

Федеральное агентство по рыболовству  
Российский союз инженеров  
Камчатский государственный технический университет  
Донецкий национальный технический университет  
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры  
Усинский филиал Ухтинского государственного технического университета  
Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

# **ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РАЗВИТИЯ**

*Материалы  
Седьмой национальной (всероссийской) научно-технической конференции  
(14–15 ноября 2024 г.)*

Электронное издание

Издательство



КамчатГТУ

Петропавловск-Камчатский  
2025

УДК 656.6:629.5  
ББК 39.42-08

Ответственный за выпуск

*О.А. Белов,*  
кандидат технических наук

Редакционная коллегия

*О.А. Белов (председатель), к.т.н.,*  
*С.Ю. Труднев, к.т.н.; А.В. Костенко, к.т.н.; С.Н. Царенко, д.т.н.,*  
*О.В. Ольхина; А.А. Седельникова*

**Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития** : материалы Седьмой национальной (всероссийской) научно-технической конференции (14–15 ноября 2024 г.) [Электронный ресурс] / отв. за вып. О.А. Белов. – Электрон. дан. – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2025. – 1 электрон. опт. диск. – Загл. с экрана.

В сборник включены материалы Седьмой национальной (всероссийской) научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития», отражающие научные и практические результаты в области технической эксплуатации водного транспорта.

Освещены актуальные проблемы, представлены современные достижения и перспективные направления развития в таких областях, как судовождение, судостроение и судоремонт, электро-технические комплексы и системы, информационные технологии и моделирование, технологические машины и оборудование, наукоемкие технологии изготовления и ремонта деталей судов и судовых агрегатов, подготовка инженерных кадров.

Авторами представленных докладов являются преподаватели, ведущие сотрудники научно-исследовательских институтов, аспиранты и студенты высших учебных заведений, ведущих научную и образовательную деятельность в сфере водного транспорта.

ISBN 978-5-328-00436-7

Текстовое (символьное) электронное издание

**Минимальные системные требования:**

Тип компьютера, процессор, частота: ПК, двухъядерный Intel Pentium 4 и выше, 1500 MHz

Оперативная память (RAM): 2 Gb и выше

Необходимо на винчестере: от 80 Gb

Операционные системы: Microsoft Windows XP/7/8/10/11 (32 или 64 bit) Linux с GUI

Видеосистема: видеокарта 8 Mb памяти или лучше

Акустическая система: звуковая карта (любая)

Дополнительное оборудование: привод CD-R дисков

Дополнительные программные средства: ПО для просмотра файлов PDF

Количество носителей: 1

© КамчатГТУ, 2025

© Авторы, 2025

Техническая обработка  
и подготовка материалов – Е.Е. Бабух

Дата подписания к использованию 20.02.2025 г.

Объем издания – 9,30 Мб

Количество носителей – 1

Тираж – 100 шт.

Записано на материальный носитель:

ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»

Издательство КамчатГТУ

63003, г. Петропавловск-Камчатский,

ул. Ключевская, 35

Тел. (4152)300-953. Факс (4152)42-05-01

E-mail: kamchatgtu@kamchatgtu.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

### СЕКЦИЯ 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<b><u>Алтуфьев А.Ю., Мясников Г.С., Швецов В.А.</u></b>	
К вопросу применения стенда измерения тепловых характеристик .....	7
<b><u>Алтуфьев А.Ю., Мясников Г.С., Швецов В.А.</u></b>	
Разработка стенда измерения тепловых характеристик .....	11
<b><u>Белов О.А., Мясников Г.С.</u></b>	
Повышение эксплуатационной надежности электроприводов общесудовых систем.....	15
<b><u>Бурков А.Ф., Миханюшин В.В., Нгуен Ван Ха</u></b>	
Повышение энергоэффективности судовых электростанций .....	19
<b><u>Бурков А.Ф., Миханюшин В.В., Юрин В.Н.</u></b>	
Техническая эксплуатация электрических машин (электродвигателей) .....	24
<b><u>Гараев Р.А., Змеев А.Д., Рогожников А.О., Волков В.С.</u></b>	
Перспективы использования подводного дрона с установленной технической пробиркой для исследования водной биосферы.....	30
<b><u>Гладких А.С.</u></b>	
Исследование геомагнитно-индуцированных токов в электрических сетях Камчатского края во время магнитной бури 10 мая 2024 года .....	35
<b><u>Гринев В.С., Бурнаев М.Н.</u></b>	
Тепловизионный контроль силового электрооборудования .....	41
<b><u>Кулдасов А.К.</u></b>	
Общая оценка перспективы развития пропульсивных установок современных судов .....	46
<b><u>Мясников Г.С., Поляков А.Р., Белов О.А.</u></b>	
Экспериментальная оценка функциональности устройства имитации режимов работы асинхронного электропривода .....	51
<b><u>Нестерук И.В.</u></b>	
Повышение эффективности судовых систем путем внедрения современных элементов автоматике .....	58
<b><u>Парсентьев О.С., Мусаев Т.А., Федоров О.В.</u></b>	
Минимизация основных потерь электроэнергии в электрических сетях напряжением 35 кВ северного региона Луганской Народной Республики путем реновации понизительных подстанций.....	62
<b><u>Попов С.В., Бурмакин О.А., Мальшев Ю.С.</u></b>	
Анализ результатов моделирования электропривода якорной лебедки при питании от судовой сети через согласующий трансформатор .....	67
<b><u>Рак А.Н., Гутаревич В.О., Арзютов И.П.</u></b>	
Современные тенденции применения аккумуляторных батарей в электродвижении морских судов .....	73
<b><u>Рак А.Н., Ключин Б.А.</u></b>	
Выбор муфт для морских судов с дизель-электрической силовой установкой .....	79
<b><u>Решетов Д.Н., Ханеев Е.И.</u></b>	
Датчики глубины: барометрические методы измерения. Ремонт датчиков глубины .....	83
<b><u>Рогожников А.О., Коноваленко А.М., Белов О.А.</u></b>	
Исследование трехфазной асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в среде MatLab Simulink .....	89
<b><u>Рогожников А.О., Мхоян А.А., Баженов Б.В.</u></b>	
Моделирование однофазного трансформатора в среде MatLab Simulink.....	96
<b><u>Ястребов Д.П.</u></b>	
К вопросу создания лабораторного устройства диагностирования протекторной защиты элементов СЭУ и электрохимической защиты корпуса судна .....	102



<b><u>Ястребов Д.П., Лысянский С.П., Белов О.А., Швецов В.А., Волков В.С.</u></b>	
Экспериментальные исследования работы лабораторного устройства диагностирования протекторной защиты элементов СЭУ и электрохимической защиты корпуса судна .....	108
<b><u>Ястребов Д.П., Терновский П.Б.</u></b>	
К вопросу модернизации устаревшего металлообрабатывающего оборудования под современные технологические задачи .....	113
<b><u>Ястребов Д.П., Терновский П.Б., Лысянский С.П.</u></b>	
К вопросу сборки аппаратной части и адаптации структурной схемы под возможности платы управления, используемой в устройстве ЧПУ станка .....	116

## СЕКЦИЯ 2. ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ, ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ И ГУМАНИТАРНЫХ НАУК

<b><u>Андрюхина П.А., Морковин А.В., Портнова О.С.</u></b>	
Применение цифрового двойника для проверки алгоритма балансировки по методу ДКВ.....	120
<b><u>Архипов В.Р.</u></b>	
Сравнение популярных картографических API .....	123
<b><u>Бурденков А.А., Замятин П.А., Поганов Е.В., Тимошенко Е.Е., Юдов А.А.</u></b>	
Проект создания подводного дрона.....	126
<b><u>Бурденков А.А., Замятин П.А., Поганов Е.В., Тимошенко Е.Е., Юдов А.А.</u></b>	
Проведение исследований в рамках реализации проекта по созданию подводного дрона .....	131
<b><u>Бурнаев А.Н.</u></b>	
API системы компьютерного тестирования в ИС «Кафедра».....	136
<b><u>Грунтович Н.В., Капанский А.А.</u></b>	
Анализ влияния температурных колебаний на потребление природного газа в региональных системах газоснабжения .....	141
<b><u>Капанский А.А.</u></b>	
Моделирование давления в системах водоснабжения с применением LSTM-рекуррентных нейросетей.....	146
<b><u>Коваль Е.А.</u></b>	
Разработка нейронной сети для подсчета количества рыб в водоемах.....	151
<b><u>Косенков А.А.</u></b>	
Мониторинг туристических групп с использованием беспилотных дронов.....	153
<b><u>Курбанова Л.В., Клочкова Т.А.</u></b>	
Цветение фито- и зоопланктона в Авачинской губе (Юго-Восточная Камчатка) в 2024 году.....	157
<b><u>Лапин Ю.А., Грибниченко М.В.</u></b>	
Экспериментальное исследование развития крутильных колебаний в пропульсивном комплексе с МОД при медленном и быстром проходе резонансной зоны .....	164
<b><u>Лебедева А.П., Степанова Е.А.</u></b>	
Равновесная влажность, потенциал массопереноса и сорбционная активность некоторых пищевых и кормовых материалов как потенциальных сорбентов.....	169
<b><u>Мартыненко Д.О., Климова А.В., Клочкова Т.А.</u></b>	
Комплексное воздействие металлов на раннее развитие бурой водоросли <i>Fucus distichus</i> в условиях лабораторного культивирования .....	173
<b><u>Рак А.Н., Жуков С.А.</u></b>	
Основные подходы к выбору установок для сокращения выбросов SO <sub>x</sub> с морских судов.....	178
<b><u>Савенко Э.С., Матвиенко С.А.</u></b>	
Применение способа электрогидравлической обработки при восстановлении ответственных деталей ДВС транспортных машин .....	185
<b><u>Талова А.Д., Рожко О.Р.</u></b>	
Автотранспортная нагрузка перекрестков и оценка состояния прибрежных почв Култучного озера .....	189

<b><u>Трибунская Р.М., Тряпицина Д.С.</u></b> Идентификация марок сплавов деталей оборудования зарубежных производителей .....	193
<b><u>Фотченко Г.В.</u></b> Аппроксимация кривых намагничивания стали трансформатора ТРДН-40000/230-У1 применительно к оценке геомагнитно-индуцированных токов.....	196
<b><u>Фотченко Г.В., Белов О.А.</u></b> Численные методы оценки некоторых показателей надежности судовой энергетической установки .....	202
<b><u>Шаповалова Е.В., Волков В.С.</u></b> Об опыте использования стандартного морского разговорника ИМО в учебном процессе подготовки специалистов в морских технических вузах.....	208
<u>Список организаций – участников конференции и их адреса .....</u>	212

## СЕКЦИЯ 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.5.017

**А.Ю. Алтуфьев, Г.С. Мясников, В.А. Швецов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: altufevartem@yandex.ru*

### К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ СТЕНДА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В наше время учебные стенды становятся неотъемлемой частью образовательного процесса, позволяя учащимся изучать автоматизированное оборудование, имитировать реальные ситуации и отрабатывать полученные знания на практике. Для студентов кафедры «Энергетические установки и электрооборудование судов» работа с учебными стендами – это необходимая часть подготовки, ведь с ее помощью будущие специалисты становятся более компетентными.

**Ключевые слова:** учебный стенд, эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматизации, практическая подготовка, автоматизация.

