z. A fast and accurate method for estimating target Doppler. // Proc. IEEE Int. Conf. Aconst., Speech and Signal Process, 14–16 Apr. 1983, Boston, Mass. – New York. – 1983. – Vol. 2. – P. 691–694.
6. Быбин С.С., Борина А.П., Ситицын Е.А. Когерентный прием ЛЧМ радиолокационных сигналов ММО РЛС с использованием интегральных схем программно-определяемого радио // Опыт и перспективы совершенствования систем связи и акустических испытаний современной техники: Сб. науч. тр. науч.-практ. конф., приуроченной к 130-летию со дня изобретения радио, Санкт-Петербург, 9 апреля 2025 г. – СПб.: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 2025. – С. 24–33.
7. Способ подавления пассивных помех в первичных радиолокационных станциях с электронным сканированием / Рукавишников В.М., Быбин С.С., Ситицын Е.А. [и др.] // Судостроение. – 2025. – № 3(880). – С. 37–43. ■

Локальные IP-сети находят широкое применение при организации связи на припортовых территориях [1, 2], поскольку переход к IP-технологиям открывает новые возможности передачи и представления пользователям информационного контента различного содержания [3, 4].

При организации работы IP-сетей важным моментом являются контроль и управление информационным трафиком для обеспечения эффективности распределения имеющегося ресурса [5, 6]. Как правило, в качестве контроля используют статистические параметры, характеризующие трафик. Однако их информативности не всегда достаточно для понимания сложившейся ситуации [7–9]. Это обусловлено тем, что статистические параметры определяют соотношение информационных «0» и «1» в информационном трафике, но на их основе сложно судить о самой структуре анализируемых последовательностей.

Вместе с тем в [7, 10] предложено использовать функцию различий Ждановой для проведения сравнительного анализа бинарных последовательностей. В общем случае эта функция позволяет получать информацию о позициях последовательностей, в которых их элементы не совпадают, что является важным результатом при сопоставительном анализе данных.

В развитие данного направления в настоящей статье представлены результаты дальнейшего совершенствования указанной функции, обеспечивающей ее эффективное использование при обработке относительно коротких последовательностей.

ВОЗМОЖНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ОЦЕНКЕ СТРУКТУРЫ БИТОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

В статистическом анализе наиболее широкое применение получили такие параметры, как математическое ожидание, дисперсия, коэффициенты асимметрии и эксцесса, а также коэффициент корреляции Пирсона [11, 12].

Математическое ожидание представляет собой среднее значение обрабатываемой выборки

$$E[s] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} s_i, \quad (1)$$

где s_i – вектор обрабатываемой битовой последовательности, N – количество битов (размерность вектора) последовательности.

Дисперсия характеризует разброс элементов последовательности относительно ее среднего значения (размах выборки):

ПРИМЕНЕНИЕ УТОЧНЕННОЙ ФУНКЦИИ ЖДАНОВОЙ ПРИ АНАЛИЗЕ БИТОВЫХ ПОТОКОВ*

К.О. Симонова, адъюнкт ВАС им. С.М. Будённого,

Д.В. Васильева, ст. преподаватель ГУАП,

С.В. Дворников, д-р техн. наук, проф., ГУАП и ВАС им. С.М. Будённого, контакт. тел. (812) 247 9400

$$D[s] = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (s_i - E[s])^2. \quad (2)$$

Коэффициенты асимметрии A_s и эксцесса $\mathcal{E}_s$ можно определить по формулам

$$A_s = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{s_i - E[s]}{\sqrt{D[s]}} \right)^3; \quad (3)$$

$$\mathcal{E}_s = \left[\frac{N(N+1)}{(N-1)(N-2)(N-3)} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{s_i - E[s]}{\sqrt{D[s]}} \right)^4 \right] - \frac{3(N-1)^2}{(N-2)(N-3)}. \quad (4)$$

Следует отметить, что коэффициенты асимметрии и эксцесса характеризуют степень отличия распределения значений обрабатываемой выборки от нормального закона, что существенно при решении задач анализа нарушения равномерности трафика, вызванного различными причинами.

И, наконец, коэффициент корреляции Пирсона определяет степень структурных различий двух последовательностей $s1$ и $s2$ [13, 14]:

$$\begin{aligned} \text{corr}(s1, s2) &= \\ &= \frac{E[(s1 - E[s1])(s2 - E[s2])]}{\sqrt{D[s1]D[s2]}} = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(s1_i - E[s1])(s2_i - E[s2])}{\sqrt{D[s1]D[s2]}}. \end{aligned} \quad (5)$$

В качестве примера рассмотрим две последовательности битов $s1$ и $s2$, размерностью $N = 32$:

$s1 = \{1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1\}$

$s2 = \{1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1\}$

На рис. 1 представлены импульсные

последовательности, сформированные в соответствии с $s1$ и $s2$.

В табл. 1 представлены статистические параметры, характеризующие последовательности $s1$ и $s2$.

Таблица 1
Статистические характеристики анализируемых потоков $s1$ и $s2$

Поток	$E[*]$	$D[*]$	A_s	$\mathcal{E}_s$
$s1$	0,531	0,257	-0,131	-2,119
$s2$	0,563	0,254	0,131	-2,119

При этом значение коэффициента корреляции Пирсона $K_{s1,s2} = 0,757$.

Отметим, что на структурные отличия последовательностей в рассмотренной ситуации способен реагировать лишь коэффициент асимметрии [15, 16]. В частности, для последовательностей $s1$ и $s2$ коэффициенты асимметрии отличаются знаками. Это обусловлено тем, что у последовательности $s1$ аномалии присутствуют в первой ее части, а у $s2$ – во второй. Однако если же аномалии будут присутствовать и в первой и во второй части последовательностей, то в этом случае коэффициент асимметрии будет неинформативен. Пример таких последовательностей $s11$ и $s22$ в виде импульсов представлен на рис. 2.

Ниже приведена структура последовательностей $s11$ и $s22$:

$s11 = \{1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1\}$

$s22 = \{1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1\}$

Следует отметить, что отличие последовательностей $s1$ и $s2$ от $s11$ и $s22$ состоит в том, что в $s1$ на позиции 18 вместо «1» определен «0», а в $s2$ вместо «0» на этой позиции определена «1». При такой структуре последовательностей

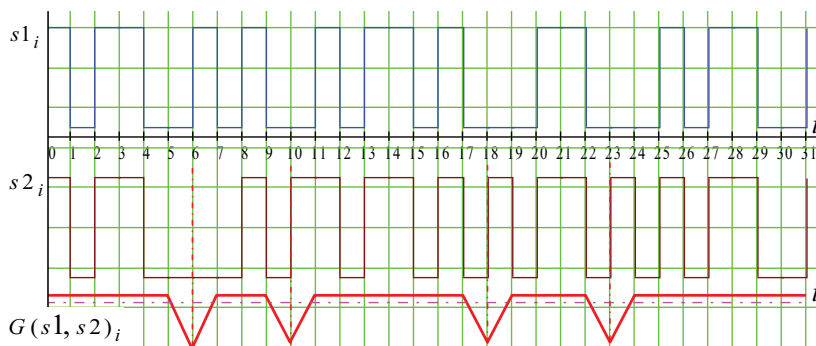


Рис. 1. Импульсы, построенные на основе битовых последовательностей $s1$ и $s2$

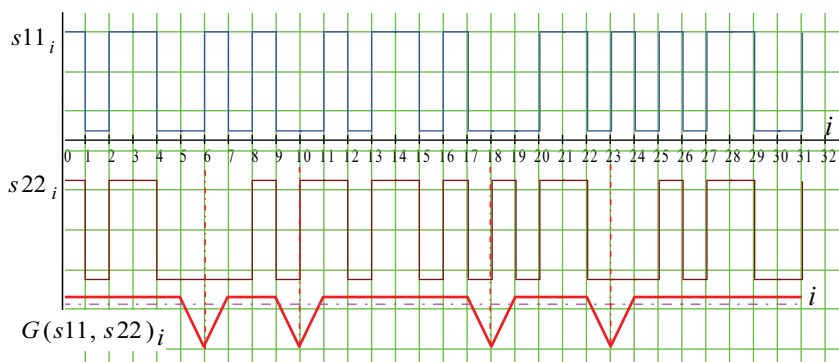


Рис. 2. Импульсы, построенные на основе битовых последовательностей $s11$ и $s22$

коэффициент асимметрии становится равным нулю. Полный перечень статистических параметров последовательностей $s11$ и $s22$ представлен в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики анализируемых потоков $s11$ и $s22$

Поток	$E[*]$	$D[*]$	A_s	Ξ_s
$s11$	0,5	0,258	0	-2,138
$s22$	0,5	0,258	0	-2,138

Анализ результатов, представленных в табл. 2, позволяет заключить, что параметры $E[*]$, $D[*]$ и Ξ_s , характеризующие последовательности $s11$ и $s22$, полностью совпадают и остаются неизменными по отношению к параметрам $s1$ и $s2$, несмотря на различия в их структуре.

Значение коэффициента корреляции Пирсона также практически не изменилось по сравнению с $K_{s1,s2}$ и составило $K_{s11,s22} = 0,75$ (поскольку размах коэффициента корреляции от -1 до 1, а размерность последовательности равна 32, величина 0,75 характеризует различия последовательностей на уровне 7/8).

Таким образом, можно сделать вывод, что широко используемый аппарат статистического анализа на основе таких показателей, как математическое ожидание, дисперсия, коэффициенты асимметрии и эксцесса, а также коэффициент корреляции Пирсона, не способен выявлять структурные различия обрабатываемых битовых потоков. Следовательно, необходим поиск новых «инструментов» анализа структуры обрабатываемых последовательностей.

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИИ ЖДАНОВОЙ ПРИ АНАЛИЗЕ СТРУКТУРЫ БИТОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

В общем случае функция различий Ждановой определяется как

$$G(s1, s2)_i = (s1_i - E[s1])(s2_i - E[s2]) \quad (6)$$

и фактически представляет некоторую модификацию коэффициента корреляции Пирсона. Ее особенность в том, что для сравниваемых бинарных последовательностей в позициях, в которых будут наблюдаться их различия, функция

$G(s1, s2)$ имеет отрицательные значения (локальные минимумы), обусловленные различием знака первого и второго сомножителей. И, наоборот, для позиций, в которых значения сравниваемых последовательностей одинаковы, различие Ждановой всегда положительна.

На рис. 1 и рис. 2 представлены функции различий Ждановой $G(s1, s2)$ и $G(s11, s22)$, соответственно, для последовательностей $(s1, s2)$ и $(s11, s22)$.

Следует отметить, что отрицательные значения $G(s1, s2)$ и $G(s11, s22)$ четко совпадают со значениями i , в которых последовательности $(s1, s2)$ и $(s11, s22)$ различаются между собой. То есть функции Ждановой $G(s1, s2)$ и $G(s11, s22)$ в полной мере отражают структурные различия последовательностей $s1, s2$ и $s11, s22$.

Вместе с тем выражение (6) не всегда позволяет получить приемлемый результат. В частности, на рис. 3 представлены две последовательности $s3, s4$ и со-

ответствующая им функция различий Ждановой $G(s3, s4)$.

Для рассмотренной ситуации – см. рис. 3 – функция различий Ждановой $G(s3, s4)$ не так очевидно локализует структурные различия. Как правило, в качестве порога принятия решения используют математическое ожидание самой функции различий $E[G]$ (на рис. 1–3 порог $E[G]$ показан тонкой пунктирной линией поверх функции Ждановой).

Изломанный характер функции различий Ждановой обусловлен тем, что средние значения последовательностей $E[s3]$ и $E[s4]$ не совпадают между собой, поэтому результат перемножения $(s3_i - E[s3])(s4_i - E[s4])$ допускает четыре комбинации, что четко просматривается на рис. 3. Однако в условиях канальных шумов число вариантов комбинаций возрастет. При этом функция порога $E[G]$ не позволяет обеспечить однозначно правильное решение.

Альтернативным вариантом может рассматриваться модифицированная функция различий Ждановой, которую представим следующим образом:

$$\tilde{G}(s1, s2)_i = \left(s1_i - \frac{\max(s1) - \min(s1)}{2} \right) \times \left(s2_i - \frac{\max(s2) - \min(s2)}{2} \right). \quad (7)$$

В выражении (7) $\max(*)$, $\min(*)$ – соответственно максимальные и минимальные значения элементов последовательности.

На рис. 4 представлены последовательности $s3, s4$ и соответствующая им

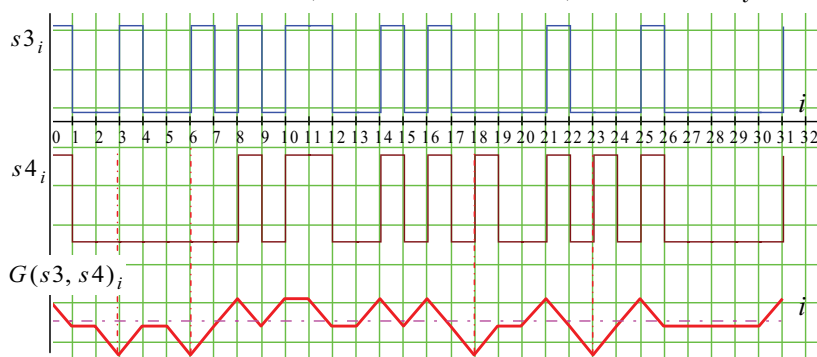


Рис. 3. Импульсы, построенные на основе битовых последовательностей $s3$ и $s4$

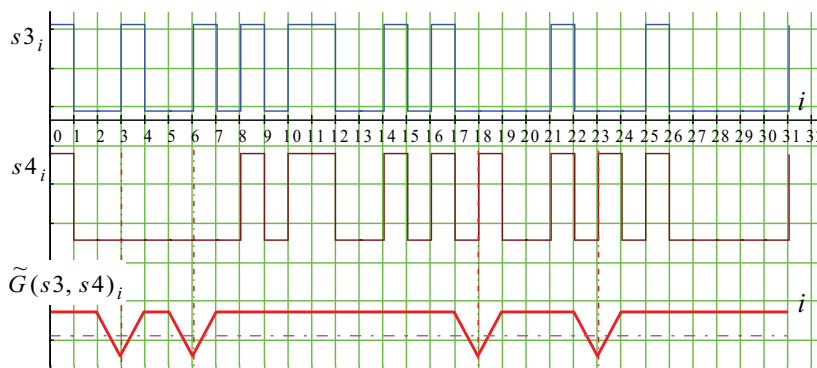


Рис. 4. Импульсы, построенные на основе битовых последовательностей $s3, s4$, и соответствующая им модифицированная функция различий Ждановой

модифицированная функция различий Ждановой $\tilde{G}$ (s_3, s_4).

Заметим, что модифицированная функция различий Ждановой $\tilde{G}^*$ строго обеспечивает только два допустимых состояния, характеризующих моменты совпадения и несовпадения сравниваемых последовательностей. При этом модифицированная функция позволяет работать даже с последовательностями, абсолютные значения амплитуд импульсов которых различны.

Для примера на рис. 4 показана функция различий Ждановой $\tilde{G}^*$, построенная в условиях, когда амплитуда последовательностей импульсов s_3 и s_4 отличалась на 20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило правомочность теоретических предположений об ограниченности возможностей статического анализа по выявлению аномалий битовых последовательностей, проявляющихся в изменении их структуры.

Наиболее приемлемым в такой ситуации видится применение функции различий Ждановой, отрицательные величины которой соответствуют позициям, где значения битов отличаются от значений битов эталонных последовательностей.

Предложенная модификация функции Ждановой, заключающаяся в переходе от ее средних значений к медианным, при формировании сравниваемых сомножителей существенно повысила возможности функции различий Ждановой по обработке битовых последовательностей, в том числе при выявлении их аномалий.

Дальнейшее исследование авторы связывают с применением методов совместной частотно-временной обработки анализируемых последовательностей [17–20].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-10259).

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин А. Новые оптические SMF-трансиверы компании APAC OPTO для магистральных высокоскоростных GPON-сетей // Компоненты и технологии. – 2022. – № 3(248). – С. 50–56. – EDN LWSIGA.
2. Грузков И. В., Скуперская Е. В., Русановский Е. В. Исследование сегментов рынка инфраструктуры промышленного интернета // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2021. – Т. 11. – № 12-1. – С. 442–

453. – DOI 10.34670/AR.2021.48.31.037. – EDN KWKUBY.
3. Дворников С. В., Васильева Д. В. Повышение достоверности выявления аномалий на изображениях при формировании их векторов признаков в базах вейвлетов // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 6. – С. 1698–1729. – DOI 10.15622/ia.23.6.5. – EDN JDDWJS.
4. Меркулов А. Г. Конвергентные пакетные ЦВЧ сети: переход от технологии Frame Relay к IP-технологии // Автоматизация и IT в энергетике. – 2014. – № 5(58). – С. 14–22. – EDN VWNJHR.
5. 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. – Ч. 2. – Санкт-Петербург, 3–7 июня 2019 г. – СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2019. – С. 84–89. – EDN GLQVYA.
6. Алгоритм нечеткого управления информационным трафиком в телекоммуникационных сетях // Искандеров Ю. М., Буцанец А. А., Смоленцев С. В. [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29. – № 1. – С. 41–55. – DOI 10.18127/j5604128-202401-04. – EDN FUDIBV.
7. Жданова И. М., Дворников С. С., Дворников С. В. Обнаружение аномалий трафика на основе обработки их фреймовых вейвлет-преобразований // Тр. учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10. – № 5. – С. 14–23. – DOI 10.31854/1813-324X-2024-10-5-14-23. – EDN BJFZSE.
8. Болодурина И. П., Ушаков Ю. А., Ушакова М. В. Методика получения обобщенных статистических характеристик сетевого оборудования для создания имитационных моделей // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. – Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 5–17. – DOI 10.14529/ctcr200301. – EDN WMXSSK.
9. Демидов Н. А. Исследование трафика 3D-видеопотока на имитационной модели // Электросвязь. – 2024. – № 3. – С. 44–48. – DOI 10.34832/ELSV.2024.52.3.008. – EDN DNQCWX.
10. Патент на полезную модель № 233212 U1 (Российская Федерация), МПК G06F 11/36. Устройство статистического анализа битовых последовательностей : заявл. 18.11.2024 : опубл. 11.04.2025 / Дворников С. С., Федосеев Д. О., Латин С. П., Дворников С. В.; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмического приборостроения». – EDN ZSXLGS.
11. Kovalev R. I. Non-financial reporting by Russian and Western European companies: an statistical analysis // Управление в сов-

ременных системах. – 2023. – №. 1(37). – С. 32–41. – DOI 10.24412/2311-1313-37-33-41. – EDN WQUOXO.

12. Преображенский Ю. П., Чопоров О. Н. Об использовании метода статистического анализа для анализа характеристик производительности сети // Вестник Воронежского ин-та высоких технологий. – 2020. – № 2(33). – С. 34–36. – EDN YLBSBA.
13. Дворников С. В., Дворников С. С., Пшеничников А. В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Информационно-управляющие системы. – 2019. – № 4(101). – С. 62–68. – DOI 10.31799/1684-8853-2019-4-62-68. – EDN VUYFYO.
14. Замятин В. М., Молчанова Е. И. Особенности применения описательной и аналитической статистики в социологических исследованиях // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. – Серия: Естественные и технические науки. – 2024. – № 5. – С. 75–82. – DOI 10.37882/2223-2966.2024.05.12. – EDN BVCRSU.
15. Жданова И. М., Дворников С. С., Дворников С. В. Модель и условия возникновения аномалий в демодулированном трафике абонентских терминалов VSAT // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 1. – С. 105–130. – DOI 10.24412/2410-9916-2025-1-105-130. – EDN JCKFPW.
16. Смирнов Ю. М., Захарочкин Н. А. Исследование диапазонов регулирования коэффициентов асимметрии цикла гидравлических пульсационных систем // Автоматика. Информатика. – 2000. – № 1–2(6–7). – С. 17–21. – EDN MVZMR.
17. Дворников С. С., Жданова И. М., Дворников С. В. Обработка бинарных потоков на основе кратномасштабных преобразований // Вопросы радиоэлектроники. – Серия: Техника телевидения. – 2024. – № 4. – С. 69–76. – EDN HBYKER.
18. Жданова, И. М., Дворников С. С., Дворников С. В. Обнаружение аномалий трафика на основе обработки их фреймовых вейвлет-преобразований // Тр. учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10. – № 5. – С. 14–23. – DOI 10.31854/1813-324X-2024-10-5-14-23. – EDN BJFZSE.
19. Васильева Д. В., Дворников С. В., Якушенко С. А., Дворников С. С. Автоматизация процедур обнаружения лесных пожаров по результатам обработки видео // Вестник Санкт-Петербургского ун-та государственной противопожарной службы МЧС России. – 2023. – № 4. – С. 47–58. – DOI 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-47-58. – EDN TQYCOI.
20. Якушенко С. А., Дворников С. В., Снежко В. К. Обоснование требований к точности позиционирования речных безэкипажных судов // Морской вестник. – 2024. – № 1(89). – С. 90–92. – EDN QTVYMN. ■

Российское правительство, уделяя особое внимание развитию военно-морского флота (ВМФ) совершенствует работу государственных, научных и научно-производственных организаций в целях обеспечения эффективной деятельности на море и ставит приоритетную задачу по обеспечению потребителей различного уровня информацией о фактической, прогностической, навигационной и гидрометеорологической обстановке, а также рекомендациями по применению вооружения и морских средств навигации (МСН) [1]. Современное состояние автоматизации работы судоводителя можно охарактеризовать цифрами: количество автоматизированных задач за последние 10–15 лет возросло на 85%, а уровень автоматизации современных МСН – на 60%. Практика показывает, что напряженность деятельности судоводителя на подавляющем большинстве кораблей и судов ВМФ может превышать допустимое значение в несколько раз [2].

На данном этапе понятия «электронные вычислительные машины», «программная обработка данных», «электронные навигационные информационные системы» и т. п., не новы и становятся все более актуальными. За последние несколько лет в условиях повышения авторитета и статуса Российской Федерации как полноправного и равноправного участника всех процессов мирового взаимодействия (политического, экономического, военного, технологического и т. д.), остро встает вопрос о развитии и совершенствовании морского приборостроения, в частности для ВМФ, в соответствии с мировым уровнем. Сегодня в области автоматизации военно-морской деятельности наблюдаются существенные сдвиги.

Эффективное освоение новой техники всегда было одной из важнейших задач ВМФ. Особое внимание необходимо уделять организации непрерывного сбора, анализа и обработки навигационной информации, поступающей от навигационного комплекса, лага, эхолота и т. п., оценке точности и повышению надежности навигационного оборудования с целью качественного решения поставленных задач и обеспечения навигационной безопасности плавания.

Важно понимать, что достижение успеха в современных военных операциях на море возможно только при соблюдении следующих определяющих условий:

- обеспечение ВМФ современными и передовыми МСН;
- применение современных, отечественных и цифровых технологий

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ASTRA LINUX

Е. А. Поташко, специалист, гл. конструктор,

Л. С. Хабаров, специалист, начальник отдела программного обеспечения,
АО «МНС»,

контакт. тел. (812) 320 3840

программной обработки навигационной информации.

Развитие средств и методов навигационного обеспечения кораблей и судов ВМФ в настоящее время проходит в обстановке постоянно возрастающей интенсивности мореплавания, усиления требований к точности, объему и надежности навигационной информации и оперативности ее обработки. Данные факторы, наряду с обусловленной ими необходимостью обслуживания большого количества сложной, разнотипной аппаратуры, в значительной степени осложняют деятельность судоводителей по обеспечению навигационной безопасности плавания и использованию МСН. В первую очередь это проявляется в сложных условиях, где возрастает цена последствий от неправильного или несвоевременно принятого решения. В связи с этим большое внимание уделяется совершенствованию систем, позволяющих в значительной степени автоматизировать деятельность судоводителей [2].

Высокие темпы развития технологий электронно-вычислительных систем, имеющих большие мощности и возможности, принятие целого комплекса современных международных стандартов, которые определили концепцию ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) – информационной системы с отображением векторной электронной карты, рассматриваемой для целей навигации в качестве эквивалентной замены традиционной бумажной морской навигационной карты, послужили толчком к развитию и интеграции систем отображения электронных морских навигационных карт (ЭМНК) на отечественной операционной системе Astra Linux [3].

Применительно к системам, предназначенным для кораблей и судов ВМФ, введено понятие «электронная навигационная информационная система» (ЭНИС). При этом имеется

в виду, что данная система отвечает требованиям ECDIS в части обеспечения навигационной безопасности плавания. ЭНИС включает в себя дополнительное множество баз данных и функциональных задач, отвечающих требованиям руководящих документов ВМФ по составу и организации (алгоритмам) их решения.

Безусловно, интеграция ЭНИС с системами управления кораблем или судном открывает еще более широкие возможности обеспечения навигационной безопасности плавания, автоматизации процесса судовождения, уменьшения информационной и психологической нагрузки на судоводителей. Развитие и модернизация ЭНИС – важные технологические факторы снижения аварийности флота, в том числе по вине личного состава [4].

Важнейшими требованиями к интеграции отечественной ЭНИС нового поколения являются разработка современных электронно-вычислительных систем и оптимизация состава специальных и сервисных задач на отечественной операционной системе Astra Linux для обеспечения технологической независимости.

Роль ЭНИС на отечественной операционной системе Astra Linux в автоматизации процессов управления кораблем или судном ВМФ определяется тем, что она может стать картографической основой геоинформационных систем (ГИС) в защищенной среде, которая обеспечивается инструментами операционной системы. Области применения конкретных ГИС определяют направления использования ЭМНК в ВМФ. Среди них:

- корабельные и судовые ЭНИС;
- корабельные и судовые автоматизированные системы управления и системы отображения обстановки;
- автоматизированные системы планирования и боевого управления;
- средства автоматизации гидрометеорологического обеспечения,

океанографических и других специальных работ;

- средства и системы навигационно-гидрографического обеспечения морских операций и задач флота, требующих сложного, высокоточного и оперативного обеспечения;
- системы гидрометеорологической разведки;
- системы управления движением кораблей и судов;
- тренажерная техника [3].

Поэтому в современных условиях использование ЭНИС на отечественной операционной системе Astra Linux должна быть отнесена, безусловно, к приоритетным направлениям военно-технической политики ВМФ.

Приоритетом АО «МНС» является развитие перспективных направлений в области разработки и поставки передовых образцов новой техники. В течение двух лет подразделения предприятия ведут активную разработку программного обеспечения ЭНИС «Аляска-Ч» нового поколения на базе отечественной операционной системы Astra Linux. Обновленное программное обеспечение позволяет не только максимально автоматизировать рабочее место судоводителя, но и решать дополнительные расчетные и сервисные задачи с высокой скоростью обработки и повышением точности, возможностью ввода навигационного параметра, учета погрешностей и вывода по требованию необходимой визуальной и звуковой информации для обеспечения навигационной безопасности плавания (рис. 1).

Использование среды Astra Linux характерно для современного развития систем и позволяет совершенствовать режим мультidisплея – одновременного отображения на экране нескольких ЭМНК в различных форматах (рис. 2). Кроме того, среда Astra Linux открывает широкие возможности по обмену картографической информацией между различными потребителями, в том числе с использованием средств радиосвязи, и обеспечивает реальную защиту информации встроенными инструментами. Особенностью развития и интеграции ЭНИС на операционной системе Astra Linux является высокая динамика разработки отечественного про-

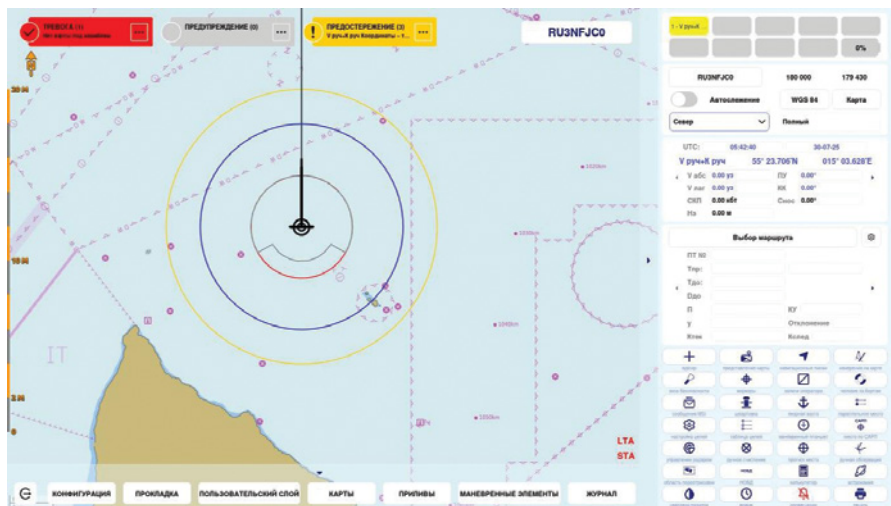


Рис. 1. Панель управления ЭНИС «Аляска-Ч» на отечественной операционной системе Astra Linux

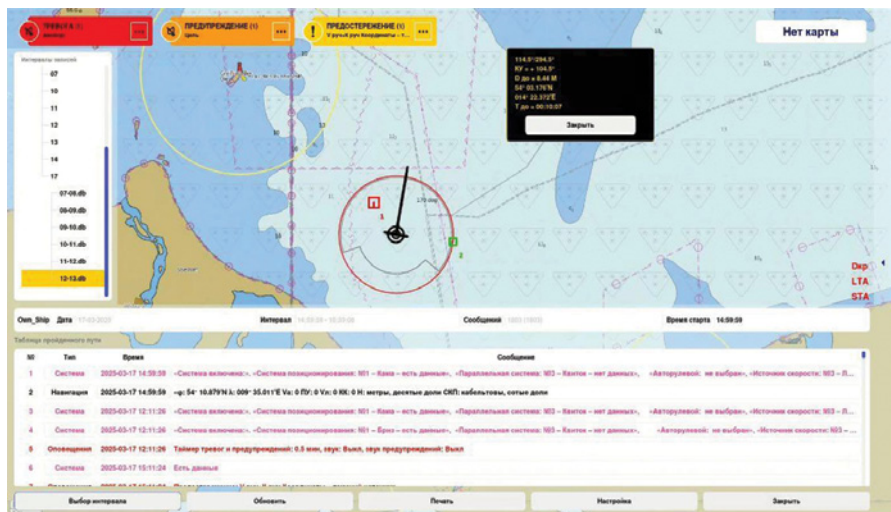


Рис. 2. Режим мультidisплея ЭНИС «Аляска-Ч» на отечественной операционной системе Astra Linux

граммного обеспечения с использованием современных программных инструментов, средств вычислительной техники, с одной стороны, способных обеспечить использование программного продукта, а с другой – соответствующих требованиям ВМФ к бортовой радиоэлектронике.

Учитывая изменяющуюся ситуацию в области развития отечественного приборостроения, задача разработки ЭНИС для функционирования на отечественной операционной системе Astra Linux является востребованной и перспективной в интересах ВМФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарматенко И. С., Чебышев М. Ю. Математическая обработка и анализ навигационной безопасности. – СПб.: Изд. ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2022. – 198 с.
2. Дзюба В. Г., Панов А. Г., Глухов Ю. А. Автоматизация деятельности штурмана. Развитие навигационных информационных систем с отображением электронных карт. – 2001. – 4 с.
3. ПШС-72. Правила использования ЭКНИС, адм. № 9368, УНИО МО РФ, 2021. – 51 с.
4. ГОСТ Р МЭК 61174–2009. Электронная картографическая навигационная информационная система (ЭКНИС)/ЗАО «ЦНИИМФ», 2009, № 939-ст. – 27 с. ■

Пожарная безопасность морских судов продолжает оставаться одной из наиболее актуальных задач современного флота. По данным сайта «Морские вести России», число пожаров на судах за последние пять лет возросло на 25%, что создает серьезные угрозы не только сохранности судов и перевозимого груза, но и безопасности жизни и здоровью экипажа [1].

Традиционные пороговые системы пожарной сигнализации имеют ряд недостатков, которые выявляются при эксплуатации в морских условиях, что свидетельствует об их ограниченной эффективности: они обеспечивают лишь 50-процентную достоверность обнаружения очагов возгорания и регистрируют до 15% ложных срабатываний, а также часто реагируют с запаздыванием на реальные возгорания [2]. Указанные недостатки могут быть связаны с влиянием переменных климатических факторов, характерных для эксплуатации морских судов, а также с ограничениями самого принципа работы пороговых устройств.

В предшествующих исследованиях был предложен мультикритериальный подход к обнаружению пожара, сочетающий анализ нескольких контролируемых параметров для повышения эффективности работы судовых систем пожарной сигнализации, особенно на кораблях ВМФ, в условиях сложной и динамич-

МУЛЬТИКРИТЕРИАЛЬНАЯ ДЕЛЬТА-ФАКТОРНАЯ СИСТЕМА СУДОВОЙ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ: АПРОБАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

С. С. Пустынников, канд. техн. наук, ген. директор,
М. А. Ахрестин, вед. инженер-руководитель проектов,
ООО «НПО Пожарная автоматика сервис»,
контакт. тел. (495) 179 0289

ной морской среды. Такой подход показал свою перспективность [3].

Мультикритериальная система сигнализации обнаружения пожара – это способ обработки сигналов, поступающих от одного или нескольких пожарных извещателей, с целью достоверной идентификации пожарной ситуации с учетом изменяющихся во времени нескольких факторов пожара или нескольких физических характеристик одного фактора.

Дельта-факторы – это нормируемое (фиксированное) изменение значения фактора пожара в начальной стадии его развития по величине в заданный интервал времени, когда величина фактора не достигла опасных значений.

Перспективным направлением развития является мультикритериальная

дельта-факторная система судовой пожарной сигнализации.

Работа системы в дежурном режиме основана на *анализе изменения величины* контролируемых факторов пожара (температуры, оптической плотности дыма, концентрации газов) *за фиксированное время* вместо традиционного использования только абсолютных значений параметров. Такой подход позволяет отслеживать динамику признаков пожара, принимать решения по совокупности критериев, существенно сокращать время обнаружения на ранних стадиях, обеспечивать высокую достоверность распознавания и практически исключать ложные тревоги (рис. 1).