**A.Yu. Altufiev, G.S. Myasnikov, V.A. Shvetsov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: altufevartem@yandex.ru*

### ON THE ISSUE OF USING THE STAND FOR THERMAL CHARACTERISTICS MEASUREMENT

Nowadays, training stands are becoming an integral part of the educational process, allowing students to study automated equipment, simulate real situations and practice their knowledge in practice. The use of training stands is a necessary part of training for students of the "Power plants and electrical equipment of ships" chair because future specialists become more competent.

**Key words:** training stand, operation of marine electrical equipment and automation equipment, practical training, automation.

Для подготовки высококвалифицированных специалистов по направлению «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматизации» в образовательных организациях вводятся практические занятия с учебными лабораторными стендами. Так как такие специалисты обязаны уметь правильно эксплуатировать электротехническое оборудование и понимать его принципы действия, практические занятия необходимы, ведь в ходе их выполнения будут приобретаться перечисленные навыки.

Качественное обучение будущих операторов судового электрооборудования предполагает внедрения современного оборудования, включающего современные способы контроля процесса обучения. Упрощение обучающимся понимания физических процессов, протекающих в модели действующего оборудования, – одна из задач учебных тренажеров.

При прохождении производственной практики на рыбоперерабатывающих судах Камчатского края студенты будут иметь дело с передовыми системами автоматизации и прочими современными технологиями. Для работы с таким оборудованием обучающиеся должны иметь особую подготовку.

Учебные лабораторные стенды способствуют получению нужных умений, которыми будущие специалисты смогут обладать до начала работы в реальных условиях, что, несомненно, приве-

дет к повышению эффективности производственных процессов [1–4]. Программа подготовки специалистов, эксплуатирующих СЭЭС, должна включать отработку и понимание нестандартных режимов работы системы, что в свою очередь влияет на общую безопасность мореплавания.

Учебные лабораторные стенды, как правило, разрабатываются для решения конкретных задач и могут быть использованы для проведения схожих работ. Их габариты зависят от используемого оборудования, такого как двигатели исследуемые и нагрузочные, трубчатые электронагреватели, амперметры, вольтметры, контроллеры РМ, частотные преобразователи, тахометры, источники питания 380 В, источники питания для двигателя постоянного тока и пр.

Стоимость будет различаться в зависимости от использованного в стенде оборудования и перечня возможных проведенных на нем лабораторных работ.

Сравнительный анализ характеристик, функциональности (объем лабораторных работ, которые проводятся на стенде) и стоимость представлены в таблице.

**Модели учебных стендов и их характеристики**

№ п/п	Название	Характеристики	Эксперименты	Стоимость, руб.
1	ОЭП-ОВ-СР	Габариты, мм: 1450×1550×650 Масса, кг: 120 Электропитание: 380 В, 50 Гц	1. Исследования асинхронного двигателя. 2. Исследования преобразователя частоты. 3. Исследования двигателя постоянного тока. 4. Элементы системы управления электроприводов. 5. Исследование системы «Тиристорный преобразователь – Двигатель»	853 720
2	ЭЦиЭМ2-М2-СР	Габариты, мм: 1065×1390×310 Масса, кг: 70 Электропитание: 220 В, 50 Гц	1. Изучение и пробный пуск трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. 2. Исследование работы асинхронного двигателя при номинальном напряжении. 3. Исследование работы асинхронного двигателя при пониженном напряжении. 4. Изучение двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.	455 880
3	ЭЭ-РКУ-АД1	Габариты, мм: 800×600×650 Масса, кг: 75 Электропитание: 380 В, 50 Гц	1. Изучение схемы тепловой защиты асинхронного двигателя на базе теплового реле. 2. Изучение схемы прямого пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. 3. Изучение схемы пуска асинхронного двигателя с пусковыми резисторами. 4. Изучение схемы прямого пуска, остановки и реверса асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. 5. Изучение схемы прямого пуска и динамического торможения асинхронного двигателя в функции времени.	537 600

На учебном стенде ОЭП-ОВ-СР есть возможность выполнять лабораторные работы с асинхронным электроприводом, машиной постоянного тока и преобразователя частоты. В этих работах проводятся исследования механической, электромеханической и регулировочной характеристик двигателя переменного тока, двигателя постоянного тока, систем «преобразователь частоты – асинхронный двигатель», «тиристорный преобразователь – двигатель», а также их энергетической диаграммы [5].

С помощью стенда ЭЦиЭМ2-М2-СР исследуется работа асинхронного двигателя при номинальном и пониженном напряжении. Осваиваются способы пуска, управления и регулирования скорости вращения двигателя переменного и постоянного тока [6].

На стенде ЭЭ-РКУ-АД1 изучаются разные схемы пуска, реверса и остановки асинхронного двигателя, например, с пусковыми резисторами, с концевыми выключателями, с помощью автотрансформатора, в функции времени. Также проводятся исследования динамического торможения электропривода и тепловой защиты электропривода на базе теплового реле [7].

Приведенные в пример стенды обладают широким списком различных лабораторных работ и исследований, которые можно проводить с их помощью, но, несмотря на весь спектр возможностей, ни один из них не позволяет обучающимся в достаточной мере изучить тепловые процессы электропривода.

В Камчатском государственном техническом университете стартовал проект по созданию учебного стенда для измерения тепловых характеристик. Основная цель проекта – повысить эффективность обучения студентов за счет использования современного оборудования и методик. Учебный стенд для исследования тепловых процессов снабжен микроконтроллером и приборами индикации основных параметров системы, управляемых микроконтроллером (рис. 1).

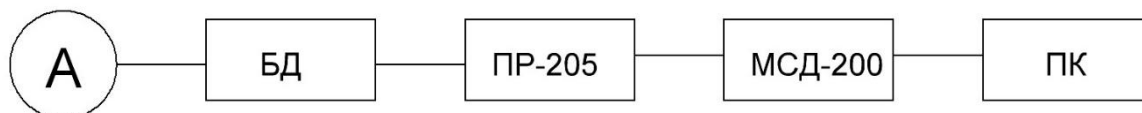


Рис. 1. Структурная схема стенда измерения тепловых характеристик

На структурной схеме изображен состав модулей разрабатываемого лабораторного стенда измерения тепловых характеристик асинхронного электропривода на основе программируемого логического контролера ОВЕН ПР-205 (рис. 2, а) и модуля сбора данных ОВЕН МСД-200 (рис. 2, б). В состав блока датчиков (БД) входит четыре термопары и два трансмиттера температуры.



Рис. 2. Автоматика стенда: а – ПР-205; б – МСД-200

Принцип работы основывается на поступлении из термопар, подключенных к обмотке статора и к коллекторному узлу, сигналов, которые конвертируются через трансмиттер температуры в сигналы 0–10 В и поступают в программируемое реле ПР-205. Оно считывает данный сигнал и отображает значение в виде градусов Цельсия (°C) на встроенном дисплее. Далее полученные значения передаются модулю сбора данных МСД-200 и архивируются на его внутренний носитель в режиме реального времени. Таким образом, представляется возможным сбор данных с блока датчиков (БД) в нужный отрезок времени без участия оператора. Полученные значения можно обрабатывать на встроенном в учебный стенд ПК.

Программирование ПР-205 осуществляется с помощью оригинального приложения от компании ОВЕН «OWEN logic». Для корректной работы учебного стенда пришлось настроить аналоговые входы устройства для чтения сигнала 0–10 В. В памяти ПР-205 были созданы целочисленные переменные, которые и показывают значения температуры блока датчиков (БД). МСД-200 настраивается с помощью приложения «конфигуратор МСД-200». В нем выбирается устройство для опроса (в данном случае ПР-205) и нужные переменные, значение которых будут архивироваться.

Разработка новейших методов обучения способствует повышению квалификации учащихся. Навыки, отрабатываемые на стенде, позволят выпускникам уверенно эксплуатировать современные технологии, используемые на промышленных судах.

### Литература

1. Савенко А.Е. Освоение дисциплины «Судовые электроприводы» как основа практической подготовки судовых электромехаников // Современные тенденции практической подготовки в морском образовании: Материалы I Нац. науч.-практ. конф. (21–22 февраля 2020 г.). – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2020. – С. 119–122.

2. Исследование тепловых процессов асинхронного электродвигателя в продолжительном режиме работы с вариативной нагрузкой / Г.С. Мясников, К.Р. Федосеев, Н.С. Рябовол, О.А. Белов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (9–10 ноября 2023 г.). – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2024. – С. 58–62.

3. Исследование тепловых процессов асинхронного электродвигателя в кратковременном режиме работы с номинальной нагрузкой / К.Р. Федосеев, Н.С. Рябовол, Г.С. Мясников, О.А. Белов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (9–10 ноября 2023 г.). – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2024. – С. 86–90.

4. Клокотов И.Ю. Автоматизация технологических процессов и производств // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2019. – № 3 [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-tehnologicheskikh-protseessov-i-proizvodsty> (дата обращения: 20.10.2024).

5. Учебный лабораторный стенд ОЭП-ОВ-СР [Электронный ресурс]. – URL: <https://labsys.ru/product/elektrotehnika/stendy-dlya-lyudey-s-ogranichennymi-vozmozhnostyami-zdorovyа/osnovy-elektroprivoda-oep-ov-sr/> (дата обращения: 20.10.2024).

6. Учебный лабораторный стенд ЭЦиЭМ2-М2-СР [Электронный ресурс]. – URL: [https://labsys.ru/product/elektrotehnika/elektromekhanika1/elektricheskie-tsepi-i-elektromekhanika-etsiem2-m2-sr/?sphrase\\_id=14382](https://labsys.ru/product/elektrotehnika/elektromekhanika1/elektricheskie-tsepi-i-elektromekhanika-etsiem2-m2-sr/?sphrase_id=14382) (дата обращения: 20.10.2024).

7. Учебный лабораторный стенд ЭЭ-РКУ-АД1 [Электронный ресурс]. – URL: <https://measlab.ru/catalog/stands/elektrotehnika-i-energetika/laboratornaya-ustanovka-po-izucheniyu-releyno-kontaktornogo-upravleniya-asinkhronnym-dvigatелеm/> (дата обращения: 20.10.2024).

УДК 681.5.017

**А.Ю. Алтуфьев, Г.С. Мясников, В.А. Швецов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: altufevartem@yandex.ru*

### **РАЗРАБОТКА СТЕНДА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Разработка учебного лабораторного стенда для измерения тепловых характеристик предоставит обучающимся возможность продемонстрировать свои теоретические знания на практике. Студенты кафедры «Энергетические установки и электрооборудование судов» смогут провести различные исследования по измерению тепловых характеристик электропривода в различных ситуациях. Лабораторные работы со стендом дадут уникальный опыт будущим специалистам и отточат их навыки в сфере электротехники.

**Ключевые слова:** учебный лабораторный стенд, электропривод, эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, разработка стенда.