В статье приведены краткое описание системы, результаты испытаний и оценка ее потенциала для обеспече-

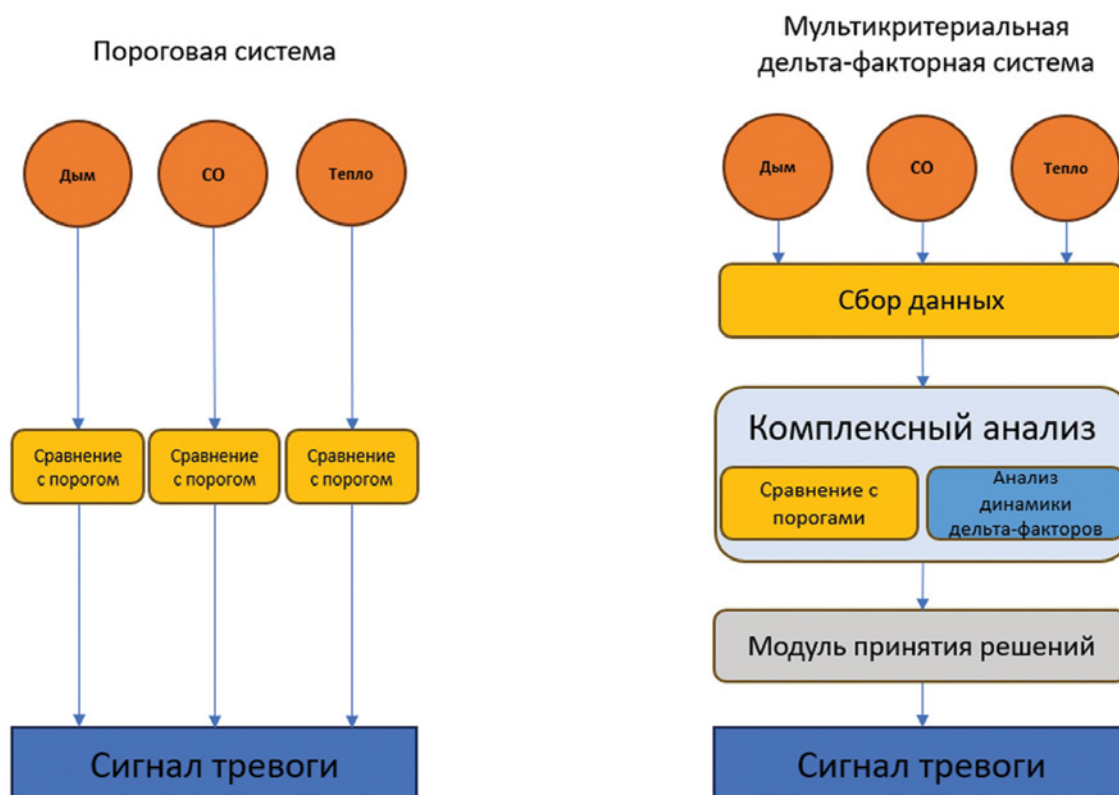


Рис. 1. Сравнение архитектуры пороговой и мультикритериальной дельта-факторной системы судовой пожарной сигнализации

ния пожарной безопасности морских судов. Испытания подтвердили высокую надежность, отсутствие ложных срабатываний и сокращение времени обнаружения очагов возгорания в 3–5 раз по сравнению с традиционными пороговыми системами, что подчеркивает практическую значимость и перспективы внедрения технологии в морскую отрасль.

ИСПЫТАНИЯ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ

В мультикритериальной дельта-факторной системе судовой пожарной сигнализации «Гамма-01 Ф» реализован инновационный подход к обнаружению пожара на морских судах. Данная система осуществляет контроль параметров ключевых факторов пожара: температуры, оптической плотности дыма и концентрации газов, на основе мультикритериального дельта-факторного анализа которых формируется сводная оценка уровня пожароопасности.

Испытания включали следующие этапы:

- стендовые испытания в климатических камерах с целью оценки работоспособности системы в условиях переменных температуры и влажности, характерных для морской эксплуатации;
- климатические испытания и испытания на воздействие различных внешних факторов в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 20.57.305, ГОСТ РВ 20.57.306, ГОСТ РВ 20.57.307 и ГОСТ РВ 20.39.304 для подтверждения устойчивости и надежности работы системы в морской среде;
- заводские приемочные испытания на соответствие требованиям Российского морского регистра судоходства и техническим условиям ТУ 4372–020–40168287–05;
- лабораторные и натурные огневые испытания с использованием различных горючих материалов, имитирующих возможные виды пожаров на судне.

Всего проведено свыше 100 различных испытаний на четырех специализированных площадках: ФГУП «Крыловский ГНЦ», учебно-тренировочном комплексе «Гепест», ВНИИПО МЧС РФ и лабораториях ООО «НПО ПАС», что позволило всесторонне оценить эффективность, надежность и устойчивость мультикритериальной дельта-факторной системы судовой пожарной сигнализации в условиях, максимально приближенных к реальным.

Эффективность работы системы оценивалась по ключевым показателям: достоверность обнаружения возгораний, частота ложных срабатыва-

ний и времени срабатывания системы в соответствии с методиками и требованиями ГОСТ Р 53325–2012 «Техника пожарной. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования и методы испытаний» [4].

Такой комплексный подход к испытаниям и оценке позволяет всесторонне подтвердить технические характеристики и эксплуатационные достоинства новой системы пожарной сигнализации для морских судов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Сравнительная эффективность.

Испытания показали преимущества мультикритериальной дельта-факторной системы судовой пожарной сигнализации по сравнению с традиционными пороговыми решениями:

- *достоверность обнаружения*: мультикритериальная дельта-факторная система обеспечила обнаружение всех тестовых сценариев возгорания, что значительно превосходит уровень достоверности в 50%, характерный для традиционных пороговых систем [8];
- *отсутствие ложных срабатываний*: не зафиксировано ни одного случая ложного срабатывания мультикритериальной дельта-факторной системы, тогда как традиционные системы демонстрировали ложные тревоги с частотой 15% в условиях морской эксплуатации [2];
- *время обнаружения*: мультикритериальная дельта-факторная система позволяет обнаруживать признаки пожара в 3–5 раз раньше традиционных систем;
- *адаптивность*: мультикритериальная дельта-факторная система не зависит от колебаний внешних фоновых факторов, обеспечивая надежную работу в разнообразных условиях эксплуатации без необходимости ручной перенастройки.

Испытания подтвердили сокращение времени реагирования и повышение надежности работы мультикритериальной дельта-факторной системы по сравнению с традиционными пороговыми решениями.

Технические характеристики системы. Мультикритериальная дельта-факторная система «Гамма-01Ф» обеспечивает стабильную работу в следующих условиях эксплуатации, характерных для морской среды, согласно техническим условиям [10]:

Климатические условия:

- рабочая температура: от -50°C до $+70^{\circ}\text{C}$;
- относительная влажность: до 100% при температуре $+50^{\circ}\text{C}$;

- атмосферное давление: от 80 до 294 кПа.

Механические воздействия:

- синусоидальная вибрация: частота 1–200 Гц, ускорение до $19,6\text{ м/с}^2$ (2 g);
- многократные удары: ускорение до 15 g, длительность 5–15 мс;
- качка: амплитуда $\pm 45^{\circ}$, период 7–16 с.

Внешние воздействия:

- устойчивость к морскому (соляному) туману;
- устойчивость к агрессивным средам;
- коррозионная стойкость.

Подготовка к опытной эксплуатации. Мультикритериальная дельта-факторная система судовой пожарной сигнализации, предназначенная для установки на корабль пр. 20181, изготовлена и успешно прошла заводские приемо-сдаточные испытания. Подтверждено ее соответствие требованиям Российского морского регистра судоходства [6].

Для проведения опытной эксплуатации система оснащена дополнительными средствами, обеспечивающими детальную и непрерывную регистрацию эксплуатационных параметров в условиях реальной работы на корабле.

В соответствии с принятым совместным решением запланирована годовая опытная эксплуатация, направленная на получение объективных данных о работе системы в корабельной среде. Результаты эксплуатации станут основой для оценки надежности и эффективности комплекса, а также позволят принять обоснованное решение о целесообразности его широкого внедрения на флоте.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗНАЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ

Полученные результаты комплексных испытаний подтверждают высокую эффективность мультикритериальной дельта-факторной системы судовой пожарной сигнализации «Гамма-01Ф». Основными преимуществами данной системы являются:

1. Автоматическая адаптация к различным условиям эксплуатации без необходимости ручной настройки пороговых значений.
2. Высокая помехоустойчивость, обеспечиваемая мультикритериальным анализом динамических характеристик параметров.
3. Раннее обнаружение возгорания на стадии начального развития процесса горения.
4. Повышенная надежность обнаружения в сложных условиях морской эксплуатации.
5. Широкий диапазон рабочих ус-

ловий в соответствии с техническими условиями [10].

Выводы исследования создают прочную основу для дальнейшего совершенствования отечественных технологий в области пожарной безопасности морских судов [8].

Особое значение разработки системы «Гамма-01Ф» заключается в ее полном отечественном происхождении: проектирование, производство, испытания и внедрение осуществляются российскими предприятиями с опорой на национальные стандарты и технологии, а комплектующие для оборудования производятся в России. Это обеспечивает технологическую независимость от зарубежных поставок, снижает риски перебоев и санкционных ограничений, а также поддерживает государственную политику импортозамещения.

Таким образом, мультикритериальная дельта-факторная система судовой пожарной сигнализации «Гамма-01Ф» представляет собой качественный шаг вперед в повышении уровня пожарной безопасности морского флота и укрепления устойчивости отечественной судостроительной отрасли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексные испытания и апробация мультикритериальной дельта-факторной системы судовой пожарной сигнализации «Гамма-01Ф» подтвердили высокую эффективность предлагаемого подхода к своевременному обнаружению пожара на морских судах. Система продемонстрировала превосходство над традиционными пороговыми решениями по ключевым параметрам – достоверности обнаружения, раннему выявлению признаков пожара и отсутствию ложных срабатываний.

Полученные результаты обосновывают готовность «Гамма-01Ф» к опыт-

ной эксплуатации в составе корабельного оборудования морского флота. Предстоящая годовая опытная эксплуатация позволит собрать качественные и объемные данные о долговременной надежности и эффективности системы в реальных условиях работы, что станет основой для обоснованного решения о целесообразности ее масштабного внедрения.

Таким образом, сочетание лабораторных испытаний и полевой апробации формирует комплексный подход к повышению пожарной безопасности отечественных морских судов, способствуя надежному обеспечению защиты флота и устойчивому развитию национальных технологий в этой области.

В перспективе целесообразно:

- расширить опытную эксплуатацию системы на различные типы морских и прибрежных объектов, включая пассажирские и грузовые суда, а также портовые сооружения;
- выполнить экономическую оценку эффекта от снижения аварийных рисков и затрат на ложные срабатывания при эксплуатации в различных условиях;
- развить технологии искусственного интеллекта и машинного обучения для адаптации дельта-факторов к специфике конкретных объектов и историческим данным о пожарах.

Реализация этих задач повысит полноту и надежность оценки системы и расширит возможности ее практического применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морские вести России. Аварийность морского флота. – [Электронный ресурс]. URL: <https://morvesti.ru/themes/1693/111604/> (дата обращения: 06.08.2025).

2. Порошин А.А., Здор В.Л., Семененко Н.В., Волков И.В. Обстановка с пожарами и эффективность срабатывания систем пожарной сигнализации на объектах судоходства//Безопасность техногенных и природных систем. – 2019. – № 4. – С. 28–35.
3. Круглеевский В.Н., Образцов И.В., Пустынников С.С. Мультикритериальный подход к повышению быстродействия и достоверности обнаружения пожара на кораблях ВМФ. – Актуальные проблемы военной науки и политехнического образования ВМФ. – СПб., 2016, с. 44–48.
4. ГОСТ Р 53325–2012. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2014. – 194 с.
5. Подобед В.А., Панкратов А.А. Анализ пожаров на судах рыбопромыслового флота Северного бассейна//Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17. – № 4. – С. 728–732.
6. Правила классификации и постройки морских судов. – Т. 2. – СПб.: Российский морской регистр судоходства (РМРС), 2023. – 456 с.
7. Образцов И.В., Петров С.А., Пегушин С.В., Панин Р.В. Выбор системы поддержки принятия решений с использованием искусственного интеллекта при обеспечении пожарной безопасности кораблей ВМФ: монография. – СПб.: ВУНЦ ВМФ ВМА, 2025. – 141 с.
8. Протокол № 1 типовых испытаний аппаратуры КТС ОПА «Гамма-01Ф» в режиме мультикритериального обнаружения пожара. – М.: ООО «НПО ПАС», 2016.
9. Отчет по НИР «Триумф-25»: Поиск и исследование методов и технологий искусственного интеллекта для применения в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей/Военный институт дополнительного профессионального образования ВУНЦ ВМФ ВМА; руководители НИР Е.С. Пахомов, И.В. Образцов и др. – СПб., 2024. – 190 с.
10. ТУ4372–020–40168287–05 Комплекс технических средств охранно-пожарной автоматики «Гамма-01Ф». – М.: ООО «НПО ПАС», 2024. – 91 с. ■

Системы информационной поддержки (СИП) принятия решений по борьбе за живучесть (БЗЖ) кораблей получили свое развитие после ряда аварийных ситуаций, которые были связаны с пожарами и поступлениями воды в корпус корабля. СИП БЗЖ включена в состав центральной координирующей системы управления (ЦКСУ), которая является составной частью комплексной системы управления (КСУ) техническими средствами (ТС) и предназначена для принятия решений в ходе выполнения служебных обязанностей командиром электромеханической боевой части (ЭМБЧ), вахтенным механиком, дежурным по ЭМБЧ. При этом на СИП БЗЖ возлагаются задачи выдачи рекомендаций по переключениям ТС, которые по принадлежности являются функциональными обязанностями операторов СУ главной энергетической установки (ГЭУ), электроэнергетической системы (ЭЭС) и общекорабельными системами (ОКС).

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ

В соответствии с корабельным уставом ВМФ организация работы экипажа корабля строится в соответствии с его боевым назначением [1, ст. 8]. Личный состав боевых постов (БП) и командных пунктов (КП) решает стоящие перед кораблем задачи. На командира ЭМБЧ возлагаются обязанности координации управления ТС ГЭУ, ЭЭС и ОКС в повседневных условиях, боевых режимах и аварийных ситуациях. Типовые задачи управления ТС и их решения представлены в руководящих документах и, как правило, не отражают разнообразие ситуаций управления при меняющихся заданиях на управление ТС и текущих состояниях ТС ГЭУ, ЭЭС и ОКС.

Структурная схема организации управления в ЭМБЧ схематично представлена на рис. 1. Необходимость управления связана с задачами, которые решает корабль, состоянием ТС и внешними воздействиями. Задачи управления ТС решают операторы СУ ГЭУ, ЭЭС и ОКС в объеме дистанционного автоматизированного управления (ДАУ). Состав управляемых ТС уточняется в технических заданиях (ТЗ) при формировании объема ДАУ. Качество управления зависит от квалификации и практических навыков операторов.

Под живучестью корабля понимается способность противостоять боевым и аварийным повреждениям, восстанавливать и поддерживать при этом в возможной степени свою боеспособность [1, ст. 312]. Личный состав ведет БЗЖ на БП и КП, а в помеще-

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО БОРЬБЕ ЗА ЖИВУЧЕСТЬ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

Б.В. Грек, д-р техн. наук, вед. специалист,
А.В. Корчаков, канд. техн. наук,
гл. конструктор комплексной системы управления,
АО «Концерн «НПО «Аврора»,
контакт. тел. (812) 702 5971

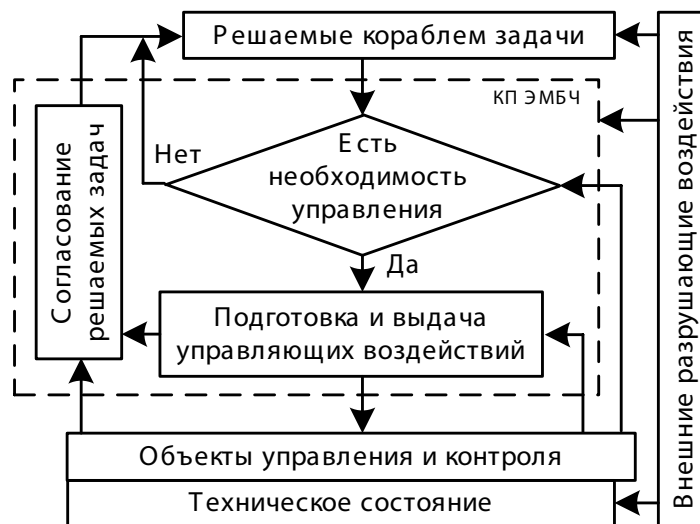


Рис. 1. Структурная схема организации управления

ниях, не занятых КП и БП, БЗЖ осуществляют аварийные партии (группы), которые возглавляют командиры аварийных партий (АП). В состав АП назначаются электрики, трюмные и личный состав других специальностей, так как в помещениях, не занятых КП и БП, размещаются средства управления электрооборудованием, насосами, вентиляторами и другими ТС. При БЗЖ разнообразие ситуаций управления ТС возрастает из-за поражающих факторов разрушающих воздействий. Командир ЭМБЧ непосредственно руководит действиями всего личного состава корабля по борьбе за непотопляемость, с пожарами и опасными концентрациями газов, а при необходимости временно понизить тактико-технические характеристики корабля докладывает свои предложения командиру корабля [1, ст. 318]. Это взаимодействие на рис. 1 обозначено как согласование решаемых задач.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТС

Пример структуры КСУ ТС в обеспечение управления ТС ЭМБЧ показан на рис. 2, в которой представлены СУ ТС ГЭУ, ЭЭС, ОКС, система управления движением (СУД) и ЦКСУ.

Управление ГЭУ, ЭЭС, ОКС и техническими средствами движения (ТСД) выполняется операторами с пультов управления (ПУ) и прибора управления СУ ОКС, в которых размещена аппаратура с алгоритмами управления функциональными ТС. Координированное управление ТС производится с ПУ ЦКСУ по сети Ethernet через два прибора ПЦЕ, обеспечивающих обмен данными ЦКСУ с операторами СУ функциональных ТС.

В состав ЦКСУ включена СИП БЗЖ, основными задачами которой являются:

- сбор информации о состоянии непотопляемости, пожаробезопасности и загазованности помещений корабля от системы пожарной автоматики, специализированных ТС, датчиков, сигнализаторов и других средств контроля;
- формирование рекомендаций по борьбе с разрушающими факторами внешних воздействий, к которым относятся появление дыма, пламени и поступление воды в корпус корабля, и предотвращение их распространения.

Для борьбы с разрушающими воздействиями и предотвращения их распространения в составе СИП БЗЖ все более детализируются задачи управ-

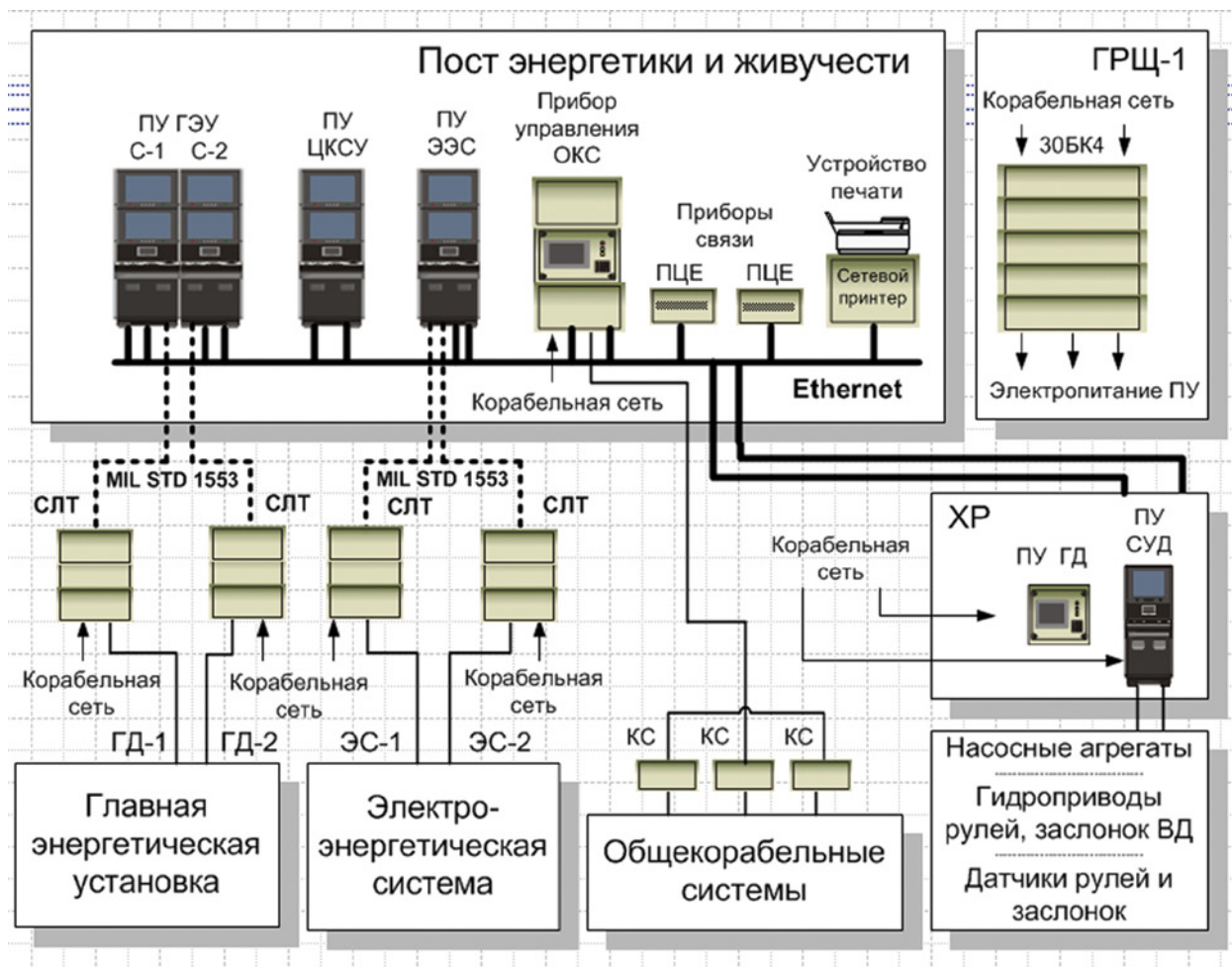


Рис. 2. Структурная схема КСУ ТС

ления ТС, которые увеличивают объем информации в ЦКСУ и зависят от достоверности исходных данных о техническом состоянии и состоянии функционирования ТС, в том числе ТС ручного управления. Этой информацией для оперативного управления владеют операторы СУ функциональных ТС. Самостоятельная работа оператора ЦКСУ по сбору, актуализации этих данных и принятия решений по работе ТС являются чрезвычайно трудоемкими. Количество видеок кадров (ВК) в ЦКСУ значительно превышает количество ВК любой функциональной СУ, что создает высокую информационную нагрузку на оператора ЦКСУ.

При комплексном воздействии разрушающих воздействий управляющие действия требуют согласования. Например, подача воды для тушения пожара и работа средств по откачке воды в обеспечение непотопляемости; обесточивание участков силовых сетей и подача питания на пожарные, водоотливные насосы и т. п. Задачи согласования использования средств БЗЖ при разрушающих воздействиях и значениях их уровней являются зоной ответственности СИП БЗЖ в ЦКСУ.

На рис. 3 представлена структура координированного управления ТС и согласования использования средств БЗЖ, в которой ТС, в том числе ручного управления, образуют пересекающееся множество, управление которыми должны осуществлять операторы функциональных систем.

Многообразие ситуаций управления в представленной структуре обеспечивается действиями операторов СУ ГЭУ, ЭЭС и ОКС, которые в повседневной деятельности контролируют состояние ТС, в том числе ручного управления, и управляют ТС по командам командира ЭМБЧ, вахтенного механика или дежурного по ЭМБЧ.

Динамика изменения состояния функционирования ТС, в том числе при БЗЖ, представляется уравнениями состояния и выхода конечного автомата (КА) в форме Мили [3].

Уравнения состояния ТС в форме КА определены на переходе с момента времени t в момент времени $t+1$:

$$S(t+1) = [AS(t) \oplus BU(t)] \bullet CZ(t), \quad (1)$$

где $S(t)$, $U(t)$, $Z(t)$ – двоичные векторы состояния функционирования $S(t)$, управления $U(t)$ и исправности $Z(t)$ технических средств в дискретный момент времени t ; A , B , C – двоичные

диагональные матрицы коэффициентов, $n \times n$, n – размерность векторов $S(t)$, $U(t)$, $Z(t)$; « $\oplus$ » – операция сложения по модулю 2; « $\bullet$ » – операция двоичного умножения.

Уравнения выхода ТС в форме КА определены на каждом состоянии и для класса двоичных дизъюнктивных систем представляются в виде

$$Y(t) = \Phi(X(t)) \bullet S(t), \quad (2)$$

где $X(t)$ и $Y(t)$ – двоичные вектора входа и выхода ТС соответственно; $\Phi(X(t))$ – булева функция, которая определяется на множестве значений $X(t)$.

В общем случае размерности $S(t)$, $Z(t)$ и $U(t)$ могут различаться.

Уравнения (1) и (2) позволяют контролировать и прогнозировать состояние $S(t)$ функционирования ТС при изменении технического состояния $Z(t)$ и применении управляющих воздействий $U(t)$.

Таким образом, для выполнения личным составом ЭМБЧ функциональных обязанностей в повседневных условиях, боевых режимах и аварийных ситуациях, в том числе при БЗЖ, средства управления КСУ ТС должны обеспечивать актуализацию данных о состоянии ТС, в том числе ручного управления, и совмещение

Для проектирования и эксплуатации корабельной радиоприемной аппаратуры одни из определяющих являются вопросы, связанные с измерением воздействующих на них радиоэлектронных помех [1–3]. На практике для оценки их интенсивности широкое применение нашли измерители радиопомех (ИРП) с квазипиковым вольтметром. Проведенные исследования показывают, что результат измерения широкополосных помех в этом случае получается в значениях «эквивалентного синусоидального напряжения» (ЭСН), которое зависит не только от мощности помехи, но и от рабочей полосы ИРП и постоянных времени вольтметра. Причем в смежных диапазонах результаты измерений могут отличаться на порядок, что представляется их существенным недостатком.

Рассмотрим и проанализируем измерение спектральной плотности широкополосных радиопомех.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОПОМЕХ

На рис. 1, отображающем реакцию ИРП на импульсы в диапазоне настройки 0,15–30 МГц, представлены графики

$$A = U(F) / \Phi_n,$$

где $U(F)$ – отсчет по ИРП в среднеквадратических значениях замещающего синусоидального напряжения; F – частота повторения импульсов; Φ_n – спектральная плотность напряжения (СПН) испытательных импульсов, описываемых функцией $f(t)$:

$$\Phi_n = 2 \left| \int f(t) \exp\{-i\omega t\} dt \right|.$$

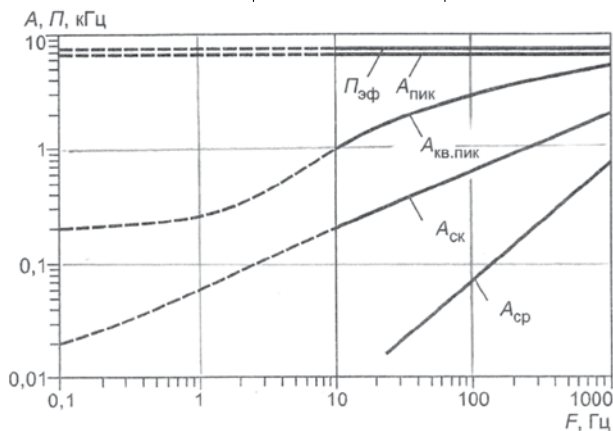


Рис. 1. Амплитудные соотношения для различных видов детекторов ИРП в диапазоне настройки частот 0,15–30 МГц

$\Pi_{эф}$ – эффективная полоса пропускания; $A_{пик}$, $A_{кв.пик}$, $A_{ск}$, $A_{сп}$ – пиковые, квазипиковые, среднеквадратические и средние амплитудные соотношения

Анализ представленных на рис. 1 зависимостей показывает, что результаты показаний вольтметра с пиковым детектором в широком диапазоне частот не зависят от частоты повторения импульсов. Таким образом, СПН можно рассчитывать по формуле

$$\Phi_n = U_{пик} / A_{пик} \text{ или } \Phi_n = \sqrt{2} U_{пик} / \Pi_{имп}, \quad (1)$$

где $U_{пик}$ – отсчет по пиковой шкале ИРП в среднеквадратических значениях, В; $\Pi_{имп} = \sqrt{2} A_{пик}$ – импульсная полоса, Гц.

СПН может характеризовать интенсивность помехи для «рецепторов», чувствительных к максимальным напряжениям, например, для цифровых технических средств на выходе избирательного усилителя приемника.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОПОМЕХ КОРАБЕЛЬНОЙ РАДИОПРИЕМНОЙ АППАРАТУРОЙ

Е.К. Самаров, д-р техн. наук, декан факультета естественных наук,
Я.Ю. Ионченкова, ст. преподаватель кафедры математики, СПбГМТУ,
контакт. тел. +7 (812) 757 0977, omega511@mail.ru,
ionchenkova_yana@mail.ru

На рис. 1 характеристики среднеквадратического и квазипикового вольтметров в значительной части параллельны, что подтверждает справедливость приводимого в литературе замечания о том, что процесс заряд–разряд в квазипиковом вольтметре имеет энергетический характер.

В диапазонах настройки ИРП 0,01–0,15 и 30–1000 МГц наблюдается аналогичная закономерность (рис. 2, а, б).

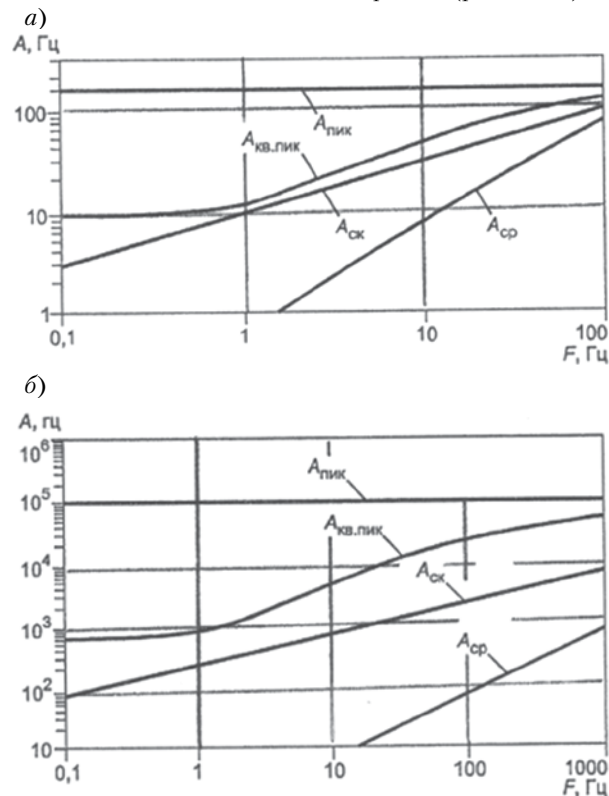


Рис. 2. Амплитудные соотношения для различных видов детекторов ИРП и диапазонов частот настройки: а – 0,01–0,15 МГц; б – 30–1000 МГц

Анализ представленных на рис. 2 зависимостей $A_{кв.пик}$ и $A_{ск}$ показывает, что можно сделать замену измерения квазипикового значения на среднеквадратическое, т. е. на измерение мощности помехи в полосе частот ИРП. При этом возможен переход на измерение спектральной плотности мощности (СПМ) делением на эффективную полосу пропускания на выходе усилителя промежуточной частоты (УПЧ) ИРП:

$$\Pi_{эф} = \int_{f_1}^{f_2} \frac{K^2(f)}{K_0^2} df,$$

где K_0 , $K(f)$ – коэффициенты передачи полосового усилителя в полосе пропускания.

СПМ последовательности импульсов или шума («гладких помех»)

$$\Phi_m = \frac{P_{сп}}{\Pi_{эф}} = \frac{U_{ск}^2}{\Pi_{эф}}, \quad (2)$$

Таблица

Номинальные значения коэффициентов перевода

Диапазон частот, МГц	A, дЛкГц	R (дЛОм)+П _{эф} (дЛкГц)
0,01–0,15	–7,82	17 – 7,82 = 9,18
0,15–30	8,27	17 + 8,27 = 25,72
30–1000	19,52	17 + 20 = 37

где P_{cp} – средняя мощность в эффективной полосе пропускания, Вт; $U_{ск}$ – отсчет по шкале среднеквадратического значения; R – сопротивление, на котором выделяется мощность, Ом.

В перспективе переход на измерение СПН и СПМ как основных характеристик широкополосных помех представляется желательным, так как эти величины соответствуют избирательным свойствам радиоприема. Поэтому во вновь разрабатываемых ИРП следует, например, для среднеквадратической шкалы расширить вниз по отношению к $F=10$ Гц диапазон частот повторения, который ограничивается запасом линейности УПЧ. Этого ограничения можно избежать вариацией усиления не только на промежуточной, но и низкой частоте, причем на низких частотах повторения сигнал становится слабым.

Диапазон частот повторения можно также расширить путем вычисления $U_{ск}$ по гистограмме на выходе УПЧ.

В [4, 5] предложено измерять спектральную плотность широкополосных радиопомех в числах, при этом основная калибровка ИРП проводится в децибелах по отношению к 1 мкВ, т. е. в логарифмических единицах, удобных для оценки относительных величин.

Представляя СПМ (2) в децибелах (дЛ) [6], получаем

$$10 \lg \frac{P}{P_{эф}} = 2 \times 10 \lg U_{ск} - 10 \lg R - 10 \lg \Pi_{эф} \quad (3)$$

или

$$\bar{\Phi}_m \left[\text{дЛ} \frac{\text{пВт}}{\text{кГц}} \right] = 2 \bar{U}_{ск} [\text{дЛмкВ}] - \bar{R} [\text{дЛОм}] - \bar{\Pi}_{эф} [\text{дЛкГц}].$$

Величины, выраженные в децибелах, – это $1/10$ логарифма отношения данной величины к опорной. Полоса в киллогерцах взята по [6] во избежание слишком больших значений для $\bar{\Phi}_m$.