**A.Yu. Altufiev, G.S. Myasnikov, V.A. Shvetsov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: altufevartem@yandex.ru*

### **DEVELOPMENT OF A THERMAL PERFORMANCE MEASUREMENT STAND**

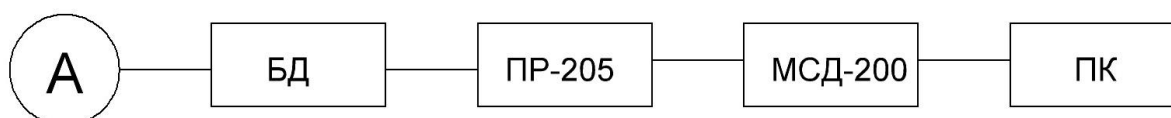
The development of an educational laboratory stand for measuring thermal characteristics provides students with the opportunity to demonstrate their theoretical knowledge in practice. Students of the “Power plants and electrical equipment of ships” chair will be able to conduct various studies on measuring the thermal characteristics of an electric drive in various situations. Laboratory work with the stand will give a unique experience to future specialists and perfect their skills in the field of electrical engineering.

**Key words:** educational laboratory stand, electric drive, operation of ship electrical equipment and automation equipment, development of the stand.

За основу стенда будет отвечать оборудование от компании ОВЕН. Устройства от данного производителя обладают широким спектром возможностей и способны справиться с большинством задач, что позволяет использовать их в проекте.

Оборудование, используемое в проекте, было предоставлено мореходным факультетом кафедре «Энергетические установки и электрооборудование судов» как объект научного исследования.

Поскольку все приборы обладают малыми габаритами, стенд будет выполнен в настольном исполнении. Для считывания и обработки значений было решено использовать оборудование от компании ОВЕН, а именно программируемое реле ПР-205 и модуль сбора данных МСД-200 (рис. 1).



*Рис. 1. Структурная схема стенда измерения тепловых характеристик:  
А – асинхронный электропривод; БД – блок датчиков; ПР-205 – программируемое реле;  
МСД-200 – модуль сбора данных; ПК – персональный компьютер*

Для проведения лабораторных работ по исследованию тепловых процессов было решено использовать термоэлектрические преобразователи ДТП от компании ОВЕН, которые будут подключены к местам измерения температуры электропривода. Чтобы преобразовать изменения напряжения термопар в сигналы 0–10 В, используются температурные транзмиттеры ОВЕН НТП-3.00.12 Ех. Они будут находиться непосредственно вблизи от исследуемого электропривода. МСД-200 присутствует в качестве устройства для сбора и архивирования данных, которые оно считывают с опрашиваемого прибора (ПР-205). Связь между ними проводится по интерфейсу RS-485. RS-485 является стандартом передачи данных между устройствами с помощью витой пары. Такой способ позволит использовать малое количество проводов в проекте.

В стенде также присутствует мини-ПК, на котором можно просматривать архивированные значения температуры, собранные МСД-200, и по необходимости настраивать работу ПР-205 и МСД-200 через специальные приложения.

Для удобства выполнения опытов понадобится разделить рабочее место на две области (рис. 2). В первой будет находиться сам стенд, исследуемый электропривод и устройство для вывода экрана компьютера. Во второй будет осуществляться программирование ПР-205 в среде OWEN logic и работа с показаниями термопар. Такое разделение рабочего места послужит эффективной работе со стендом. После получения указаний по выполнению лабораторной работы оператор сможет подготовить необходимое оборудование в первой области, а затем начать сбор и обработку данных с датчиков. Объектом измерения станет коллекторный узел и обмотка статора электропривода.

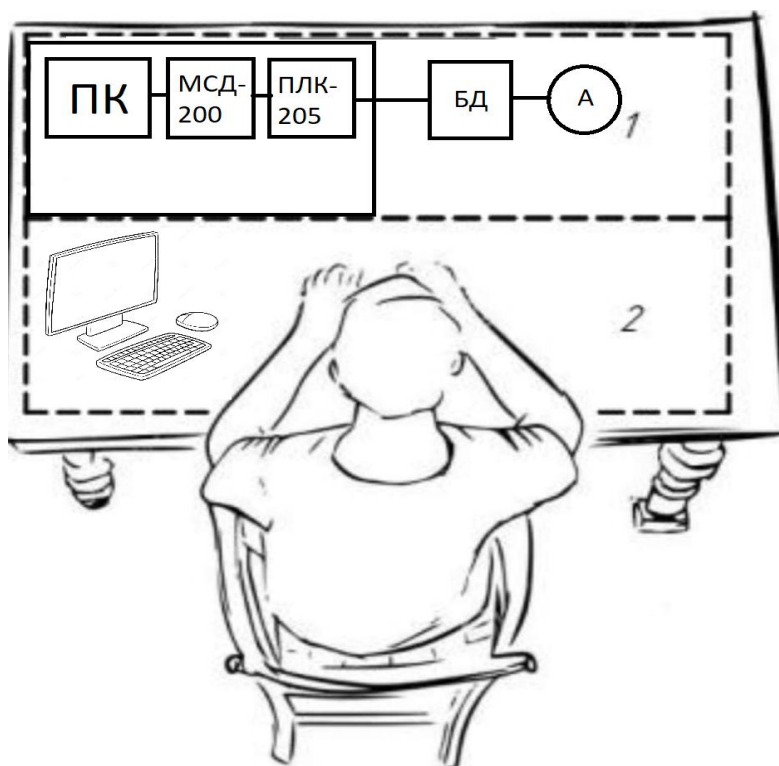


Рис. 2. Рабочее место для работы со стендом

Для работы стенда требуется бытовое питание 230 В частотой 50 Гц, которое он получает через кулачковый переключатель. В стенде находится блок питания 24 В, необходимый для питания МСД-200 и транзмиттеров температуры.

У используемого в стенде ПР-205 имеется шесть универсальных дискретных входов, два быстрых дискретных входа и четыре аналоговых входа [1]. Для стенда измерений тепловых характеристик будут использоваться только аналоговые входы, которых, соответственно, хватает, чтобы подключить четыре термопары. Этого количества датчиков хватает, чтобы провести задуманные исследования, но в случае необходимости возможно внедрить в конструкцию модуль расширения для подключения дополнительных датчиков.



Далее на рис. 3 показан стенд и исследуемый двигатель с нагрузкой (рис. 4).

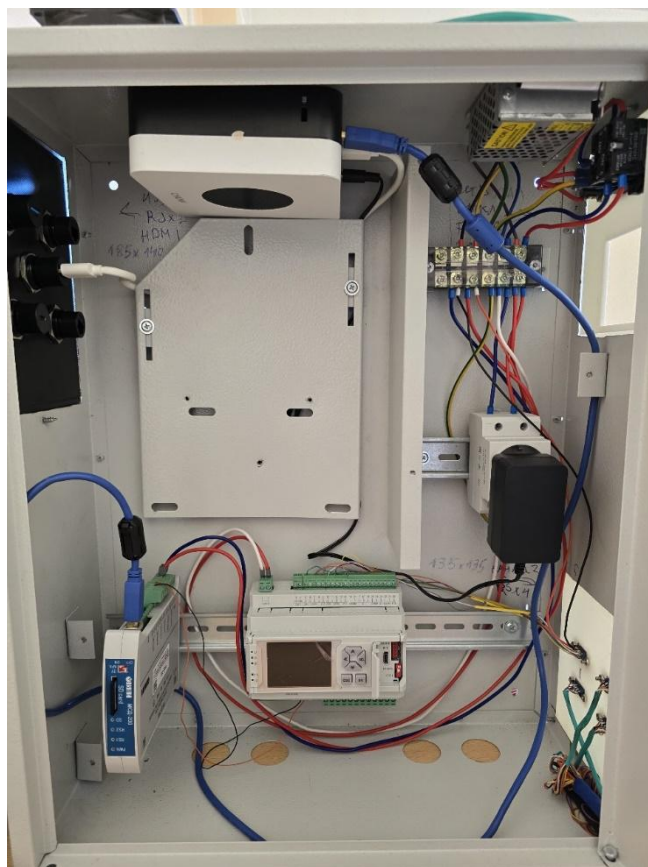


Рис. 3. Разработанный стенд

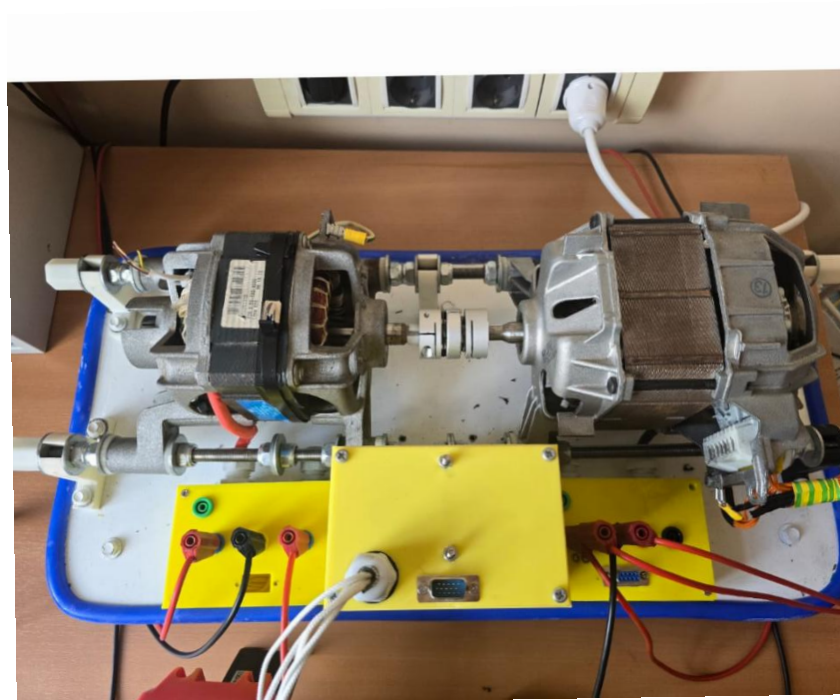


Рис. 4. Исследуемый электропривод

В качестве исследуемого электропривода был выбран трехфазный асинхронный двигатель Ariston CIM2/55-132/AD4. Двигатель имеет мощность 600 Вт и разгоняется до 17 500 оборотов в минуту.

Данный стенд позволит обучающимся отрабатывать навыки работы с актуальным оборудованием, используемым на современных судах. Для повышения квалификации специалистов по эксплуатации судового электрооборудования необходимо применять современные методы обучения. Разработка лабораторных стендов способствует созданию новейших методов обучения, что является основной задачей каждого учебного заведения [2–4].

Опыт, полученный в ходе выполнения лабораторных работ, позволит выпускникам высших и средних учебных заведений безопасно эксплуатировать судовые электроприводы. Таким образом, снизится число аварий и несчастных случаев на производстве [6, 7].

### Литература

1. «ПЛК-63» Контроллер программируемый логический. Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. – URL: <https://owen.ru/manuals> (дата обращения: 25.10.2024).

2. Белов О.А., Толстова Л.А. Моделирование процесса обучения курсантов для формирования навыков технической эксплуатации // Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2016. – № 3 (16). – С. 78–81.

3. Исследование тепловых процессов асинхронного электродвигателя в продолжительном режиме работы с вариативной нагрузкой / Г.С. Мясников, К.Р. Федосеев, Н.С. Рябовол, О.А. Белов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (9–10 ноября 2023 г.). – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2024. – С. 58–62.

4. Исследование тепловых процессов асинхронного электродвигателя в кратковременном режиме работы с номинальной нагрузкой / К.Р. Федосеев, Н.С. Рябовол, Г.С. Мясников, О.А. Белов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (9–10 ноября 2023 г.). – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2024. – С. 86–90.

5. Белов О.А. Оценка безопасности эксплуатации судовых энергетических установок // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2017. – № 42. – С. 6–10.