С учетом того, что

$$2 \bar{U}_{ск} [\text{дЛмкВ}] = \bar{U}_{ск} [\text{дБмкВ}]; R = 50 \text{ Ом};$$

$$\Pi_{эф} = 7,45 \text{ кГц (номинальное значение)}$$

и что

$$10 \lg R = 17 [\text{дЛОм}], 10 \lg \Pi_{эф} = 8,72 [\text{дЛкГц}],$$

получаем

$$\bar{\Phi}_m \left[\text{дЛ} \frac{\text{пВт}}{\text{кГц}} \right] = \bar{U}_{ск} [\text{дБмкВ}] - 25,72. \quad (4)$$

Удвоение логарифма в первом члене выражения (3) соответствует возведению напряжения в квадрат, что оправданно только для ваттметра среднеквадратического значения, но не для квазишпикового, как это иногда практикуется.

Для СПН импульсов (1) с учетом того, что $A_{пик} = 6,72 \text{ кГц}$ и не зависит от частоты повторения, имеем

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_m \left[\text{дЛ} \frac{\text{мкВ}}{\text{кГц}} \right] &= \frac{1}{2} \bar{U}_{пик} [\text{дБмкВ}] - 10 \lg A_{пик} = \\ &= \frac{1}{2} \bar{U}_{пик} [\text{дБмкВ}] - A_{пик} [\text{дЛкГц}]; \end{aligned}$$

$$\bar{\Phi}_m \left[\text{дЛ} \frac{\text{мкВ}}{\text{кГц}} \right] = \frac{1}{2} \bar{U}_{пик} [\text{дБмкВ}] - 8,27.$$

Таким образом, в диапазоне частот настройки 0,15–30 МГц спектральная плотность широкополосных радио-

помех можно рассчитать с использованием существующей градуировки ИРП по (4) и (5). Аналогичные вычисления можно выполнить для диапазонов частот настройки 0,01–0,15 и 30–1000 МГц.

Номинальные значения коэффициентов перевода отсчетов по ИРП для формул (4), (5) приведены в таблице.

Для отдельных ИРП можно использовать уточненные в пределах допусков индивидуальные коэффициенты.

В современных измерительных приемниках и анализаторах, применяемых для измерения эквивалентного напряжения радиопомех, стремление избавиться от влияния полосы пропускания приводит к необходимости оценки СПН импульсов [6–8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с измерением спектральной плотности широкополосных радиопомех корабельной радиоприемной аппаратурой. Показано, что основными характеристиками широкополосных радиопомех могут быть спектральная плотность напряжения для импульсных помех и спектральная плотность мощности как для импульсных, так и для «гладких» помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин В.С., Моисеев Н.И. Перспективные корабельные системы прямой радиосвязи. – СПб.: Элмор, 2004. – 224 с.
2. Судовая радиоэлектроника и радионавигационные приборы/ Байрашевский А.М., Жерлаков А.В., Ильин А.А., Ничипоренко Н.Т., Сапегин В.Б. – М.: Транспорт, 1988. – 271 с.
3. Дуров А.А., Кан В.С., Ничипоренко Н.Т., Устинов Ю.М. Судовые радиолокационные системы и САРП: Учеб. для вузов. – П. Камчатский: КамчатГТУ, 2005. – 280 с.
4. ГОСТ 30805.16.2.1–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. – М.: Стандартинформ, 2020.
5. CISPR 16-2-1:2005, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 2-1: Methods of measurement of disturbances and immunity – Conducted disturbance measurements, MOD. Publ. 16-2-1. – 2005.
6. Переверзев Л.А. Измерение спектральной плотности импульсов. – М.: Изд-во стандартов, 1982.
7. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Нелинейное оценивание параметров сигнала при воздействии узкополосных негауссовских помех // Автоматрия. – 2019. – Т. 55. – № 1. – С. 80–88.
8. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка погрешности измерения векторного информационного параметра сигнала на фоне мультипликативных помех // Радиотехника. – 2016. – № 2. – С. 72–82. ■

За три с половиной десятилетия, прошедшие после исчезновения СССР с политической карты мира, издано немало количество разного рода книг, посвященных ракетно-ядерному океанскому флоту Советского Союза. Их авторами по большей части выступали военные моряки, достигшие высоких должностей и званий, политработники в адмиралских чинах, но крайне редко – инженеры-кораблестроители, флотские и гражданские. Оно и понятно – с вершин власти легче обозреть и оценить величие достижений, с такой точки обзора обычно теряются «имевшиеся кое-где отдельные» просчеты и недостатки.

В изданной в 1995 г. книге вице-адмирала-инженера В. Н. Бурова [1], помимо главных конструкторов проектных организаций промышленности, впервые были названы некоторые фамилии офицеров-кораблестроителей, которых с полным правом следует причислить к создателям океанского ракетно-ядерного флота. Только спустя десятилетие, в 2006 г., в юбилейном издании Северного ПКБ [2] упомянули офицеров и гражданских сотрудников военных представительств, осуществлявших техническое наблюдение за проектированием и постройкой боевых кораблей и приемку «продукции» бюро и заводов-строителей.

Одним из замечательных специалистов, отдавшим более пятидесяти лет своей жизни службе и работе в Контрольно-приемном аппарате Главного управления кораблестроения (КПА ГУК) ВМФ СССР, был капитан 1 ранга-инженер Александр Фёдорович Никольский.

Киевский юноша, окончивший в 1949 г. среднюю школу с золотой медалью, самостоятельно выбрал профессию военного корабеля и был без экзаменов зачислен на кораблестроительный факультет Ленинградского высшего военно-морского инженерного ордена Ленина училища им. Ф. Э. Дзержинского.

В октябре 1955 г. в Севастопольской бухте после подрыва на донной mine погиб с большим количеством человеческих жертв линейный корабль «Новороссийск». Эта трагедия заставила командование ВМФ принять срочные меры по усилению контроля за проектированием, строительством и ремонтом боевых кораблей. Одной из этих мер стало направление выпускников кораблестроительного факультета на первичные должности военных представителей на судостроительные заводы, впервые подключенные к выполнению заказов ВМФ.

Инженер-лейтенант А. Ф. Никольский начал службу младшим воен-

ПАМЯТИ ВОЕННОГО ИНЖЕНЕРА-КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЯ А.Ф. НИКОЛЬСКОГО

А. В. Архипов, д-р техн. наук, проф.,

ген. конструктор кораблей дальней морской зоны и их вооружения,

О. Л. Гилярович, капитан 2 ранга в отставке,

ветеран Вооружённых сил РФ,

Д. Ю. Силантьев, капитан 2 ранга запаса,

С. И. Овсянников, заслуженный конструктор РФ,

АО «Северное ПКБ»,

контакт. тел. (812) 702 3005

ным представителем КПА ГУК ВМФ на Сретенском судостроительном заводе в поселке Кокуй Читинской области. В течение трех лет, пока завод по заказу ВМФ строил серию малых танкодесантных кораблей пр. 450, он принимал всю продукцию завода по кораблестроительной части (корпус, общекорабельные системы и устройства), участвовал в работе государственных комиссий по испытаниям и приемке кораблей в состав ВМФ.

С 1958 г. инженер-старший лейтенант А. Ф. Никольский продолжил службу на Выборгском судостроительном заводе, осуществляя приемку по кораблестроительной части строившихся заводом средних танкодесантных кораблей пр. 188, морских танкеров проектов 577 и 1541, самоходных барж пр. 431 различных назначений и модификаций.

В опубликованных в 2002 г. «Воспоминаниях военпреда» [3] Александр Фёдорович писал: «Знаю, что есть сторонники обязательной корабельной службы для обретения корабельным флотского опыта. Думаю, что их позиция спорная: за два-три года интенсивной военпредовской работы корабел

получает наряду с чисто профессиональным инженерным опытом и этот самый флотский, поскольку за этот период успеваешь, участвуя в заводских, государственных испытаниях не одного корабля, изучить корабельную организацию и обязанности плавсостава. Конечно, я имею в виду условия 1950–1960-х гг., когда кораблей строилось много и разных, а работы у флотских военпредов было предостаточно. Мне не приходилось ощущать своей стесняющей ущербности из-за отсутствия стажа службы на корабле».

С июля 1963 г. он – старший военный представитель 95 ВП МО СССР в Гданьске Польской Народной Республики. Инженер-капитан 3 ранга А. Ф. Никольский вел наблюдение в проектно-конструкторском бюро за проектированием кораблей и судов, которые создавались польскими корабелями по советским тактико-техническим заданиям, на всех этапах разработки конструкторской документации. На Северной и Речной верфях Гданьска осуществлял приемку танкодесантных кораблей пр. 770, гидрографических судов пр. 860, катеров пр. 722, участвовал в комиссиях по их испыта-



Офицеры отделения КПА ГУК ВМФ в Сретенске, октябрь 1956 г. Слева направо: инженер-лейтенант А. Ф. Никольский, капитан технической службы В. Г. Гуцин, старший техник-лейтенант В. И. Соболев, начальник отделения инженер-капитан 1 ранга Э. М. Ровенский, майор технической службы А. В. Игнатьев

ниям и приемке в состав ВМФ СССР. Согласовывал конструкторскую документацию танкодесантных кораблей (проектов 770МА и 771), проектировавшихся в гданьском ЦБКО-2, плавмастерской (пр. 301) и гидрографическом судна (пр. 861).

С начала 1967 г. инженер-капитан 2 ранга А. Ф. Никольский продолжил службу в должности заместителя старшего военпреда 699 ВП МО. Аккредитованное при ЦКБ-53 (Северном ПКБ), оно организационно подчинялось 320 Военному представительству на ленинградском судостроительном заводе им. А. А. Жданова.

Александр Фёдорович осуществлял приемки продукции по кораблестроительной части на строившихся больших противолодочных кораблях проектов 1134 и 1134А, был ведущим военпредом, членом и секретарем государственной комиссии по испытаниям и приемке серийного БПК «Владивосток» (ответственный сдатчик – А. Буланов, главный строитель кораблей пр. 1134 – Г. В. Филатов, командир корабля – капитан 2 ранга А. П. Мамончиков). Одновременно с этим он вел наблюдение за проектированием в Северном ПКБ и согласовывал конструкторскую документацию новых проектов кораблей.

В феврале 1971 г. решением Главкомандующего ВМФ Адмирала флота Советского Союза С. Г. Горшкова А. Ф. Никольский был назначен главным наблюдающим по пр. 1134Б, сменив М. А. Котлера. Подъем флага на головном БПК «Николаев» (зав. № 2001) состоялся в октябре того же года. В 1975 г. за личный вклад в создание кораблей пр. 1134Б А. Ф. Никольский был награжден медалью «За боевые заслуги».

Когда к 1974 г. наконец сформировалась группа наблюдения от ВМФ за разработкой всей технической документации по пр. 956, ее руководителем – главным наблюдающим – назначили А. Ф. Никольского (наблюдение от ВМФ за реализацией проекта на заводе-строителе возложили на инженера-капитана 3 ранга В. В. Канашина).

Работавшие с Александром Фёдоровичем проектанты и заводчане практически единодушно отмечали его высочайший профессионализм, интеллигентность, а главное – уважительное и вдумчивое отношение и к рядовым специалистам предприятий промышленности, и к руководителям, независимо от «высоты» их должностей.

А сам Александр Фёдорович написал о «товарищах по цеху» так: «Если вспоминать о людях, с которыми за долгие годы работы и службы



**Инженер-капитан 3 ранга
А. Ф. Никольский**

пришлось взаимодействовать, то следует назвать многих и многих: от мастеров производственных цехов и ОТК на судостроительных заводах до главных конструкторов проектов кораблей и директоров заводов. Среди них, стоявших на различных ярусах служебной пирамиды нашего ВПК – колоритнейшие персоны, одарённые личности, инженеры от Бога, безгранично преданные кораблестроению, лишившие себя на долгие месяцы нормальной семейной жизни ради испытаний кораблей. И, конечно, сослуживцы-военпреды, всегда готовые разобраться в любом техническом вопросе, умевшие «отделять мух от котлет» – определять главное в ситуации, быть требовательным и неподкупным, не пасовать перед авторитетами промышленности, устоять под их зачашую весьма жестким нажимом («Вам не нужны корабли!»).

Известный анекдотичный вывод из аттестации офицера: «Технику не любит и не знает, с людьми работать не умеет – рекомендуется назначить военпредом» – не про нас, а про начальников, представления не имеющих о содержании работы военпредов. Без интереса к технике, особенно к новой, без интеллигентного общения с людьми (не используя «командирский лексикон») не может быть настоящего военпреда.

Военпред работает в проектно-конструкторском бюро на виду у сотен людей, хотя непосредственно контактирует с определённым, ограниченным кругом специалистов, предъявляющих ему на согласование конструкторскую документацию. Но эти контакты –

под контролем сотен пар глаз и ушей, присутствующих вокруг. Поэтому мы не можем позволить себе раздражаться, повышать голос на оппонента, допускать проявлений высокомерия или чванства и т. п. – многое нельзя. Невозмутимость, корректность, воспитанность, общая культура должны быть присущи военпреду во всех служебных перипетиях».

С февраля 1975 г. до увольнения в запас (август 1988 г.) Александр Фёдорович, которому в 1976 г. было присвоено воинское звание инженер-капитан 1 ранга, возглавлял 699 ВП МО СССР.

Именно в этот период шла напряженная работа по проектированию надводных боевых кораблей третьего поколения, т. е. значительной части океанского ракетно-ядерного флота Советского Союза. В своих воспоминаниях А. Ф. Никольский, отличавшийся поразительной скромностью в оценке собственного участия в процессе строительстве ВМФ, отмечал: «Особо важная роль принадлежала главным наблюдающим 1-го Института (ныне – НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА»), проводившим много времени среди военпредов. Они с уважением и доверием относились к нашему опыту наблюдения по предыдущим рабочим проектам. Добрыми словами мы вспоминаем И. М. Стецюру, О. Т. Сафронова, А. А. Савина, Е. И. Сошникову, А. Н. Блинова, А. М. Смирнову, умевших выслушивать военпредов и находить согласованные решения».

Выполняя должностные обязанности начальника военного представительства, А. Ф. Никольский одновременно являлся главным наблюдающим за разработкой РКД по проектам 956 и 1155, участвовал в заводских ходовых и государственных испытаниях головных кораблей – эскадренного миноносца «Современный» (зав. № 861) и большого противолодочного корабля «Удалой» (зав. № 111). Специалисты отдела проектирования кораблей и судов Северного ПКБ отмечали особое внимание, которое Александр Фёдорович уделял вопросам рациональности и функциональности архитектурно-компоновочных решений корабля пр. 956, внешний облик которого формировался с соблюдением норм технической эстетики и «фирменного» художественного стиля бюро.

За участие в создании кораблей пр. 956 вместе с группой специалистов ВМФ и промышленности А. Ф. Никольский в 1988 г. был удостоен звания лауреата Государственной премии СССР.

Несмотря на служебную занятость, Александр Фёдорович регулярно участвовал в работе государственных экзаменационных комиссий по дипломному проектированию курсантов – выпускников кораблестроительного факультета ВВМИОЛУ им. Ф. Э. Дзержинского, был руководителем и рецензентом дипломных проектов, членом государственной экзаменационной комиссии в Военно-морской академии им. А. А. Гречко.

Осенью 1988 г. Александр Фёдорович был уволен из ВМФ в запас, а затем вышел в отставку по возрасту и болезни, но продолжил работать ведущим специалистом в 699 ВП МО,

участвовал в рассмотрении и согласовании РКД, в наблюдении за разработкой Северным ПКБ эскизных и технических проектов кораблей для ВМФ СССР и иностранных заказчиков.

Одной из необычных его работ стало составление экспертного заключения на техническую проработку пассажирского судна в корпусе кораблей пр. 956 (зав. № 879 и № 880). Проработка варианта «конверсии» эсминцев выполнялась по инициативе завода-строителя. Александр Фёдорович обосновал экономическую нецелесообразность предложения, обусловленную существенными различиями

в требованиях к мореходным и эксплуатационным качествам, автономности и обитаемости боевого корабля и пассажирского судна.

В 1991 г. по требованиям завода-строителя в Северном ПКБ были созданы и отработаны программы по формированию электронного массива, который обеспечивал быструю обработку проектной документации. Александр Фёдорович благодаря опыту и профессионализму быстро освоил все инновации.

В ноябре 1992 г. был подписан Указ Президента РФ о продаже двух эсминцев пр. 956 Китайской Народной Республике. На кораблях сохранялось основное оборудование, часть которого необходимо было доработать до экспортной комплектации в южных широтах. Предстояло переработать и всю эксплуатационную документацию (ЭД), которая поставлялась в КНР на русском языке. Непростая задача контроля и согласования разрабатываемой бюро ЭД на соответствие требованиям руководящих документов к продукции, поставляемой на экспорт, решалась специалистами военной приемки. «Китайские контракты» вернули веру в российскую судостроительную промышленность, которая после шестилетнего «анабиоза» постепенно начала восстанавливаться. И в этом есть немалая заслуга А. Ф. Никольского.

Подводя итоги своей службы и профессиональной деятельности, Александр Фёдорович в одной из своих интереснейших публикаций лишь упомянул, что «приложил руку к проектированию, согласованию конструкторской документации и отработке двадцати пяти проектов и около 120 единиц кораблей и судов». А в статьях, выход в свет которых был приурочен к юбилейной дате военного представительства, он рассказывал не о своих заслугах, а отдавал дань уважения учителям и товарищам – сослуживцам и коллегам, писал о неформальном «кодексе поведения военпреда».

А. Ф. Никольский ушел из жизни 2 августа 2025 г., похоронен на Южном кладбище Санкт-Петербурга.



Осмотр Главкомандующим ВМФ Адмиралом флота Советского Союза С. Г. Горшковым судна «Александр Осипов» пр. 1607. Справа – капитан 1 ранга-инженер А. Ф. Никольский. Завод им. А. А. Жданова, август 1979 г.



Состав 699 ВП МО РФ, 2000-е гг. Сидят слева – А. Ф. Никольский и начальник ВП капитан 1 ранга Б. Н. Хрымов

ЛИТЕРАТУРА

1. Буров В. Н. Военно кораблестроение России в третьем столетии своей истории. – СПб.: Судостроение, 1998.
2. 60 лет вместе с флотом/Северное ПКБ. 1946–2006. – СПб., 2006.
3. Военно-технический альманах «Тайфун». – 2002. – № 2. ■

Выборгское морское сражение произошло 22 июня (здесь и далее все даты приводятся по старому стилю) 1790 г. во время русско-шведской войны 1788–1790 гг., которая возникла вследствие устремлений Швеции вернуть территории, утраченные в предыдущих войнах с Россией. Швецию поддерживали Англия, Пруссия, Голландия и другие европейские государства. Союзницей России была Дания.

Летом 1788 г. Швеция спровоцировала пограничный инцидент, предъявила России заведомо неприемлемые требования, а затем объявила ей войну. 21 июня 1788 г. шведская армия, возглавляемая королем Густавом III, вторглась в русскую часть Финляндии и осадила крепость Нейшлот (ныне – Савонлинна). Внезапное нападение шведов, несмотря на их численное превосходство, не принесло им успеха.

На море в Гогландском сражении 6 июля 1788 г. шведский флот потерпел поражение и отступил в Свеаборг (ныне – Суоменлинна), где был блокирован.

Попытка шведов овладеть Фридрихсгамом (ныне – Хамина) путем высадки десанта с моря окончилась неудачей. 10 августа им пришлось снять двухмесячную осаду Нейшлота. Осенью того же года шведская армия отступила на свою территорию.

В 1789 г. российские войска на суше крупных боевых операций не проводили, ограничившись лишь занятием нескольких городов в Южной Финляндии. В основном шла «малая война», в ходе которой шведы понесли значительные потери, что оказало на них сильное деморализующее воздействие.



Портрет адмирала В.Я. Чичагова. Неизвестный художник (не ранее 1990 г.)

15 июля 1789 г. российский флот под командованием адмирала В.Я. Чичагова одержал победу в Эландском морском сражении. 13 августа в Фин-

К 235-ЛЕТИЮ ВЫБОРГСКОГО МОРСКОГО СРАЖЕНИЯ

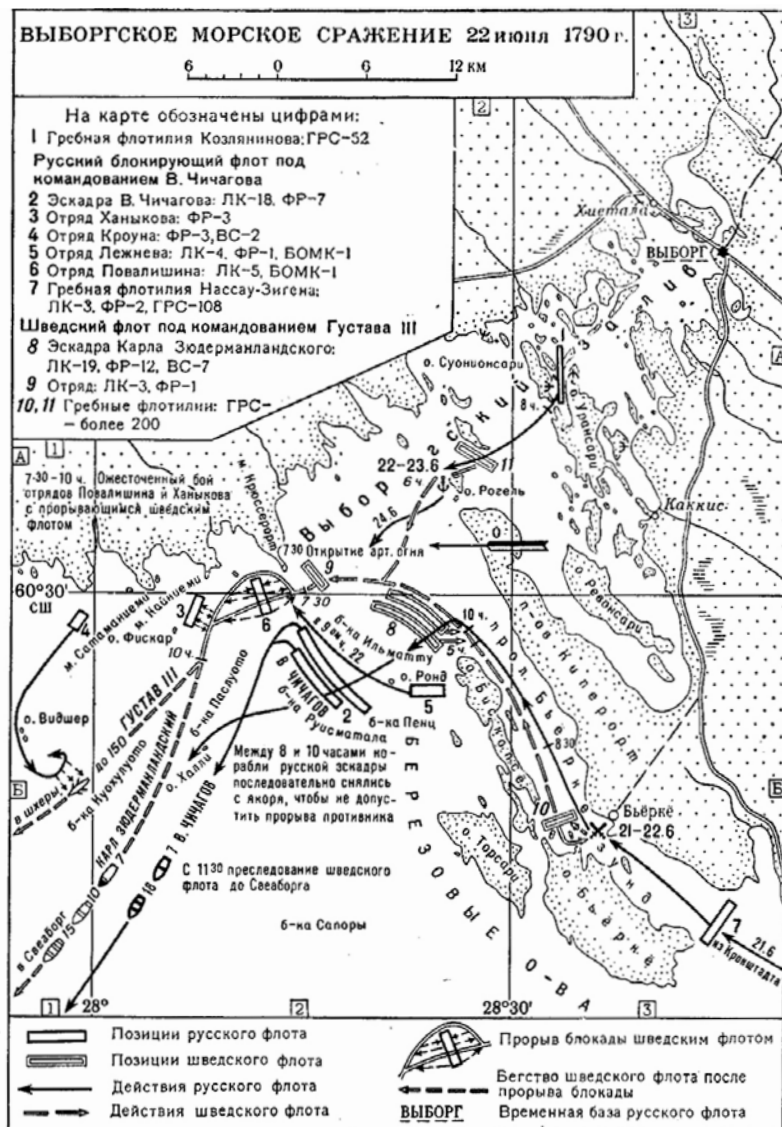
О.А. Яковлев, канд. истор. наук, доцент, зам. декана факультета социальных технологий и экономики данных СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
В.Н. Торба, капитан 1 ранга, историограф Санкт-Петербургского Морского собрания, контакт. тел. (812) 305 1276, (812) 312 7092, yakovlev.oa@sut.ru, morskoe-sobranie@yandex.ru

ском заливе гребной флот вице-адмирала К.Ф. Нассау-Зигена в Роченсальмском сражении нанес поражение шведскому гребному флоту, который прикрывал приморский фланг своей сухопутной армии. 21 августа российская гребная флотилия, подавив артиллерийским огнем береговые батареи противника, высадил десант в тылу шведской армии и вынудила ее отступить к Гельсингфорсу (ныне – Хельсинки).

В 1790 г. российскую армию в Финляндии возглавил новый главнокомандующий – генерал-аншеф И.П. Салты-

ков. Вся кампания этого года на суше прошла в небольших столкновениях местного значения.

Решающие события произошли на море. 2 мая шведский флот под командованием герцога Карла Сёдерманландского (в некоторых источниках – Зюдерманландского) (20 линейных кораблей, 6 фрегатов и 6 других кораблей) атаковал на Ревельском рейде эскадру адмирала В.Я. Чичагова (10 линейных кораблей, 5 фрегатов и 14 других кораблей), но атака была отражена. 4 мая произошло морское сражение у Фридрихсгама между



Выборгское морское сражение, 22 июня 1790. Схема

русской (до 60 судов) и шведской (155 судов) гребными флотилиями. Русские потеряли 26 судов. Расстреляв все боеприпасы, они отошли под прикрытие своих береговых батарей. Потери противника также были значительны.

23–24 мая Кронштадтская эскадра вице-адмирала А. И. Круза (17 линейных кораблей, 4 фрегата и другие корабли) отбила нападение шведского флота (22 линейных корабля и 7 фрегатов) у Красной Горки. После подхода к ней на помощь ревельской эскадры В. Я. Чичагова шведский флот отступил и 26 мая укрылся в Выборгском заливе, где был блокирован с моря. В Выборг подошли русские сухопутные части под командованием графа И. П. Салтыкова. Так шведы оказались в ловушке.

К этому времени шведская эскадра под командованием герцога Карла Сёдерманландского насчитывала 21 линейный корабль, 8 фрегатов, 25 галер, 10 канонерских лодок и около 70 других мелких судов, вооруженных 4 тысячами орудий, 27 тысяч человек личного состава. Гребная флотилия с десантными войсками, возглавляемая Густавом III, находилась в глубине Выборгского залива.

На левом фланге русской диспозиции расположились отряды капитана 2 ранга Р. В. Кроуна, адмиралов П. И. Ханькова и И. А. Повалишина. В центре находились главные силы под флагом адмирала В. Я. Чичагова. Правый фланг прикрывал отряд генерал-майора П. И. Лежнева.

21 июня к Выборгскому заливу из Кронштадта подошла гребная флотилия вице-адмирала К. Ф. Нассау-Зигена, которая в тот же день атаковала гребные суда противника в Бьеркезунде и заставила их отступить.

Выборгское сражение началось ранним утром 22 июня. Густав III, учитывая благоприятный северо-восточный ветер, решил вырваться из ловушки. Гребная флотилия и корабельная эскадра шведов пришли в движение. Адмирал В. Я. Чичагов посчитал, что противник будет прорываться в самом широком проходе, где стояли его главные силы – 18 линейных кораблей и 7 фрегатов. Для отражения нападения он приказал поставить свою эскадру на якоря. Однако неожиданно для русского адмирала шведский флот пошел очень узким северным проходом у мыса Крюссерорд (в настоящее время – мыс Крестовый) и атаковал стоявший там отряд адмирала И. А. Повалишина из 5 линейных и 1 бомбардирского корабля. Головной корабль шведов прорезал русский строй, ведя огонь с двух бортов.

В образовавшийся проход двинулась вся эскадра. Прорвавшиеся корабли попадали под огонь 3 фрегатов адмирала П. И. Ханькова, стоявших за отрядом адмирала И. А. Повалишина, к западу от мыса Крюссерорд. Таким образом, каждый шведский корабль поочередно попадал под огонь двух русских отрядов. В Швеции это сражение именуют «выборгским шпиритеном», во время которого был ранен герцог Карл Сёдерманландский. Несколько шведских кораблей в густом дыму сражения сели на мель. Их экипажи были пленены русскими моряками. Несколько шведских кораблей загорелись и взорвались. Несмотря на потери, большей части шведских кораблей удалось вырваться из Выборгского залива и направиться в Свеаборг. Корабли русской эскадры и гребные суда К. Ф. Нассау-Зигена стали преследовать противника, уничтожая и принимая в плен шведские корабли.

Эскадра Карла Сёдерманландского, потеряв треть своих линейных кораблей и 7000 моряков, спаслась в Свеаборге, который был прочно блокирован Балтийским флотом.

В результате Выборгского сражения были сорваны наступательные планы Швеции. Король Густав III осознал бесперспективность продолжения войны и обратился к императрице Екатерине II с предложением о мире.

3 августа 1790 г. был подписан Верельский мирный договор. Главное его значение заключалось в том, что Швеция отказалась от союза с Турцией и сохранялись довоенные границы Финляндии.

В сентябре 1790 г. в Санкт-Петербурге более двух недель продолжались торжества по случаю завершения войны. Адмирал Чичагов за Выборгское сражение был удостоен высшей военной



Медаль «На заключение мира со Швецией. 3 августа 1790 г.»



Обелиск народному ополчению русско-шведской войны 1788–1790 гг., Усть-Ижора

награды Российской империи – ордена Св. Георгия 1-й степени (единственный моряк из 25 кавалеров этого ордена).

Для награждения солдат, унтер-офицеров и матросов, участвовавших в русско-шведской войне 1788–1790 гг. была учреждена медаль «На заключение мира со Швецией. 3 августа 1790 г.».

В 1791 г. в окрестностях Петербурга в селах Усть-Ижора и Рыбацкое по велению императрицы Екатерины II были установлены обелиски «в память усердия крестьян, добровольно нарядившихся с четырех пятого человека на службу Ее Величества и Отечества во время Свейской войны».

235-летие Выборгского сражения не осталось без внимания общественности, краеведов, ученых. 4 июля 2025 г. Комитет по культуре и туризму Ленинградской области, Ленинградская областная универсальная научная библиотека, библиотека А. Алто в Выборге, АНО «Историко-патриотическое общество «Выборг» провели историко-краеведческую конференцию «Выборгский шпиритен», посвященную этому событию. На конференции по поручению председателя Санкт-Петербургского Морского собрания С. Н. Ирютина с докладом выступил почетный работник высшего образования, кандидат исторических наук, доцент О. А. Яковлев, автор книги «Выборг. 1790» из серии «Морская слава России». Эта книга, как и все другие книги этой серии, предназначена в первую очередь для детей школьного возраста и служит ярким примером популяризации военной истории России, которая в качестве одной из задач обозначена в Указе Президента РФ от 8 мая 2024 г. «Об утверждении Основ го-



Председатель СПбМС С.Н. Ирютин вручает изданные Собранием книги Кронштадтскому морскому кадетскому военному корпусу



Изданные СПбМС книги серии «Морская слава России» в Севастопольской детской морской флотилии



Доклад О.А. Яковлева на конференции



Книга О.А. Яковлева «Выборг. 1790»

сударственной политики Российской Федерации в области исторического просвещения».

Данная работа – одна из 49 книг, изданных Санкт-Петербургским Морским собранием, которое 16 февраля 2025 г. отметило свое 115-летие. В Центральной военно-морской библиотеке с 14 января по 29 апреля 2025 г. проходила книжная выставка, на которой экспонировались этот труд и другие работы, подготовленные СПбМС с 2005 г. Так, были представлены 19 книг из серии «Морская слава России». Среди них – 13 книг о славных победах Российского флота времен парусного флота: от «Гангут. 1714», до «Синоп. 1853», «Петровские виктории», «Адмирал Макаров», «Адмирал Ушаков», «Адмирал Нахимов»; первые книги серии «Выдающиеся корабли» («Бриг «Меркурий») и серии «Морские крепости России» («Кронштадт»).

Как известно, серия книг «Морская слава России» была выдвинута на соискание премии Министерства обороны РФ в области культуры и искусства в 2022 г. в номинации «Литературное творчество и издательская деятельность». Автор книг серии «Морская слава России» О. А. Яковлев, художник Е. Е. Баскакова, другие члены команды были отмечены Благодарностью Департамента культуры МО РФ «за высокий профессионализм серии книг». Они, а также генеральный директор ООО «Историческая иллюстрация» Н. В. Кирющенко награждены орденами СПбМС «За трудовую доблесть» 2-й степени.

Можно напомнить, что первой в 2005 г. была издана работа историографа Собрания, доктора военно-морских наук, профессора Военно-морской академии, капитана 1 ранга С. П. Сирого «Морские собрания России. 1802–2005. История и современность», в 2010 г. ее продолжение – «Санкт-Петербургское Морское Собрание. 1910–2010. История и современность». В этом году вышла в свет книга И. А. Лещенко и Д. А. Клочкова под общей редакцией С. Н. Ирютина «Санкт-Петербургское Морское Собрание. История и современность. 1910–2025».

Кроме того, на выставке были представлены также книги именитых авторов:

- П. А. Кротова – доктора исторических наук, профессора СПбГУ – «Гангут. Сражение и корабли», «Российский флот на Балтике при Петре Великом», «Виктории флота Петра Великого»;
- В. Г. Смирнова – капитана 1 ранга, доктора исторических наук, директора Российского государственного архива ВМФ – «Софья Колчак – невеста, жена и вдова адмирала»;
- Г. А. Гребенщиковой – доктора исторических наук, профессора Санкт-Петербургского государственного морского технического университета – «Морское сражение под Наварином. Причины



Книжная выставка изданий СПбМС в ЦВМБ



Благодарность О.А. Яковлеву Департамента культуры Минобороны России



Награждение О.А. Яковлева, Е.Е. Баскаковой и Н.В. Кирющенко орденами СПбМС

и следствия», «Россия и Турция. Двенадцать невыученных уроков», «Чесменская победа. Триумф России в Средиземном море»;

- Д. А. Сидорова – «Шведские озерно-речные флотилии в российском приграничье (1701–1704)».

Большое внимание на выставке вызвал трехтомный сборник документов выдающегося флотоводца, мореплавателя и ученого, вице-адмирала С. О. Макарова. Ранее документы С. О. Макарова издавались еще 70 лет назад – в 1953 г.

Уже в 2025 г. Санкт-Петербургским Морским собранием изданы новые книги:

- «Адмирал Спиридов»;
- «Моряк и художник на службе Отечества. К 200-летию со дня рождения художника А. П. Боголюбова» (сборник докладов научной конференции);
- «В сиянии Андреевского флага» (сборник материалов конференции «К 320-летию Победы Петра I при Омовже и 320-летию основания Кронштадта»).

В планах книгоиздательской деятельности Собрания на 2026–2029 гг.:

- книги серии «Морская слава России»: «Севастополь», «Крейсер «Варяг», «Эскадренный миноносец «Стерегущий», «Крейсер «Аврора», «Ледокол «Красин», «Первое русское кругосветное плавание (1803–1806)», «Открытие русскими мореплавателями Антарктиды (1820)»;
- сборники документов: «П. И. Рикорд (1776–1855). Документы», «Дневник плавания фрегата «Олег» в Средиземное море, веденный лейтенантом Ф. Н. Челеевым (1860–1862)», «Деятельность российских военно-морских агентов в Турции. Донесения, рапорты, переписка (сер. XIX – нач. XX вв.)», «С. О. Макаров. Дневники и письма»;
- сборники статей: «Елагинские чтения», посвященный участию военно-морского флота в Русско-японской войне 1904–1905 гг.», «Сборник докладов конференции, посвященной 250-летию адмирала П. И. Рикорда», сборник «Елагинские чтения», посвященный 200-летию юбилею генерал-адмирала великого князя Константина Николаевича.