6. Белов О.А., Зайцев С.А. К вопросу оценки безопасности морских судов камчатского флота // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое: Материалы X Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. (19–21 марта 2019 г.) – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2019. – С. 80–83.

УДК 621.313.33

**О.А. Белов, Г.С. Мясников**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: kletn@yandex.ru*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ОБЩЕСУДОВЫХ СИСТЕМ**

Эксплуатационная надежность судового оборудования является важным фактором поддержания эффективной эксплуатации и безопасного мореплавания судна. Общесудовые системы играют важную роль в функционировании главной энергетической установки, обеспечении жизнедеятельности экипажа и живучести судна. Независимо от назначения общесудовой системы и ее конструктивного исполнения, основным функциональным элементом в ее составе является электропривод исполнительного механизма. Надежная работа электроприводов общесудовых систем непосредственно влияет на эффективность их эксплуатации, обеспечение обитаемости, мореходных качеств судна и живучести. В процессе эксплуатации судовые асинхронные электроприводы подвергаются воздействию различных факторов, связанных как с окружающими условиями, так и с особенностями режимов работы. В результате эксплуатационные параметры электроприводов могут существенно превысить допустимые значения, что может привести к утрате работоспособности электропривода, а значит и работоспособности соответствующей общесудовой системы. Поэтому электрическая защита является важным фактором эффективной эксплуатации судовых электроприводов. В связи с этим одним из способов повышения надежности судовых асинхронных электроприводов является совершенствование их электрической защиты. Разработка и внедрение модульной термозащиты в систему управления асинхронного электропривода является важным направлением повышения эксплуатационной надежности электроприводов общесудовых систем.

**Ключевые слова:** электропривод, техническая эксплуатация, электрическая защита, тепловая защита, термозащита, эффективность, надежность, безопасность.

**O.A. Belov, G.S. Myasnikov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: kletn@yandex.ru*

## **INCREASING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF ELECTRIC DRIVES OF GENERAL SHIP SYSTEMS**

The operational reliability of ship equipment is an important factor in maintaining the efficient operation and safe navigation of a vessel. General ship systems play an important role in the functioning of the main power plant, ensuring the life support of the crew and the survivability of the vessel. Regardless of the purpose of the general ship system and its design, the main functional element in its composition is the electric drive of the actuator. Reliable operation of electric drives of general ship systems directly affects the efficiency of their operation, ensuring habitability, seaworthiness of the vessel and survivability. During operation, ship asynchronous electric drives are exposed to various factors associated with both environmental conditions and the features of the operating modes. As a result, the operating parameters of electric drives can significantly exceed the permissible values, which can lead to the loss of operability of the electric drive, and the operability of the corresponding general ship system. Therefore, electrical protection is an important factor in the efficient operation of ship electric drives. In this regard, one of the ways to improve the reliability of ship asynchronous electric drives is to improve their electrical protection. The development and implementation of modular thermal protection in the control system of an asynchronous electric drive is an important direction for increasing the operational reliability of electric drives of general ship systems.

**Key words:** electric drive, technical operation, electrical protection, thermal protection, thermal protection, efficiency, reliability, safety.

Основным функциональным элементом большинства общесудовых систем является асинхронный электропривод. В процессе эксплуатации на судовые асинхронные электроприводы оказывают неблагоприятное воздействие внешние и внутренние факторы, связанные с условиями эксплуатации и с особенностями режимов работы. В результате эксплуатационные параметры электроприводов могут существенно превысить допустимые значения, что может привести к утрате работоспособности электропривода, а значит и работоспособности соответствующей общесудовой системы. Поэтому электрическая защита является важным фактором эффективной эксплуатации электроприводов общесудовых систем.

Электрическая защита судовых асинхронных электроприводов строится в основном на базе тепловых реле, обладающих ограниченной функциональностью. Кроме того, точность срабатывания таких реле существенно зависит от температуры окружающей среды, которая в процессе эксплуатации судна может изменяться в больших пределах. Повышение функциональности достигается в основном за счет регулирования тепловых уставок этих реле. Однако по ряду причин [1, 2], в том числе вследствие определенной тепловой инерции чувствительных элементов, электрическая защита асинхронных двигателей с применением тепловых реле не обеспечивает достаточную надежность и безопасность эксплуатации [3, 4].

Вместе с тем расширение диапазона применения асинхронных электроприводов, усложнение режимов их работы, в том числе за счет внедрения частотного управления, делает задачу совершенствования электрической защиты достаточно актуальной [5, 6].

Одним из перспективных направлений решения этой задачи является разработка и внедрение модульной системы защиты асинхронных электроприводов на основе программируемого логического контроллера (ПЛК) и одноплатного ПК. Такая модульная система в первую очередь предназначена для электрической защиты асинхронных электроприводов всех типов от нештатных режимов работы. Кроме того, такая система обеспечивает установленные параметры эксплуатации, реализует функцию контроля и повышает надежность и эффективность судового электропривода в целом.

Модульная системы защиты конструктивно состоит из отдельных самостоятельных модулей, позволяющих оптимально подобрать необходимый уровень защиты асинхронного электропривода, в зависимости от ее функционала, типа, мощности, расположения и окружающих условий. Одним из вариантов такой системы защиты может быть модульная система, включающая в свой состав термозащиту.

Термозащита электропривода предназначена для предотвращения температурного разрушения обмоток асинхронного электродвигателя. Структурно модуль термозащиты состоит из универсального электронного контроллера и датчика температуры NTC. В отличие от классического электротеплового реле, термозащита имеет ряд существенных преимуществ.

Основным отличием является процесс измерения и контроля фактической температуры узлов электропривода с высокой точностью при минимальной тепловой инерции, что позволяет заблаговременно и автоматически производить отключение электропривода до наступления необратимых разрушений. Кроме того, термозащита имеет больший срок службы и длительно сохраняет свою первоначальную функциональность, так как, в отличие от классической тепловой защиты, не имеет в конструкции биметаллических пластин и не подключается к силовым цепям электропривода.

Внедрение модуля термозащиты не требует больших трудозатрат и осуществляется без демонтажа силовой цепи электропривода. При этом финансовые затраты на внедрение модуля термозащиты незначительные и не зависят от типа и мощности электропривода.

Наряду с функцией защитного отключения, внедрение модуля термозащиты позволяет расширить функциональные возможности устройства и реализовать функции контроля и сигнализации. Эту возможность обеспечивает цифровая индикация фактической температуры на щите управления электропривода, что позволяет обслуживающему персоналу оперативно реагировать на внештатные ситуации в процессе эксплуатации как самого электропривода, так и общесудовых систем в целом.

В зависимости от типа электропривода и особенностей режимов его работы модуль термозащиты позволяет производить регулировку пороговых значений температуры в широких пределах. При этом обеспечивается оптимальная работа защиты на любых типах электроприводов, в том числе на многоскоростных электродвигателях с переменной нагрузкой. Также предусматривается возможность совместного использования модуля термозащиты с другими типами модульных защит.

Модуль термозащиты (МТЗ) предназначен для осуществления температурного контроля асинхронного электропривода в различных режимах работы. Схема подключения модуля термозащиты представлена на рисунке.

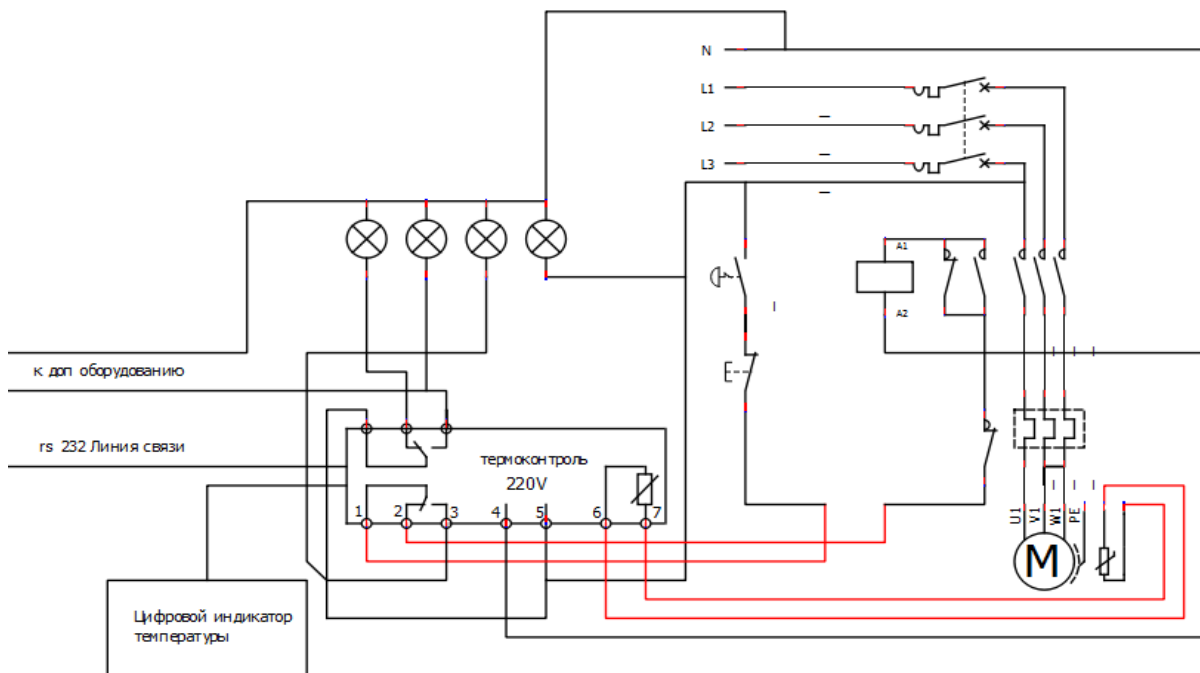


Схема асинхронного электропривода с модулем термозащиты

Основными элементами схемы МТЗ являются ПЛК и датчики температуры NTC. В зависимости от типа электропривода и условий его эксплуатации, на электропривод может быть установлено от одного (на обмотку статора) до пяти (двух на подшипники и до трех на статор) датчика. В случае использования одного датчика на статоре электропривода температура защитного отключения (ТЗО) подбирается в соответствии с классом изоляции электродвигателя. В диапазоне от рабочей температуры (РТ) до ТЗО посредством контактного реле возможно подключение световой и звуковой сигнализации, предупреждающей о скором отключении электропривода по перегреву или включения дополнительного охлаждения, например, принудительного обдува.

При использовании нескольких датчиков, распределенно установленных на конструктивных элементах электропривода, появляется возможность не только контролировать температуру, но и диагностировать причину перегрева. На каждую группу датчиков предназначена отдельная цифровая индикация на щите управления электроприводом и реле для включения дополнительного оборудования, предотвращающего достижения ТЗО.

Используя предложенный подход, наряду с рассмотренными модулями защиты асинхронных электроприводов, возможна разработка дополнительных видов защит [7]. Например, для ряда электроприводов актуально внедрение следующих модулей защиты:

- модуль виброакустической защиты;
- модуль гидрозащиты;
- модуль контроля параметров питающей сети;
- модуль токовой защиты;
- модуль контроля оборотов электропривода;
- модуль защиты электропривода герметичного компрессора;
- модуль связи блоков защиты.

Эти модули защиты могут использоваться как самостоятельно, так и в совокупности с другими модульными системами.