Санкт-Петербургское Морское собрание в своей книгоиздательской деятельности в настоящее время и в будущем планирует ориентироваться на военно-историческую и патриотическую тематику. ■

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 (полутонные), TIFF BITMAP (штриховые), EPS, JPEG, с разрешением 300 dpi для полутонных, 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 629.5.01 **Ключевые слова:** газовоз, танкер-газовоз СПГ, СПГ, рынок СПГ, цистерна СПГ, судостроение, судостроение

В.Ю. Светова, А.В. Кошелев, А.С. Моданов. Отечественный газовоз для СПГ: предпосылки, рынки, ограничения, характеристики//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 6

Описаны возможности развития рынков производства и сбыта сжиженного природного газа, существующие ограничения и потребности в их создании. Проанализированы характеристики и устройство существующих судов. Обозначены возможные модели использования танкера-газовоза с определенными в ходе работы характеристиками. Ил. 7. Библиограф. 11 назв.

УДК 629.05:004.95 **Ключевые слова:** тенденции развития инновационных технологий, автономное судовождение, доля вклада приоритетных направлений в инновационный процесс, новые группы специалистов.

Д.В. Казунин, С.С. Соколов, С.С. Якупников. О технологиях морского и речного транспорта при развитии автономного судовождения до 2050 года//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 11

Рассмотрены тенденции развития инновационных технологий для автономного флота в период до 2050 г. с учетом особенностей развития водного транспорта Российской Федерации (РФ). Приведено предложение о новых специальностях, появление которых в системе образования РФ необходимо для гармоничного развития в условиях происходящей технологической трансформации. Ил. 16. Библиогр. 7 назв.

УДК 627.77 **Ключевые слова:** роботизированное спасательное средство, спасательная техника, морское робототехническое средство, морской робототехнический комплекс, беззиплажный корабль, необитаемый подводный аппарат, беспилотный летательный аппарат, беспилотная авиационная система

В.Н. Илюхин. О развитии роботизированных спасательных средств для водных объектов//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 21

Рассмотрены актуальные аспекты роботизации спасательных средств как разновидности морских робототехнических средств. Обозначено место и роль спасательных средств, являющихся составной частью спасательной техники. Сформулированы предложения по дальнейшему совершенствованию условий для более широкого внедрения рассмотренных средств в аварийно-спасательных службах.

УДК 628.931 **Ключевые слова:** освещение интерьера, интенсивность, цветовое восприятие, систематическая оценка освещенности, стандарт, санитарные нормы освещенности, индекс цветопередачи, цветовой спектр, эксплуатационные характеристики

П.А. Зубков, О.В. Захарова. Особенности проектирования дизайна освещения интерьеров жилых и служебных помещений перспективных кораблей ВМФ//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 27

Обозначены проблемы проектирования освещения на кораблях, которая представляет собой сложную задачу, требующую глубоких знаний в области инженерии, психологии и архитектуры. Т. 2. Ил. 4. Библиогр. 7 назв.

УДК 004.896, 004.94, 515.1

Ключевые слова: нечеткий вычислитель, сеть нечетких вычислителей, геометрически сложная поверхность, моделирование поверхностей

А.Е. Васильев, Ие Мин Хтет, Д.Е. Кунгурцев, С.А. Токаренко, Хтут Шайн. Моделирование геометрии поверхности объектов судостроения с применением аппарата сетей элементарных нечетких вычислителей//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 33

Рассмотрен подход к моделированию поверхностей сложной геометрии, в частности поверхностей судовых корпусов, основанный на использовании сетевой композиции элементарных нечетких вычислителей. Ил. 5. Библиогр. 26 назв.

УДК 623.8/9 **Ключевые слова:** кавитация жидкости, виды кавитации, акустическая кавитация

Е.М. Кириллова, А.П. Федотенков. Причины возникновения кавитации морской воды, обусловленные работой гидроакустических систем поиска//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 38

Рассмотрены причины, порождающие процесс возникновения кавитации морской воды, которая обусловлена работой гидроакустической системы обнаружения подводных объектов в режиме активного поиска, влияющие на эффективность ее работы, а также технические приемы, снижающие вероятность возникновения. Т. 1. Библиогр. 5 назв.

УДК 339.56 **Ключевые слова:** военно-техническое сотрудничество, инозаказчик, совместное проектирование, военно-морская техника, патрульный корабль, фрегат, корвет, локализация

А.В. Архипов, В.А. Евтеев, Д.В. Курочкин. Мировой опыт индустриального сотрудничества в сфере строительства боевых надводных кораблей классов OPV, корвет и фрегат. Часть 2//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 41

Статья раскрывает один из важных аспектов военно-технического сотрудничества ведущих мировых держав – индустриального. В области надводного кораблестроения наблюдается устойчивая тенденция к формированию индустриального сотрудничества при постройке надводных кораблей всех наиболее востребованных сегодня классов – патрульных, корветов и фрегат. Т. 1. Ил. 8.

УДК 004.356.2 **Ключевые слова:** СПО «Арктика», аддитивное производство, подводный движитель, анализ рынка, фотополимерная смола, 3D-печать, программа-слайсер, аддитивно-компактная технология

Д.С. Ракитин, И.Н. Костусев, В.М. Мокрицкий, Д.А. Шушков. Развитие аддитивного производства на судостроительном предприятии//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 47

Проанализирована деятельность созданного в 2023 г. в СПО «Арктика» участка аддитивного производства. На производстве освоены технологии послойного наплавления пластика по технологии FDM, а также SLA, которые обеспечивают высокую точность изготовления деталей. Ил. 8. Библиогр. 5 назв.

УДК 66.045.122+629.12 **Ключевые слова:** судовое оборудование водоподготовки, кожухотруб-

ные охладители, теплообменные аппараты, теплофизический расчет

А.Г. Мальцев, Е.В. Ульянова. Метод теплофизического расчета системы кожухотрубных охладителей при нестационарных процессах теплоотдачи и минимизации массогабаритных параметров//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 51

Рассмотрены основные подходы к методу теплофизического расчета системы кожухотрубных охладителей при нестационарных процессах теплопередачи и к минимизации массогабаритных параметров охладителей. Ил. 6. Библиогр. 11 назв.

УДК 004.942, 004.415 **Ключевые слова:** система информационной поддержки, энергетические установки надводных кораблей, оценка и оптимизация характеристик ЭУ

П.Г. Печковский, В.В. Барановский, Ю.В. Пыльнев, И.А. Кирихин. Концепция разработки системы информационной поддержки обоснования выбора энергетических установок перспективных надводных кораблей//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 55

Рассмотрена архитектура системы информационной поддержки обоснования выбора энергетических установок (ЭУ) надводных кораблей. Определена задача оптимизации характеристик ЭУ, приведены примеры программной реализации подсистемы выбора вариантов конструктивных схем ЭУ на основе использования имитационного моделирования. Т. 1. Ил. 7. Библиогр. 6 назв.

УДК 621.51 **Ключевые слова:** мембранный компрессор, судовое оборудование, дожимающая установка, технические газы, азот, кислород, высокое давление, герметичность

Л.Г. Кузнецов, А.В. Бураков, Д.С. Михайлов, П.А. Белов, Ю.А. Чукичев, М.Д. Смогарев. Опыт разработки специализированных мембранных компрессорных установок для технических газов в судостроении//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 64

Проанализирован опыт создания и применения специализированных мембранных компрессоров АО "Компрессор" технических газов (азот, кислород, гелий, водород) на кораблях ВМФ и судах, рассмотрены вопросы проектирования компрессорных станций высокого давления для сжатия и безопасной перекачки опасных или очищенных газов. Т. 1. Ил. 6. Библиогр. 8 назв.

УДК 614.843 **Ключевые слова:** пожарная безопасность, арктическое судоходство, мобильное пожаротушение, температурно-активированная вода

М.Г. Войтович. Мобильный комплекс для тушения корабельных пожаров и борьбы с обледенением на кораблях и судах Арктической зоны//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 69

Статья посвящена актуальной проблеме обеспечения пожарной безопасности морских судов и кораблей в условиях Арктики. Рассмотрено инновационное решение – мобильный комплекс пожаротушения, предназначенный для эффективного подавления возгораний в различных зонах корабля при низких температурах. Ил. 1. Библиогр. 5 назв.

УДК 669.018.4; 621.7; 621.18:532.539 **Ключевые слова:** сплав, длительная прочность, окисление

А.З. Багерман. Сравнительная оценка результатов модельных и натурных испытаний сплава IN738LC при температурах 700–1000 °C//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 71

Показана возможность (модель) получения расчетным путем характеристик длительной прочности жаропрочного никелевого сплава, совпадающих с опытными. Т. 6. Ил. 1. Библиогр. 6 назв.

УДК 623.826 **Ключевые слова:** траекторные измерения, квантово-оптическая система, измерительный комплекс наземного и морского базирования, параметры технических характеристик, баллистические объекты, точность сопровождения объектов

С.Н. Ирютин, А.Е. Шашурин, Д.П. Тетерин, В.Н. Мариан, В.Е. Бондырев, В.К. Дригола. Новые технологии построения квантово-оптических систем автоматического сопровождения динамичных объектов морского базирования из состава корабельных измерительных комплексов//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 73

Приведены описание и отдельные характеристики наземных и морского базирования оптических, оптико-электронных, квантово-оптических, лазерно-телевизионных средств и систем траекторных измерений, которые используются на научно-исследовательских испытательных полигонах, космодромах, лабораторно-испытательных базах и площадках полигонов ранее и в настоящее время. Ил. 3. Библиогр. 15 назв.

УДК 623.973 **Ключевые слова:** низкочастотное электромагнитное поле, система компенсации, электромагнитная индукция, измеритель индукции магнитного поля, источник низкочастотного электромагнитного поля, управляющая обмотка АСК, компенсационная обмотка АСК

Б.Ю. Семёнов. Модификация исполнительных устройств корабельных систем компенсации низкочастотных электромагнитных полей с целью повышения их устойчивости при настройке и эксплуатации//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 76

Рассказано о принципах функционирования автоматических систем компенсации (АСК) низкочастотного электромагнитного поля кораблей, находящихся в эксплуатации, проанализирована электрическая модель исполнительных устройств АСК Ил. 10.

УДК 629.06 **Ключевые слова:** инерциальная навигационная система, подводный автономный аппарат, акселерометр, гироскоп, система управления, точностные характеристики, термостабильность, виброустойчивость

М.А. Еремеев. Высокоточные инерциальные системы на основе акселерометров для управления подводными автономными аппаратами//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 81

В условиях отсутствия внешних сигналов навигации ключевую роль играют инерциальные измерительные блоки, основанные на акселерометрах и гироскопах. Такие модули формируют основу инерциальной навигационной системы (INS – Inertial Navigation System), обеспечивающей определение координат, курса и ориентации подводного аппарата относительно начальной точки без участия внешних источников данных. Т. 2. Ил. 4. Библиогр. 12 назв.

УДК 621.396.66 **Ключевые слова:** радиоэлектронная аппаратура, серийное производство, система контроля качества, технологическая дисциплина, научно-техническая деятельность

Е.А. Рылов, В.Л. Филимонов, А.В. Долгов, К.В. Яшин. Серийное производство радиоэлектронной аппаратуры как неотъемлемая часть создания изделий военной техники//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 85

Детально рассмотрены некоторые процессы организации серийного производства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) военной и специальной техники (ВТ), проанализированы этапы подготовки производства, управления изменениями, роль серийных КБ, экономические аспекты,

а также системы контроля качества и технологической дисциплины, обеспечивающие выпуск высоконадежной продукции, отвечающей требованиям оборонного заказа.

УДК 629.5.061 **Ключевые слова:** типовые приборы, импортозамещение, компьютерные модели, ядерные энергетические установки

А.В. Ишанин. Основные технические решения при разработке приборов автоматизированных систем управления технологическими процессами судов и плавучих сооружений с ядерной энергетической установкой//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 89

Рассмотрены основные подходы к разработке новой линейки типовых приборов для применения в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами судовой ядерной энергетической установки. Ил. 1. Библиогр. 2 назв.

УДК.621.396.965 **Ключевые слова:** многофункциональный радиоэлектронный комплекс (МРЭК), интегрированная система боевого управления (ИСБУ), освещение воздушной и надводной обстановки, модульный принцип построения, унификация

А.С. Долгополов, В.А. Кружалов, С.А. Львовский, Ю.Ф. Подолёкин. Концепция формирования многофункциональных радиоэлектронных комплексов на базе унифицированных функциональных модулей//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 93

На основе опыта разработки многофункциональных радиоэлектронных комплексов (МРЭК) для ВМФ в материале предлагается концепция построения таких комплексов на базе унифицированных функциональных модулей, имеющих законченное конструктивное исполнение и позволяющих комплектовать МРЭК различного базирования. Рассмотрены варианты построения различных функциональных модулей на примере некоторых конструкций, разработанных и внедренных АО «Концерн «Гранит-Электрон» и представляющих интерес в рамках данной темы. Ил. 2. Библиогр. 3 назв.

УДК 621.391 **Ключевые слова:** линии морской радиосвязи, радиоэлектронный конфликт, энергетический потенциал, вероятность устойчивой работы радиоприема

В.А. Долгих, Д.В. Васильева, С.В. Дворников. Частная модель радиоэлектронного конфликта на линиях морской радиосвязи//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 97

Предложена модель радиоэлектронного конфликта на линиях морской радиосвязи. Рассмотрены условия для эффективного разрешения противоречий, возникающих между радиоэлектронными средствами в ходе радиоэлектронного конфликта. Т. 1. Ил. 2. Библиогр. 25 назв.

УДК 656.61 **Ключевые слова:** автономное судно, акватория со стесненными условиями, обстановка в ближней морской зоне, безопасное маневрирование, искусственные нейронные сети, многослойный перцептрон

С.И. Биденко, А.В. Дегтярёв, А.В. Сорокин, И.А. Полковников. Нейросетевая методика обеспечения безопасной навигации в ближней морской зоне//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 101

Приведена методика оценки обстановки в ближней морской зоне, в районах со сложными условиями плавания. Предложена методика выработки рекомендаций по расхождению с опасными целями, безопасному маневрированию, основанная на аппарате искусственных нейронных сетей.. Ил. 3. Библиогр. 18 назв.

УДК.621.396.96 **Ключевые слова:** весовая функция, РЛС, когерентная обработка, первичная обработка, обнаружение сигналов

С.С. Былин, Е.А. Синаицын, А.П. Борина, В.М. Тургалев, М.Н. Ещенко. Особенности обработки сигналов первичных когерентно-импульсных РЛС при использовании алгоритмов быстрого преобразования Фурье с адаптивным взвешиванием//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 103

Показано, что устройство, обрабатывающее сигналы первичных когерентно-импульсных радиолокационных станций при помощи алгоритмов быстрого преобразования Фурье с адаптивным взвешиванием, способствует улучшению отношения сигнал/помеха плюс шум по сравнению с традиционными способами взвешивания сигнала при произвольном отличии частот Доплера цели и помехи. Т. 1. Ил. 2. Библиогр. 7 назв.

УДК 621.391 **Ключевые слова:** статистический анализ, битовые последовательности, структурные различия, функция различий Ждановой

К.О. Симонова, Д.В. Васильева, С.В. Дворников. Применение уточненной функции Ждановой в анализе битовых потоков//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 106

Представлены результаты данных статистического анализа и функции различий Ждановой при получении сравнительной оценки обрабатываемых битовых последовательностей. Т. 2. Ил. 4. Библиогр. 20 назв.

УДК 623.8/9 **Ключевые слова:** ЭНИС, MCH, ВМФ, Astra Linux, навигация, судовождение

Е.А. Поташко, Л.С. Хабаров. Разработка ЭНИС для функционирования на отечественной операционной системе Astra Linux//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 109

Описаны цели разработки ЭНИС и проведен анализ на предмет его применения. Приведены технические подробности реализации ЭНИС «Аляска-Ч» и его структура. Ил. 2.

УДК 629.12.001.2:614.84 **Ключевые слова:** мультикритериальная дельта-факторная система, судовая пожарная сигнализация, морские суда, достоверность обнаружения

С.С. Пустынников, М.А. Ахрестин. Мультикритериальная дельта-факторная система судовой пожарной сигнализации: апробация эффективности//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 112

Описан опыт испытаний мультикритериальной дельта-факторной системы судовой пожарной сигнализации «Гамма-01Ф». Испытания подтвердили 100%-ную эффективность обнаружения, отсутствие ложных срабатываний и сокращение времени выявления очагов возгорания в 3–5 раз по сравнению с традиционными пороговыми системами. Ил. 1. Библиогр. 10 назв.

УДК 629.05.03 **Ключевые слова:** борьба за живучесть, комплексная система управления, центральная координирующая система управления, система информационной поддержки, актуализация данных по состоянию технических средств

Б.В. Грек, А.В. Корчанов. Опыт разработки систем информационной поддержки принятия решений по борьбе за живучесть надводных кораблей//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 115

Рассмотрено распределение задач по борьбе за живучесть надводных кораблей между центральной координирующей системой управления и функциональными системами управления, в составе которых по специальности предлагается создать информационные средства поддержки принятия решений по использованию технических средств. Ил. 3. Библиогр. 3 назв.

УДК 621.317.335 **Ключевые слова:** корабельная радиоприемная аппаратура, измеритель радиопомех, эквивалентное напряжение и мощность радиопомехи, спектральная плотность мощности радиопомех

Е.К. Самаров, Я.Ю. Ионченкова. Измерение спектральной плотности широкополосных радиопомех корабельной радиоприемной аппаратурой//Морской вестник. 2025. № 4 (96). С. 118

В работе рассмотрено измерение спектральной плотности широкополосных радиопомех. Показано, что основными характеристиками широкополосных радиопомех могут быть спектральная плотность напряжения для импульсных помех и спектральная плотность мощности как для импульсных, так и для «гладких» помех. Т. 1. Ил. 2. Библиогр. 8 назв.

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 629.5.01 **Keywords:** gas carrier, LNG tanker, LNG, LNG market, LNG tank, shipping, shipbuilding

V.Yu. Svetova, A.V. Koshelev, A.S. Modanov. Domestic LNG carrier: prerequisites, markets, limitations, characteristics//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 6

The article describes the possibilities for developing markets for the production and sale of liquefied natural gas, existing limitations, and the need for their creation. The characteristics and design of existing vessels are analyzed. Possible models for using a gas carrier with the characteristics determined during operation are outlined. Fig. 7. Bibliography 11 titles.

UDC 629.05:004.95 **Keywords:** trends in the development of innovative technologies, autonomous navigation, contribution of priority areas to the innovation process, new groups of specialists.

D.V. Kazunin, S.S. Sokolov, S.S. Yakunchikov. On sea and river transport technologies in the development of autonomous navigation up to 2050//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 11

This article examines trends in the development of innovative technologies for an autonomous fleet in the period up to 2050, taking into account the specifics of the development of water transport in the Russian Federation (RF). A proposal is made for new specialties, the emergence of which in the Russian education system is necessary for harmonious development in the context of the ongoing technological transformation. Fig. 16. Bibliography 7 titles.

UDC 627.77 **Keywords:** robotic rescue craft, rescue technology, marine robotic craft, marine robotic complex, unmanned ship, unmanned underwater vehicle, unmanned aerial vehicle, unmanned aerial system

V.N. Ilyukhin. On the Development of Robotic Rescue Craft for Water Bodies//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 21

This article examines current aspects of the robotization of rescue craft as a type of marine robotic craft. The place and role of rescue craft, which are an integral part of rescue equipment, are designated. Data on the main developed robotic rescue craft and systems are provided. A stable trend towards the robotization of rescue craft is noted. The main regulatory documents governing the development of robotic rescue craft are indicated. The application of robotic rescue systems in various water bodies is described. Proposals are formulated for further improving the conditions for the wider implementation of robotic rescue systems in emergency rescue services. Fig. 10. Bibliography 28 titles.

UDC 628.931 **Keywords:** interior lighting, luminous intensity, color perception, systematic illuminance assessment, illuminance standard, sanitary illuminance standards, color rendering index, color spectrum, performance characteristics

P.A. Zubkov, O.V. Zakharova. Design features of interior lighting for living and utility spaces on prospective navy ships//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 27

This article describes the challenges of shipboard lighting design, a complex task requiring in-depth knowledge of engineering, psychology, and architecture. Lighting must take into account the psychophysical needs of crews, taking into account the unique conditions of maritime operation. The correct selection of lighting conditions, attention to color perception, and systematic illuminance assessment create an optimally functioning lighting system that facilitates the most favorable conditions for the effective performance of naval ship personnel. T. 2. Fig. 4. Bibliography 7 titles.

UDC 004.896, 004.94, 515.1 **Keywords:** fuzzy solver, network of fuzzy solvers, geometrically complex surface, surface modeling

A.E. Vasil'ev, Ye Min Htet, D.E. Kungurtsev, S.A. Tokarenko, Htut Shain. Shipbuilding objects surface modeling on the base of elementary fuzzy solvers networks//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 33

The article discusses an approach to modeling complex surfaces, particularly ship hulls surfaces, based on a network composition of elementary fuzzy solvers. The article describes the specifics of this approach, as well as its application to geometric modeling of shipbuilding and marine engineering objects. Fig. 5. Bibliography 26 titles.

UDC 623. 8/9 **Keywords:** liquid cavitation, types of cavitation, acoustic cavitation

E.M. Kirillova, A.P. Fedotenkov. Causes of seawater cavitation caused by the operation of hydroacoustic search systems//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 38

The article examines the causes of seawater cavitation caused by the operation of a hydroacoustic system for detecting underwater objects in active search mode, influencing its efficiency, and techniques that reduce the likelihood of its occurrence. T. 1. Bibliography 5 titles.

UDC 339.56 **Keywords:** military-technical cooperation, foreign customer, joint design, naval equipment, patrol ship, frigate, corvette, localization

A.V. Arkhipov, V.A. Evteev, D.V. Kurochkin. Global experience of industrial cooperation in the construction of surface combat ships of the OPV, corvette, and frigate classes. Part 2//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 41

This article explores one of the important aspects of military-technical cooperation between the world's leading powers – industrial cooperation. This article refers to projects that do not involve the delivery of ships and vessels as finished products, but rather offer packages, primarily for organizing ship construction on the territory of a foreign customer, modernizing shipyards, and transferring relevant technologies. In the field of surface shipbuilding, there is a steady trend toward industrial cooperation in the construction of surface ships of all the most in-demand classes today – patrol ships, corvettes, and frigates. T. 1. Fig. 8.

UDC 004.356.2 **Keywords:** NPA Arktika, additive manufacturing, underwater propulsion system, market analysis, photopolymer resin, 3D printing, slicing software, additive compound technology

D.S. Rakitin, I.N. Kostusev, V.M. Mokritsky, D.A. Shushkov. Development of additive manufacturing at a shipbuilding enterprise//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 47

This article presents the activities of the additive manufacturing unit established in 2023 at NPA Arktika. The unit has mastered fused deposition molding (FDM) and SLA technologies, which ensure high manufacturing precision. Fig. 8. Bibliography 5 titles.

UDC 66.045.122+629.12 **Keywords:** marine water treatment equipment, shell-and-tube coolers, heat exchangers, thermophysical calculation

A.G. Mal'tsev, E.V. Ul'yanova. Method of thermophysical calculation of a shell-and-tube cooler system for non-stationary heat transfer processes and minimization of weight and size parameters//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 51

The article examines the main approaches to the method of thermophysical calculation of a shell-and-tube cooler system for non-stationary heat transfer processes and minimization of weight and size parameters of the coolers. Fig. 6. Bibliography 11 titles.

UDC 004.942+004.415 **Keywords:** information support system, surface ship propulsion systems, evaluation and optimization of propulsion system performance

P.G. Pechkovsky, V.V. Baranovsky, Yu.V. Pyln'nev, I.A. Kiryukhin. Concept of developing an information support system for justifying the selection of propelling surface ship propulsion systems//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 55

This paper examines the architecture of an information support system for justifying the selection of propulsion systems (PS) for surface ships. The problem of optimizing PS characteristics is defined, and examples of software implementation of a subsystem for selecting PS design options and a subsystem for predicting the tactical, technical, and cost characteristics of shipboard power equipment based on simulation modeling are provided. T. 1. Fig. 7. Bibliography 6 titles.

UDC 621.51 **Keywords:** membrane compressor, marine equipment, booster unit, industrial gases, nitrogen, oxygen, high pressure, tightness

L.G. Kuznetsov, A.V. Burakov, D.S. Mikhailov, P.A. Belov, Yu.A. Chukichev, M.D. Smogarev. Experience in the development of specialized membrane compressor units for industrial gases in shipbuilding//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 64

This article analyzes the experience of Compressor JSC in the development and use of specialized membrane compressors for industrial gases (nitrogen, oxygen, helium, hydrogen) on Navy ships and vessels, considers the design of high-pressure compressor stations for the compression and safe pumping of hazardous or purified gases, and describes new and promising designs of compressor equipment for industrial gases. T. 1. Fig. 6. Bibliography 8 titles.

UDC 614.843 **Keywords:** fire safety, Arctic shipping, mobile fire suppression, temperature-activated water

M.G. Voitovich. Mobile complex for extinguishing ship fires and combating ice accumulation on arctic ships and vessels//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 69

This article addresses the pressing issue of ensuring fire safety on seagoing vessels and ships in Arctic condi-

tions. An innovative solution is considered: a mobile fire suppression complex designed to effectively suppress fires in various areas of a ship at low temperatures. The key features, composition, and tactical advantages of the proposed complex are described. Fig. 1. Bibliography 5 titles.

UDC 669.018.4; 621.7; 621.18:532.539 **Keywords:** alloy, long-term strength, oxidation

A.Z. Bagerman. Comparative evaluation of the results of model and full-scale tests of IN738LC alloy at temperatures of 700–1000 °C//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 71

The article demonstrates the possibility (model) of obtaining, by calculation, the long-term strength characteristics of a heat-resistant nickel alloy that coincide with experimental data. Data on ensuring long-term strength due to the consumption of the material of the alloy's outer layer and the modules that make up the alloy are presented. T. 6. Fig. 1. Bibliography 6 titles.

UDC 623.826 **Keywords:** trajectory measurements, characteristics, quantum-optical system, land- and sea-based measuring complex, technical characteristics parameters, ballistic objects, object tracking accuracy

S.N. Iryutin, A.E. Shashurin, D.P. Teterin, V.N. Mar'ian, V.E. Bondyrev, V.K. Drigola. New technologies for constructing quantum-optical systems for automatic tracking of dynamic sea-based objects from shipborne measuring complexes//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 73

The article describes and provides individual characteristics of land- and sea-based optical, optoelectronic, quantum-optical, and laser-television trajectory measurement systems and systems used at research test sites, cosmodromes, laboratory test bases, and test sites, both historically and currently. The results of the development of a quantum-optical automatic directional tracking system (QOATS) demonstrated the potential to increase object tracking accuracy by at least twofold. Analysis of the developed mathematical model and mock-ups of the QOATS system's main components demonstrated the potential for this type of QOATS to be used in land- and sea-based measurement systems (MS). Fig. 3. Bibliography 15 titles.

UDC 623.973 **Keywords:** low-frequency electromagnetic field, compensation system, electromagnetic induction, magnetic field induction meter, low-frequency electromagnetic field source, ASC control winding, ASC compensation winding

B.Yu. Semyonov. Modification of actuators of shipborne low-frequency electromagnetic field compensation systems to increase their stability during setup and operation//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 76

This article describes the operating principles of automatic compensation systems (ACS) for the low-frequency electromagnetic field of ships in operation, analyzes the electrical model of the ASC actuators, and formulates proposals for their modification to improve their stability during setup and operation. Fig. 10.

UDC 629.06 **Keywords:** inertial navigation system, autonomous underwater vehicle, accelerometer, gyroscope, control system, accuracy characteristics, thermal stability, vibration resistance

M.A. Ereemeev. High-precision inertial systems based on accelerometers for controlling autonomous underwater vehicles//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 81

In the absence of external navigation signals modules form the basis of an inertial navigation system (INS), which determines the coordinates, course, and orientation of the underwater vehicle relative to its starting point without the use of external data sources. For modern underwater vehicles, INS solves the problems of heading stabilization, disturbance compensation, depth control, and homing trajectory generation. T. 2. Fig. 4. Bibliography 12 titles.

UDC 621.396.66 **Keywords:** electronic equipment, se-

rial production, quality control system, technological discipline, scientific and technical activity

E.A. Rylov, V.L. Filimonov, A.V. Dolgov, K.V. Yashin. Serial production of electronic equipment as an integral part of military equipment creation//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 85

This article examines in detail certain processes involved in organizing the serial production of electronic equipment (EE) for military and special-purpose equipment (SE), analyzing the stages of production preparation, change management, the role of serial design bureaus, economic aspects, as well as quality control systems and technological discipline that ensure the release of highly reliable products that meet defense procurement requirements.

UDC 629.5.061 **Keywords:** standard instruments, import substitution, computer models, nuclear power plants

A.V. Ishanin. Main technical solutions in the development of instruments for automated process control systems for ships and floating structures with nuclear power plants//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 89

This article examines the main approaches to developing a new line of standard instruments for use in automated process control systems for ship nuclear power plants. Fig. 1. Bibliography 2 titles.

UDC 621.396.965 **Keywords:** multifunctional electronic warfare system (MEWS), integrated combat control system (ICCS), air and surface situational awareness, modular design, unification.

A.S. Dolgoplov, A.A. Kruzhalov, S.A. Lvovskiy, Yu.F. Podoplyokin. A concept for developing multifunctional electronic warfare systems based on unified functional modules//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 93

Based on the experience of developing multifunctional electronic warfare systems (MEWS) for the Navy, this paper proposes a concept for developing such systems based on unified functional modules with a complete design and allowing for the assembly of MEWS for various deployments. Design options for various functional modules are considered, using as an example certain designs developed and implemented by Granit-Electron Concern JSC, which are of interest within the framework of this topic. Fig. 2. Bibliography 3 titles.

UDC 621.391 **Keywords:** marine radio communication lines, radio-electronic conflict, energy potential, probability of stable operation of a radio line

V.A. Dolgikh, D.V. Vasil'eva, S.V. Dvornikov. A private model of radio-electronic conflict on marine radio communication lines//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 97

A model of radio-electronic conflict on marine radio communication lines is proposed. Conditions for effective resolution of contradictions arising between radio-electronic means during a radio-electronic conflict are considered. Indicators are substantiated at which it is possible to ensure the required stability of radio lines in conditions of interference. T. 1. Fig. 2. Bibliography 25 titles.

UDC 656.61 **Keywords:** autonomous vessel, congested waters, near-sea navigation situation, safe maneuvering, artificial neural networks, multilayer perceptron

S.I. Bidenko, A.V. Degtyaryov, A.V. Sorokin, I.A. Polkovnikov. Neural network methodology for ensuring safe navigation in the near-sea zone//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 101

This article presents a methodology for assessing the situation in the near-sea zone, in areas with difficult navigation conditions. A methodology for developing recommendations on avoiding dangerous targets and safe maneuvering, based on artificial neural networks, is proposed. Fig. 3. Bibliography 18 titles.

UDC 621.396.96 **Keywords:** weighting function, radar, coherent processing, primary signal processing, signal detection

S.S. Bybin, E.A. Sinitsyn, A.P. Borina, V.M. Turgaliev, M.N. Yeshchenko. Signal processing for primary coherent-pulse radars with adaptive weighting FFT algorithms//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 103

The article shows, that a device for processing signals from primary pulsed coherent radars, using adaptive fast Fourier transform algorithm, improves signal to interference plus noise ratio compared to traditional weighting signal methods with arbitrary differences in Doppler frequencies of the target and interference. T. 1. Fig. 2. Bibliography 7 titles.

UDC 621.391 **Keywords:** statistical analysis, bit sequences, structural differences, Zhdanova difference function

K.O. Simonova, D.V. Vasil'eva, S.V. Dvornikov. Application of the refined Zhdanova function in the analysis of bit streams//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 106

This article presents the results of statistical analysis data and the Zhdanova difference function, when obtaining a comparative assessment of the processed bit sequences. Factors limiting the possibilities of using statistical parameters as a tool for analyzing the structure of bit streams are considered. T. 2. Fig. 4. Bibliography 20 titles.

UDC 623.8/9 **Keywords:** ENIS, MSN, Navy, Astra Linux, navigation, ship handling

E.A. Potashko, L.S. Khabarov. Development of ENIS for operation on the domestic Astra Linux operating system//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 109

This article describes the development goals of the ENIS and analyzes its application. Technical details of the implementation of the Alaska-Ch ENIS and its structure are provided. Fig. 2. Bibliography 4 titles.

UDC 629.12.001.2:614.84 **Keywords:** multicriteria delta-factor system, ship fire alarm system, sea-going vessels, detection reliability

S.S. Pustynnikov, M.A. Akhrestin. Multicriteria delta-factor ship fire alarm system: performance testing//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 112

This paper describes the testing experience of the Gamma-01F multicriteria delta-factor ship fire alarm system. The tests confirmed 100% detection efficiency, the absence of false alarms, and a 3–5-fold reduction in fire detection time compared to traditional threshold systems. Fig. 1. Bibliography 10 titles.

UDC 629.05.03 **Keywords:** survivability control, integrated control system, central coordinating control system, information support system, updating data on the status of technical assets

B.V. Grek, A.V. Korchanov. Experience in developing information support systems for decision-making in surface ships damage control//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 115

The article examines the distribution of surface ship damage control tasks between the central coordinating control system and functional control systems, within which it is proposed to create information tools to support decision-making on the use of technical assets. Fig. 3. Bibliography 3 titles.

UDC 621.317.335 **Keywords:** shipborne radio receiving equipment, radio interference meter, equivalent voltage and power of radio interference, spectral power density of radio interference

E.K. Samarov, Ya.Yu. Ionchenkova. Measuring of spectral density of broadband radio interference ship's radio reception equipment//Morskoy vestnik. 2025. No. 4 (96). P. 118

This paper examines the measurement of the spectral density of broadband radio interference. It is shown that the main characteristics of broadband radio interference can be the spectral voltage density for pulsed interference and the spectral power density for both pulsed and «smooth» interference. T. 1. Fig. 2. Bibliography 8 titles.