При использовании модуля термозащиты совместно с модулем управления, модулем операторской панели, либо с сетевым модулем, существенно расширяется функционал устройства. В этом случае возможна реализация дополнительных функций:

- регистрация и мониторинг температурных данных;
- регистрация и мониторинг срабатывания защиты и включения дополнительного оборудования;
- дистанционный пуск и остановка электропривода;
- дистанционное изменение внутренних настроек модуля МТЗ;
- дистанционная установка запрета на пуск электропривода при определенных событиях;
- возможность подключения к системам SCADA.

Таким образом, совершенствование электрической защиты на основе программируемых логических контроллеров и современной элементной базы позволяет реализовать внедрение перспективных модульных систем, например модуля термозащиты, и позволяет решить задачу повышения эксплуатационной надежности электроприводов общесудовых систем.

### Литература

1. Быстродействующая температурная защита асинхронного электродвигателя / *В.В. Гурин, Е.В. Лавцевич, П.А. Равинский* // *Агропанорама*. – 2008. – № 2. – С. 28–32.
2. *Зимин Е.Н.* Защита асинхронных двигателей до 500 В. – Изд. 2-е, переработ. и доп. – М. – Л.: Энергия, 1967. – 88 с. с черт. (Библиотека электромонтера. Вып. 209).
3. *Гурин В.В., Равинский П.А.* Направления совершенствования температурной защиты асинхронных электродвигателей // *Агропанорама*. – 2009. – № 1. – С. 28–32.
4. *Кунин Р.З.* Применение встроенной температурной защиты // *Механизация и электрификация соц. сельского хозяйства*. – 1980. – № 10. – С. 42–43.
5. Исследование тепловых процессов асинхронного электродвигателя в продолжительном режиме работы с вариативной нагрузкой / *Г.С. Мясников, К.Р. Федосеев, Н.С. Рябовол, О.А. Белов* // *Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (9–10 ноября 2023 г.)*. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2024. – С. 58–62.
6. Исследование тепловых процессов асинхронного электродвигателя в кратковременном режиме работы с номинальной нагрузкой / *К.Р. Федосеев, Н.С. Рябовол, Г.С. Мясников, О.А. Белов* // *Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (9–10 ноября 2023 г.)*. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2024. – С. 86–90.
7. *Волобуев С.В., Юдаев И.В., Феклистов А.С.* Повышение эффективности тепловых устройств защиты асинхронных двигателей // *Вестник аграрной науки Дона*. – 2018. – № 4 (44). – С. 95–98.

УДК 621.311

**А.Ф. Бурков<sup>1</sup>, В.В. Миханшин<sup>2</sup>, Нгуен Ван Ха<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Дальневосточный федеральный университет,  
Владивосток, 690922*

*e-mail: burkov.22@mail.ru; khanguyenx6@gmail.com;*

<sup>2</sup> *Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,  
Владивосток, 690003*

*e-mail: tetrodaksin@mail.ru*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Повышение энергоэффективности морских судов является одной из основных тенденций в отечественном и в мировом судостроении. Изложенные в «Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года» задачи направлены, в частности, на снижение расхода горюче-смазочных материалов генераторных агрегатов для выработки электрической энергии и на улучшение их эколого-экономических показателей. Учитывая ухудшающуюся экологическую обстановку в мире, рост цен на топливо, а также ужесточающиеся требования ряда нормативно-законодательных документов, в числе которых международный «Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата», принятый в 1997 г., действующие с 2005 г. «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» (Приложение VI «Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов» (МАРПОЛ)), НД №2-020101-143 от 2021 года «Правила по предотвращению загрязнения с судов, эксплуатирующихся в морских районах и на внутренних водных путях Российской Федерации», представляется актуальным решением выше поставленных задач. В статье рассматривается возможность использования валогенераторных установок, выполненных на базе асинхронизированных синхронных генераторов.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, судовая электростанция, валогенератор, асинхронизированный синхронный генератор, экологичность.

**A.F. Burkov<sup>1</sup>, V.V. Mikhanoshin<sup>2</sup>, Nguyen Van Ha<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Far Eastern Federal University,  
Vladivostok, 690922*

*e-mail: burkov.22@mail.ru; khanguyenx6@gmail.com;*

<sup>2</sup> *Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy,  
Vladivostok, 690003*

*e-mail: tetrodaksin@mail.ru*

## **ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT OF MARINE POWER PLANTS**

Improving the energy efficiency of marine vessels is one of the main trends in domestic and global shipbuilding. The objectives set out in the “Strategy for the Development of Marine Activities of the Russian Federation until 2030” are aimed, in particular, at reducing the consumption of fuel and lubricants for generator units for generating electric power, and at improving their environmental and economic indicators. Taking into account the deteriorating environmental situation in the world, rising fuel prices, as well as the increasingly stringent requirements of a number of regulatory and legislative documents, including the international “Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change”, adopted in 1997, the “Rules for the Prevention of Air Pollution from Ships” (Annex VI of the “International Convention for the Prevention of Pollution from Ships” (МАРПОЛ)), in force since 2005, ND No. 2-020101-143 of 2021 “Rules for the Prevention of Pollution from Ships Operating in Marine Areas and Inland Waterways of the Russian Federation”, it seems to be a relevant idea to solve the objectives above. The possibility of using shaft-driven generator units based on asynchronous synchronous generators is analyzed in the article.

**Key words:** energy efficiency, marine power plant, shaft-driven generator, asynchronous synchronous generator, environmental friendliness.



Одним из широко используемых способов экономии моторесурса вспомогательных дизель-генераторов (ДГ) является использование валогенераторных установок (ВГУ), выполненных на основе бесщеточных синхронных генераторов, привод которых осуществляется от свободного конца вала главного двигателя (ГД), или непосредственно от гребного вала через редуктор или через клиноременную передачу. Кроме того, полученная с помощью ВГУ электроэнергия дешевле, чем полученная от ДГ электроэнергия по той причине, что топливо ГД (мазут) значительно (в 1,5...2,0 раза) дешевле дизельного топлива.

ВГУ используются, как известно, при работе ГД с номинальной частотой вращения [1], что необходимо для обеспечения выработки электроэнергии со стабильными параметрами (380 В, 50 Гц). Отклонение частоты вращения вала от номинальной вызывает соответствующее отклонение вырабатываемого напряжения генератора от номинального  $U_{вг. ном}$  и отклонение частоты от номинальной  $f_{вг. ном}$  [2]. При этом если стабилизацию напряжения валогенератора  $U_{вг}$  можно достаточно просто обеспечить с помощью сравнительно недорогого и маломощного регулятора тока возбуждения, то обеспечение номинальной частоты  $f_{вг. ном}$  ВГУ может быть выполнено только с помощью полупроводникового преобразователя частоты (ПЧ), например двухзвенного типа, установленного на выходе генератора. Такое решение характеризуется двумя главными недостатками: во-первых, высокой стоимостью, обусловленной дороговизной ПЧ, мощность которого должна быть не меньшей, чем мощность ВГУ. А во-вторых, пониженным коэффициентом полезного действия (КПД), обусловленным двукратным преобразованием электроэнергии в ПЧ.

Стабилизация частоты вращения вала ВГУ при изменяющейся частоте вращения гребного вала может быть выполнена с помощью редуктора с изменяемым передаточным отношением, установленного между двумя этими валами. Однако этот способ, так же как и предыдущий, характеризуется пониженным КПД, и кроме того, ограниченным ресурсом и повышенной стоимостью, обусловленные наличием такого редуктора.

Из вышесказанного следует, что, несмотря на имеющиеся преимущества судовой электрической станции (СЭС) с валогенераторами, область применения традиционных ВГУ достаточно ограничена: они применяются на судах с винтами регулируемого шага или на судах с длительными переходами, ГД которых работают продолжительное время в номинальном режиме.

Вспомогательные ДГ значительного числа морских судов, таких как суда технического флота, вспомогательные суда, в том числе внутриверфевые и прибрежного плавания, паромы, катера, буксиры и др. эксплуатируются, как известно, с достаточно низким коэффициентом их загрузки, вплоть до 35%. Работа их приводных дизелей при этом характеризуется рядом недостатков, главные из которых это неполное сгорание топлива, которое приводит к повышенному содержанию вредных веществ в выхлопных газах и к росту вероятности закоксовывания маслосъемных

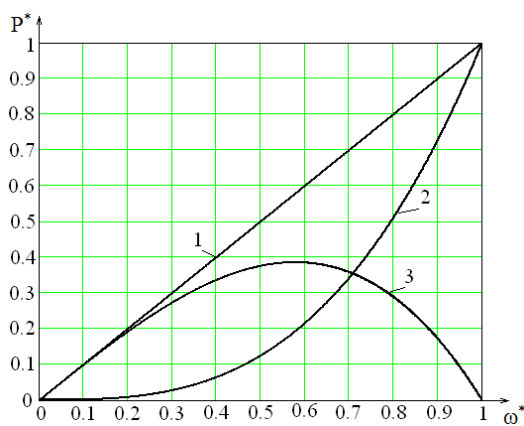


Рис. 1. Зависимости мощности дизеля (1), гребного винта (2) и их разности от частоты вращения (3) в относительных единицах

Из рис. 1 видно, например, что в диапазоне относительной частоты вращения гребного вала  $\omega^* = \omega / \omega_{ном} = 0,5 \dots 0,6$  недогрузка ГД по мощности составит около 40%.

Обеспечение повышения энергетической эффективности СЭС и коэффициента загрузки главных силовых установок происходит без использования дорогостоящего оборудования.

поршневых колец и, соответственно, к уменьшению моторесурса, а также большой удельный расход топлива. Энергоэффективность СЭС при этом снижается, а стоимость электроэнергии оказывается высокой. В то же время ГД вышеперечисленных судов также значительную долю рабочего времени эксплуатируются в частичных (долевых) режимах работы, поэтому им свойственны аналогичные недостатки. Причем для ГД эти недостатки усугубляются тем, что его мощность зависит примерно линейно от частоты вращения, а мощность гребного винта, жестко связанного с ним посредством гребного вала, пропорциональна третьей степени частоты вращения (рис. 1). Из этого факта следует, что при любой частоте вращения, меньшей номинальной, ГД оказывается существенно недогружен по моменту и, соответственно, мощности.



Поставленные задачи могут быть решены несколькими способами. Наиболее очевидным является использование винтов регулируемого шага (ВРШ) вместо винтов фиксированного шага (ВФШ). Скорость хода судна в этом случае регулируется за счет изменения угла атаки лопастей ВРШ при постоянной номинальной частоте вращения гребного вала  $\omega^* = 1$  [3, 4]. При этом появляется возможность отбора избытка мощности от ГД в долевых режимах работы судна и возможность отключения одного или нескольких ДГ, коэффициент загрузки которых оказывается низким, например, менее 55%. Единственным недостатком этого решения является достаточно высокая стоимость ВРШ, превышающая стоимость ВФШ в несколько раз.

Другой способ заключается в использовании асинхронизированных синхронных машин (АСМ). В частности, асинхронизированные синхронные генераторы (АСГ) представляют собой синхронные генераторы, в трехфазные роторные обмотки (возбуждения) которых подается контактным или бесконтактным способом переменный ток, частота и порядок чередования фаз которого определяются скольжением ротора. Магнитный поток ротора при этом вращается с синхронной частотой независимо от его (ротора) частоты вращения, а генератор преобразует механическую энергию вала в электроэнергию с постоянной частотой тока. При этом обеспечивается выполнение третьего закона электромеханики: электромеханическое преобразование энергии осуществляется магнитными полями, неподвижными друг относительно друга. Благодаря этой их особенности АСГ находят широкое применение в ветроэнергетике и малых гидроэлектростанциях, т. е. там, где частота вращения вала нестабильна. Преимуществом АСГ является высокая их устойчивость при параллельной работе благодаря тому, что имеется возможность управления частотой и фазой выходного напряжения независимо от частоты вращения ротора. При векторном управлении током возбуждения может быть достаточно просто решена задача распределения активной мощности без воздействий на топливную рейку приводных двигателей генераторов. Очевидно, что быстродействие системы распределения активной мощности, выполненной на основе ПЧ, на порядки превышает быстродействие традиционной системы, в которой эта задача решается регулированием подачи топлива в приводной двигатель (дизель) с помощью серводвигателя регулятора частоты вращения.

Таким образом, в ВГУ, выполненных на основе АСГ с векторным регулированием тока возбуждения, имеется возможность регулирования как активной, так и реактивной мощности. Следовательно, они являются пригодными для параллельной работы со вспомогательными ДГ. Несмотря на перечисленные преимущества, а также на то, что эти машины известны уже более полувека, теория их достаточно хорошо описана [5, 6], а их разработке и применению посвящена масса работ [7–9 и др.], в судостроении такие машины до сих пор практически не применяются. Этот факт, вероятно, может быть объяснен так называемой общей инерционностью техносферы, сопротивлением инновационному процессу, инерционностью мышления, а также тем, что современные полупроводниковые ПЧ с векторным регулированием появились относительно недавно.

К характерным особенностям АСГ относится, в частности, зависимость мощности обмотки возбуждения  $P_{ОВ}$  от скольжения  $s$ :

$$P_{ОВ} = s \cdot P_{АСГн}, \quad (1)$$

где  $P_{АСГн}$  – номинальная мощность АСГ.

Поэтому при больших скольжениях эффективность использования АСГ будет снижаться из-за потерь на возбуждение.

Кроме того, наиболее эффективная работа таких генераторов может быть обеспечена в том случае, если частота их вращения превышает синхронную, т. к. в этом случае выработка электроэнергии производится как по цепи статора, так и по цепи ротора [10]. Реактивная энергия по цепи ротора при этом будет потребляться для создания магнитного поля в воздушном зазоре. Следовательно, АСГ следует выбирать с номинальной частотой вращения, превышающей частоту вращения гребного вала, или устанавливать повышающий редуктор.

АСМ способны работать и в двигательных режимах с питанием ее обмоток от вспомогательных ДГ, для одиночной работы на гребной винт при отключенных ГД, или для параллельной работы с ГД на гребной винт для увеличения скорости судна. В двигательных режимах мощность обмоток возбуждения также зависит от скольжения и определяется выражением (1).

Вариант функциональной схемы бесщеточной АСМ показан на рис. 2.

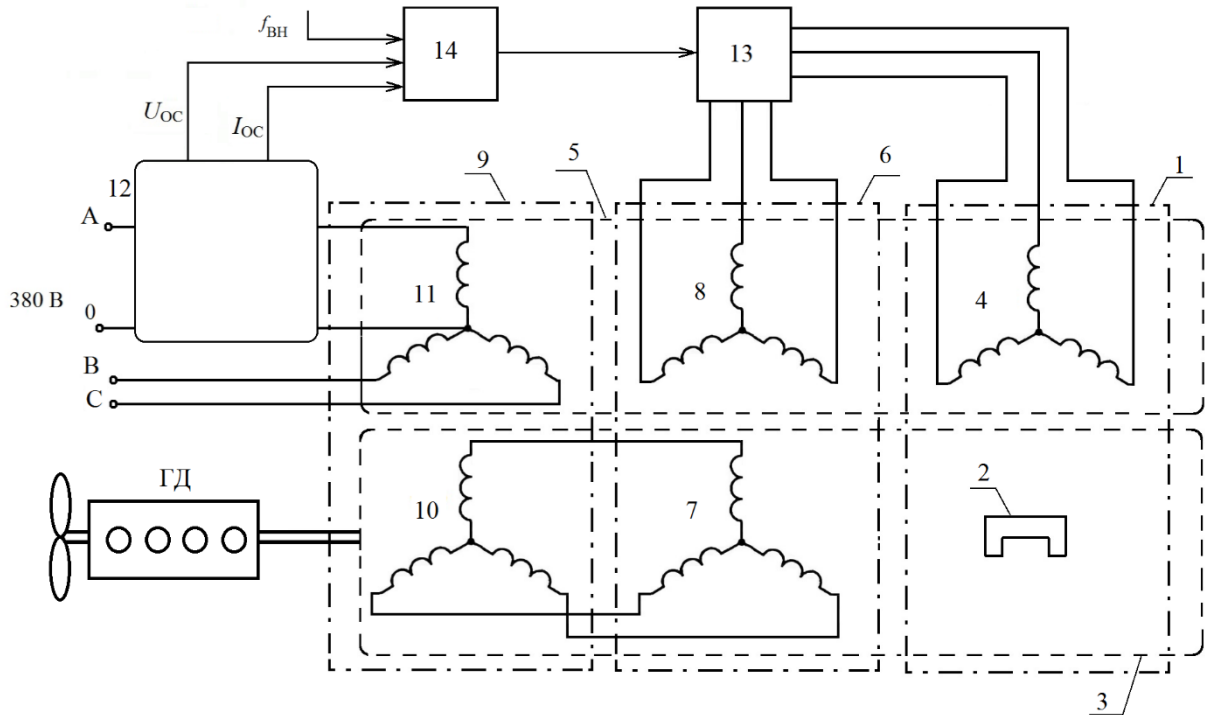


Рис. 2. Функциональная схема АСМ: 1 – генератор начального возбуждения (подвозбудитель) (ГНВ) (2 – постоянный магнит ГНВ; 4 – трехфазная обмотка ГНВ); 3 – ротор АСМ, вращаемый ГД; 5 – статор; 6 – возбудитель (7 – трехфазная роторная обмотка возбудителя; 8 – трехфазная статорная обмотка возбудителя); 9 – АСМ (10 – трехфазная роторная обмотка (обмотка возбуждения) АСМ; 11 – трехфазная статорная обмотка АСМ); 12 – измерительный блок; 13 – полупроводниковый ПЧ с векторным управлением; 14 – система автоматического регулирования тока возбуждения

В генераторном режиме данная АСМ работает следующим образом. При вращении вала ротора 3 от ГД ГНВ (подвозбудитель) 1 вырабатывает электроэнергию, частота которой определяется выражением

$$f = \frac{n \cdot P}{60}, \quad (2)$$

где  $n$  – частота вращения ротора АСМ,  
 $P$  – число пар полюсов обмотки 4.

ПЧ 13 преобразует электроэнергию ГНВ в ток возбуждения, частота которого пропорциональна скольжению ротора, подаваемый в обмотку 8. В трехфазной роторной обмотке 7 возбудителя 6 при этом индуцируется в соответствии с законом электромагнитной индукции электродвижущая сила (ЭДС). Так как данная обмотка 7 соединена с роторной обмоткой 10 АСМ, то по ним протекает одинаковый переменный ток с частотой, равной

$$f_{7/10} = f_8 + \frac{n \cdot P}{60}, \quad (3)$$

где  $f_{7/10}$  – частота тока в роторных обмотках 7 и 10;

$f_8$  – частота тока в статорной обмотке 8 возбудителя.

Знак «+» в выражении (3) означает, что направления вращения ротора и электромагнитного поля, создаваемого обмоткой 8, противоположны друг другу. При этом эта частота  $f_{7/10}$  не зависит от частоты вращения ротора, поэтому в воздушном зазоре, разделяющем статорную обмотку 11 и роторную обмотку 10, частота электромагнитного поля всегда будет номинальной (50 Гц).

Измерительный блок 12 обеспечивает подачу в систему автоматического регулирования тока возбуждения 14 сигналов обратной связи по току и напряжению.

По сигналу от внешних устройств  $f_{\text{вн}}$  (оператора, блока параллельной работы или устройств защиты) обеспечивается отключение АСМ путем прекращения подачи тока в обмотку 8, увеличение или снижение нагрузки АСМ, а также распределение активной и реактивной мощности между параллельно работающими с АСМ генераторами путем соответствующего воздействия на ПЧ 13.

В двигательном режиме АСМ в статорную обмотку 11 подается регулируемое по амплитуде напряжение от вспомогательных ДГ. При вентиляторной нагрузке регулятором может служить недорогой тиристорный регулятор напряжения. АСМ разгоняется как обычный асинхронный короткозамкнутый двигатель. После разгона АСМ в трехфазной обмотке 4 ГНВ генерируется в соответствии с законом электромагнитной индукции переменный ток. В обмотку статора при этом подаются номинальное напряжение с номинальной частотой, а регулирование частоты вращения производится в пределах скольжения  $s_{\text{max}} = 0,3 \dots 0,4$  с учетом допустимых потерь в обмотке ротора путем подачи в роторную обмотку возбуждителя 7 тока от ПЧ 13 с соответствующей частотой.

Предложено эффективное и недорогое решение поставленной задачи – повышение энергоэффективности судовых СЭС и повышения коэффициента загрузки главных силовых установок за счет применения бесщеточных АСМ. Рассмотрен пример конструктивного исполнения бесщеточной АСМ, способной работать как в двигательном, так и в генераторном режимах.

### Литература

1. Гоголев Г.В., Свириденко И.И., Тимофеев В.А. Конструкция, характеристики и эксплуатация современных судовых валогенераторных установок. – Севастополь: СевГУ, 2023. – 24 с.
2. Попов В.В. Основы судовой энергетики. – Керчь: КГМТУ, 2021. – 185 с.
3. Попов Г.А. Системы управления судовыми дизелями. – Изд. 2-е, испр. и доп. – СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2008. – 80 с.
4. Камкин С.В., Возницкий И.В., Большаков В.Ф. Эксплуатация судовых дизельных установок. – М.: Транспорт, 1996. – 432 с.
5. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 193 с.
6. Блоцкий Н.Н., Мамиконянц Л.Г., Шакарян Ю.Г. Исследование и применение асинхронизированных машин в электроэнергетических системах // Электричество. – 1985. – № 12.
7. Котов А.А., Неустроев Н.И. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности // Bulletin of the South State University. Ser. Power Engineering. – 2017. – Vol. 17, № 4. – P. 80–89.
8. Мамиконянц Л.Г., Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные генераторы: состояние, проблемы, перспективы // Электричество. – 1994. – № 3.
9. Данилевич Б.Я., Богуславский И.З. Асинхронизированные синхронные генераторы для малых ГЭС // International scientific journal for alternative energy and ecology (ISJAEE). – 2004. – № 7 (15).
10. Диёргов Р.Х. Построение системы автоматического регулирования активной мощности гидроагрегата мини-ТЭС на основе машины двойного питания: Дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2014. – 153 с.

УДК 621.313

**А.Ф. Бурков<sup>1</sup>, В.В. Миханошин<sup>2</sup>, В.Н. Юрин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Дальневосточный федеральный университет,  
Владивосток, 690922;*

<sup>2</sup> *Морской государственный университет имени адм. Г.И. Невельского,  
Владивосток, 690003  
e-mail: Yurinvn@msun.ru*

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН (ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ)**

Анализ технической эксплуатации электрических машин, являющихся основной составной частью электрооборудования различных отраслей хозяйственной деятельности, включая транспортную, с целью повышения эффективности их функционирования, относится к актуальным научно-техническим задачам современности. Особое внимание при этом уделяется электрооборудованию, эксплуатируемому в условиях повышенных климатических, механических и химических нагрузок, к характерным примерам которого относятся электрооборудование морского транспорта. Статья посвящена краткому анализу технической эксплуатации электрических машин промышленного и транспортного электрооборудования, работающего в специфических эксплуатационных условиях, выявлению основных причин отказов и способов их уменьшения.

**Ключевые слова:** отказ, техническая эксплуатация, электрическая изоляция, электрическая машина, электродвигатель.

**A.F. Burkov<sup>1</sup>, V.V. Mikhanoshin<sup>2</sup>, V.N. Yurin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Far Eastern Federal University,  
Vladivostok, 690922;*

<sup>2</sup> *Marine State University named after Admiral G.I. Nevelskoy,  
Vladivostok, 690003  
e-mail: Yurinvn@msun.ru*

## **TECHNICAL OPERATION OF ELECTRIC MACHINES (ELECTRIC MOTORS)**

The analysis of the technical operation of electric machines, which are the main component of the electrical equipment of various branches of economic activity, including transport, in order to increase the efficiency of their functioning, refers to the actual scientific and technical tasks of our time. Special attention is paid to electrical equipment operated under conditions of increased climatic, mechanical and chemical loads, typical examples of which include electrical equipment for marine transport. The article is devoted to a brief analysis of the technical operation of electric machines of industrial and transport electrical equipment operating in specific conditions and identifying the main causes of failures and ways to reduce them.

**Key words:** failure, technical operation, electrical insulation, electric machine, electric motor.

Интенсивное развитие различных отраслей хозяйственной деятельности, включая транспортную, диктует, в частности, необходимость изготовления и использования в них электрооборудования (ЭО), обладающего соответствующими технико-экономическими характеристиками. При этом к актуальным относятся разработка и совершенствование методик организации технической эксплуатации (ТЭ) [1], диагностических мероприятий по оценке технического состояния ЭО и выполнения ремонтных работ, отвечающих современным требованиям.

Большинство ЭО можно условно подразделить на ЭО силовых установок и устройств управления силовым ЭО.

К силовому ЭО установок относятся многие источники электрической энергии (ЭЭ), силовые преобразователи ЭЭ, приемники ЭЭ, (электродвигатели (ЭД), нагревательные установки, системы освещения и т. д.). ЭО устройств управления отличаются бóльшим, по сравнению

с силовым ЭО, разнообразием, обусловленным в первую очередь их различными элементными базами, формируемыми на основании современных достижений науки и техники. К основным факторам, обеспечивающим устойчивую и безопасную работу по назначению технических изделий, относится безотказное функционирование их ЭО, в частности ЭД.

Выполнение на основании опыта ТЭ и сравнительных оценок анализа функционирования электрических машин (ЭМ) промышленного и транспортного ЭО с целью выявления основных причин их отказов.

На основании анализа ТЭ, используя данные, приведенные в [2, 3], количество отказов между силовым ЭО установок и ЭО устройств управления распределено между собой примерно поровну (составляет до 48% у силового ЭО и около 52% у ЭО устройств управления). При отказах силового ЭО, как правило, более целесообразно выполнение работ по выявлению поврежденных компонентов и их восстановлению, а при отказах устройств управления меняется элементная база их компонентов.

Большинство производственных, бытовых, специальных и других механизмов, используемых в различных отраслях хозяйственной деятельности, включая транспортную, оснащено электроприводами (ЭП). Большая часть потребляемой ЭЭ (около 75% от вырабатываемой мировой ЭЭ [4]) приходится на долю электромеханических преобразователей (ЭД), которые относятся к основным компонентам силовых каналов ЭП.

В процессе эксплуатации ЭД подвержены воздействию на них различных дополнительных внешних факторов (тепловых, механических, химических и других нагрузок), которые оказывают негативное влияние на их функционирование и увеличивают количество их отказов. В табл. 1 представлены основные данные по преимущественным отказам составных частей, эксплуатируемых в береговых условиях электрических машин (ЭМ), выявленным в результате выполненного анализа [2].

Таблица 1

Основные данные по отказам компонентов ЭМ, эксплуатируемых в береговых условиях

Компоненты ЭМ	Отказы, %	
	Бесколлекторные ЭМ	Коллекторные ЭМ
Обмотки статора	91	16
Обмотки ротора, щеточно-коллекторные устройства	7	73
Подшипниковые узлы	1	1
Прочие	1	10

Современные ЭД характеризуются большим многообразием. В системах различных ЭП наиболее широкое применение нашли асинхронные ЭД с короткозамкнутыми роторными обмотками, в меньшей степени – с фазными роторами [5].

Согласно данным по АД, приведенным, например, в [6], причинами наибольшего числа отказов двигателей являются повреждения обмоток и составляет 85–95%. Причинами 2–5% отказов АД являются повреждения их подшипников. Остальные 3–10% отказов возникают по разнообразным причинам и относятся к прочим.

Существенное влияние на безотказную работу ЭД и ЭП в целом оказывают режимы работы  $S$ , определяющие в частности частоту включений ЭД, которые достаточно подробно описаны, например, в [5].

Повышенный интерес представляет анализ опыта ТЭ судовых ЭМ, функционирующих в специфических эксплуатационных условиях. Судовые ЭД подвергаются различным воздействиям (климатическим, механическим, химическим и др.), диктующим повышенные к ним требования.

Обособленные климатические нагрузки обусловлены в первую очередь изменением в широких диапазонах температуры окружающей ЭО среды за сравнительно короткие временные интервалы перехода и нахождения судов в различных местах расположения и повышенной влажностью.

К механическим нагрузкам на судовое ЭО, включая ЭД, относятся: повышенная вибрация, возникающая при работе гребных винтов судовых пропульсивных установок и механизмов; динамические воздействия вследствие ударов посторонних предметов (льдин и др.) о корпуса

судов и их соприкосновение с береговыми причальными сооружениями во время швартовных операций; изменение положения частей ЭО вследствие качек, кренов и дифферентов.

Дополнительные химические нагрузки на судовое ЭО связаны с повышенным содержанием в воздухе соли, масляных паров и топливных испарений.

По данным, представленным в [1], на некоторых основных типах судов количество ЭД превышает 500 единиц.

Оценка эксплуатационно-технических характеристик и свойств судовых ЭД производится на основании аналитических, лабораторных, статистических и др. исследований.

Исследование ТЭ судовых ЭД выполнялось в эксплуатационных условиях. Такой подход позволяет учитывать влияние всех эксплуатационных факторов, на функционирование ЭД, которые трудно обеспечить при испытаниях, и не требует дополнительных затрат на создание лабораторных установок.

В качестве источников статистической информации рассмотрены: судовая эксплуатационно-техническая документация, предъявленные акты-рекламации, результаты анкетирования и опросов судовых электромехаников и специалистов технических служб флота Дальневосточного бассейна.

Результаты анализа проверены на однородность объединяемых выборок.

Судовые ЭД и ЭП в зависимости от режимов эксплуатации можно распределить на основные группы согласно классификации, описанной в [5].

Первая группа включает в себя ЭП, где режимы работы ЭД близки по классификации с обозначением S1 и S6. ЭП второй группы по режимам функционирования подходят к классу S2. Третья группа – ЭП с ЭД, работающими в режимах с обозначением S3...S5, S7 и S8.

По результатам обработанных данных статистических исследований ЭП 89 судов Дальневосточного бассейна определены следующие ориентировочные соотношения отказов на один ЭП между отдельными группами: первая группа – 7%; вторая – 24%; третья группа – 69%.

Судовые ЭП первой группы являются, как правило, нерегулируемыми и нереверсивными приводами [5]. К этой группе относятся, например, ЭП судовых нагнетателей (вентиляторов, насосов и т. п.).

ЭП второй группы в большинстве относятся к регулируемым и реверсивным (брашпилей, подруливающих устройств и т. д.). Нерегулируемыми судовыми ЭП этой группы являются приводы подъемников (траповых и шлюпочных лебедок и др.).

Третья группа включает нереверсивные и нерегулируемые судовые ЭП машинных отделений (компрессоров, гидрофоров и пр.), реверсивных регулируемых ЭП грузоподъемных механизмов (лебедок и кранов).

Судовые ЭП не являются исключением и в своем большинстве также содержат трехфазные асинхронные ЭД.

Основные результаты выполненных исследований по ориентировочным соотношениям неисправностей АД первой и нерегулируемых ЭП второй группы при объеме выборки 458 судовых асинхронных ЭД отечественного и зарубежного производства, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные соотношения неисправностей АД первой и нерегулируемых ЭП второй группы

Виды неисправностей асинхронных ЭД	Соотношения, %
Снижения сопротивления изоляции обмоток ниже допустимых норм	40
Пробой электрической изоляции на корпус, межвитковые замыкания	24
Выгорания витков обмоток	19
Обрывы обмоток	11
Повреждения подшипниковых узлов	6

Согласно полученным результатам, основными неисправностями АД первой и нерегулируемых ЭП второй группы являются снижения сопротивления изоляции их обмоток ниже допустимых норм (табл. 2).

Регулируемые судовые ЭП второй и третьей групп во многих случаях содержат многоскоростные АД, чаще трехскоростные.

В результате исследований определено, что суммарная активная мощность многоскоростных АД, применяемых в ЭП на судах Дальневосточного бассейна, различна и зависит от назна-

чения судна. Так, у судов для перевозки генеральных грузов составляет 36% от общей установленной мощности всего судового ЭО. У судов для перевозки массовых грузов это 27%, для контейнеровозов 12%, для судов с рефрижераторными установками 9%.

Анализ опыта эксплуатации многоскоростных АД (выборка 347 АД различных производителей) позволил определить основные причины отказов и их примерные соотношения. Результаты анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3

Примерные соотношения основных причин отказов судовых многоскоростных АД

Виды неисправностей асинхронных АД	Соотношения, %
Снижения сопротивления изоляции обмоток ниже допустимых норм	28
Пробой электрической изоляции на корпус, межвитковые замыкания	29
Выгорания витков обмоток	21
Обрывы обмоток	10
Повреждения подшипниковых узлов	12

По данным табл. 3, основные причины отказов многоскоростных АД обусловлены неисправностями электрических изоляций (ЭИ) их обмоток.

Безотказная работа многоскоростных АД судовых реверсивных ЭП второй и третьей групп во многом определяется особенностями их эксплуатации, неотъемлемой частью которых являются частые пуски, электрические торможения (до 120 и более в час), знакопеременные нагрузки, изменяющиеся от нулевой до номинальной, и широкие диапазоны изменения скоростей.

Характерной особенностью ЭИ, которая оказывает непосредственное влияние на работу ЭМ, является незначительное изменение их качественных характеристик при относительно низких температурах. В условиях же тропических климатов одновременные воздействия температуры и влажности оказывают повышенное влияние на снижение технического состояния (ТС) ЭИ [6].

На ЭИ обмоточных проводов ЭМ (табл. 3 и 4) наиболее неблагоприятное влияние оказывают указанные внешние факторы, снижая их изоляционные свойства, разрушая поверхностные слои ЭИ, ускоряя старение и др.) [6, 7]. При этом их влияние сопровождается возникновением трещин в изоляционных материалах, снижением их сопротивления, вследствие чего возрастает вероятность образования электрических пробоев токопроводящих жил на корпус, а также приводит к нарушению герметичности, увеличивая возможности частичного вытекания компаундов. Кроме того, формирование трещин внутри изоляций относится к основным причинам уменьшения механической прочности обмоточных проводов АД, а также образования частичных разрядов в полостях ЭИ, которые приводят к перераспределению напряженностей по толщине изоляционных материалов [8].

Согласно результатам анализа отказов, приведенным в [4], повышенная влажность окружающей среды значительно активизирует абсорбционные и сорбционные процессы влаги в электроизоляционных материалах, снижая электрическую прочность ЭИ. Нарушение поверхностных слоев ЭИ сопровождается проникновением в сформированные пустоты влаги, которая является причиной процессов ионизации и локальных пробоев изоляции [4].

Наиболее отрицательное влияние попадание влаги оказывает на качественные характеристики микалентной изоляции, которое возрастает с увеличением температуры. Проникновение влаги на различные глубины структур ЭИ вызывает попеременное увлажнение и высыхание изоляционных материалов. При таких процессах в разной степени изменяются размеры различных слоев ЭИ.

На преждевременное разрушение ЭИ ЭМ оказывают влияние и изменения температурных режимов, а также интенсивность работы.

По данным, приведенным в [6], число отказов ЭМ ориентировочно составляет 31% весной, 27% осенью, 25% летом и 17% зимой.

Коэффициент корреляции между временем безотказной работы ЭМ и временем работы в течение суток составляет  $0,50 \pm 0,08$ .

Длительное воздействие повышенной влажности на АД судов морского транспорта приводит к более активному ухудшению свойств их ЭИ. При этом увеличиваются токи утечки и потери в изоляции по причине снижения электрического сопротивления.

Срок эксплуатации ЭО судов, включая ЭД, составляющий от 15 до 25 лет, приводит к увеличению числа отказов, связанных с износом и старением ЭИ.

В общем случае воздействие морского тропического климата на ЭД судов морского транспорта приводит к необратимым последствиям в структуре их ЭИ в результате разрушений многих органических соединений. Наиболее сильно это проявляется у ЭД, установленных на открытых палубах. Сочетание повышенной влажности с относительно высокими температурами ЭИ оказывает повышенное отрицательное влияние на ТС изоляций ЭД.

При работе ЭД в машинных, котельных и других судовых помещениях непосредственное влияние на их ТС оказывает повышенная концентрация производных нефтесодержащих продуктов. К снижению качественных характеристик изоляционных материалов двигателей ведет повышенная агрессивность окружающей среды и относительно высокая температура в помещениях.

При эксплуатации ЭД электрическая прочность изоляций зависит от качества выполняемых ремонтно-восстановительных работ. Существенное значение имеют технологические процессы восстановления и сушки жидких изоляционных материалов (лаков, эмалей и т. д.).

Данные, приведенные в [4, 8], подтверждают аналогичные выводы.

Обнаружение развивающихся дефектов на ранних стадиях их возникновения позволяет предупреждать внеплановые выводы из эксплуатации ЭД, связанные с их авариями.

К эффективным мероприятиям, направленным на уменьшение количества отказов ЭД в процессе их эксплуатации, относится использование современных методов испытаний и систем диагностики [9]. Переход от системы планово-предупредительного обслуживания к системе обслуживания по состоянию с применением методов неразрушающего контроля позволяет определить частичные дефекты в ЭМ, в том числе проблемные участки ЭИ.

К характерным особенностям современного промышленного и транспортного ЭО относится большое разнообразие его функционального назначения и широкий диапазон мощностей.

Основными составными частями (компонентами) промышленного и транспортного ЭО представляются ЭД, которые потребляют примерно 75% вырабатываемой в мире ЭЭ.

На основании выполненного обзора и анализа ЭМ, работающих в береговых условиях, установлено, что наибольшее число отказов у бесколлекторных ЭМ (91%) приходится на обмотки их статоров, а у коллекторных (64 %) – на обмотки ротора и щеточные устройства. Повреждения обмоток являются причинами наибольшего числа отказов (до 95%) АД.

Условия эксплуатации судовых ЭМ существенно отличаются от береговых, и поэтому анализ опыта ТЭ представляет повышенный интерес.

Доказано, что количество установленных на судах ЭД составляет, как правило, сотни единиц (в некоторых случаях более 500).

В статье сформулированы основные принципы подхода к работе со статистическими данными по судовым ЭД.

По режимам эксплуатации ЭД судовых ЭП могут быть условно объединены в три основные группы: первая – близкие к типовым режимам S1 и S6; вторая – к S2; третья – к S3...S5, S7 и S8. Ориентировочные соотношения отказов на один ЭП по группам составляют 7; 24 и 69%, соответственно.

Произведены долевыe расчеты участия ЭД регулируемых ЭП в общем потреблении ЭЭ на судах Дальневосточного бассейна. Суммарная мощность многоскоростных ЭД составляет до 36% от установленной активной мощности судового ЭО (у судов для перевозки генеральных грузов).

Выполнены сбор и обработка информации по отказам ЭД ЭП судов Дальневосточного бассейна. Определено, что основными причинами отказов АД ЭП первой и нерегулируемых ЭП второй группы являются снижения сопротивления изоляции обмоток ниже допустимых норм, составляющие около 40% от всех неисправностей ЭД. Основными причинами отказов многоскоростных АД судовых ЭП второй и третьей групп являются пробой ЭИ на корпус и межвитковые замыкания, которые составляют 29% от общего числа неисправностей ЭД.

К наиболее эффективным мероприятиям, направленным на поддержание в пределах допустимых норм качественных характеристик ЭИ и ЭД в целом относятся внедрение и использование в процессе их эксплуатации современных методов диагностики, испытаний и контроля, переход к системе обслуживания по состоянию с применением методов неразрушающего контроля.



### Литература

1. Бурков А.Ф. Техническая эксплуатация электроприводов судов. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 358 с.
2. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Надежность электрических машин. – М.: Академия, 2010. – 288 с.
3. Кузнецов С.Е., Филев В.С. Основы технической эксплуатации судового электрооборудования и автоматики. – СПб.: Судостроение, 1995. – 448 с.
4. Бурков А.Ф., Николаев Д.С., Юрин В.Н. Улучшение характеристик электроизоляционных материалов обмоток электрических машин. – М.: ИНФРА-М, 2022. – 156 с.
5. Бурков А.Ф. Основы теории и эксплуатации судовых электроприводов. – СПб.: Лань, 2023. – 340 с.
6. Сюбаев М.А. Техническая эксплуатация и оценка состояния изоляции судовых электрических машин. – СПб.: ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2008. – 31 с.
7. Воробьев В.Е., Кучер В.Я. Прогнозирование срока службы электрических машин. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56 с.
8. Самигуллина Р.Х. и др. Исследование влияния эксплуатационных факторов на надежность электрических машин // Научный альманах. – 2016. – № 10-3 (24). – С. 238-242.
9. Вильданов Р.Г. и др. Разработка методики оценки технического состояния изоляции обмоток статора электродвигателей напряжением выше 1000 В // Научный журнал. – КубГАУ. – № 159(05). – 2020.

УДК 629.584

**Р.А. Гараев, А.Д. Змеев, А.О. Рогожников, В.С. Волков**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: artem.klas10@gmail.com*

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДВОДНОГО ДРОНА С УСТАНОВЛЕННОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОБИРКОЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДНОЙ БИОСФЕРЫ**

В статье рассматриваются перспективы использования подводного дрона модульной конструкции с установленной на нем технической пробиркой для исследования водной биосферы и сбора различных образцов. Авторы подчеркивают значимость использования современных технологий для мониторинга состояния водных экосистем и выявления потенциальных угроз для их сохранения. Проводится анализ применения такой технологии для изучения различных аспектов водной среды, включая состав и структуру водных экосистем, а также мониторинг качества воды. Описываются преимущества использования подводных дронов в сравнении с традиционными методами исследования водной биосферы. В заключение авторы делают вывод о важности интеграции современных технологий в исследования водной среды для улучшения наших знаний о водной биосфере и поддержания ее экологического равновесия.

**Ключевые слова:** водная биосфера, подводный дрон, техническая пробирка, гидробионт, экосистема.

**R.A. Garaev, A.D. Zmeev, A.O. Rogozhnikov, V.S. Volkov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: artem.klas10@gmail.com*

### **PROSPECTS FOR USING AN UNDERWATER DRONE WITH AN INSTALLED TECHNICAL TEST TUBE TO STUDY THE AQUATIC BIOSPHERE**

The prospects for using a modular underwater drone with a technical test tube installed on it to study the aquatic biosphere and collect various samples are presented. The authors emphasize the importance of using modern technologies to monitor the state of aquatic ecosystems and identify potential threats to their conservation. The analysis of the application of such technology to study various aspects of the aquatic environment, including the composition and structure of aquatic ecosystems, as well as monitoring water quality is made. The advantages of using underwater drones in comparison with traditional methods of studying the aquatic biosphere are described. The authors conclude that it is important to integrate modern technologies into aquatic research to improve our knowledge of the aquatic biosphere and maintain its ecological balance.

**Key words:** aquatic biosphere, underwater drone, technical test tube, hydrobiont, ecosystem.

Водная биосфера – это одна из основных частей экологии нашей планеты, от которой зависит как дальнейшее поддержание жизни на Земле, так и ее качество. Создание системы постоянного мониторинга и изучения водной биосферы является актуальной задачей для современных наук. Исследование водной биосферы заключается в сборе информации при отслеживании ее основных показателей, характеризующих текущее состояние водной среды и основные угрозы, с которыми ей приходится сталкиваться. Собранный информация после ее обработки и тщательного анализа позволяет принимать необходимые меры по сохранению биоразнообразия и улучшению качества воды, а также прогнозировать дальнейшую вероятность возникновения различных экологических ситуаций. Важно отметить, что изучение водной экосистемы позволяет выявлять взаимосвязь между живыми организмами и окружающей их средой, что является ключевым параметром для понимания принципов дальнейшего устойчивого развития [1].

Еще одним преимуществом ведения непрерывного мониторинга водной биосферы является возможность прогнозировать изменения климата, а также проводить анализ их влияния на сезонные погодные явления. Тщательный анализ состояния водной биосферы в ряде случаев помогает предотвращать катастрофические события, в результате которых может происходить вымирание популяций, а в некоторых случаях и целых видов живых организмов.

Современные технологии и методы исследования позволяют получать более точные и полные данные о состоянии водной экосистемы, а также значительно снижают затраты и позволяют систематизировать проведение замеров различных параметров. Одним из таких перспективных инструментов для исследования водной биосферы являются подводные дроны с установленными на них различными техническими приспособлениями [2].

Подводные дроны представляют из себя сложные устройства, зачастую оборудованные камерой и различными датчиками, которые позволяют собирать данные о водной среде, а также подробнее исследовать морское дно. Основным инструментом, позволяющим исследовать водное пространство, является бортовая камера с функцией инфракрасного видения, записывающая весь материал на жесткий диск. Далее полученные фото- и видеоматериалы сравниваются с прошлыми данными и изучаются специалистами из области гидроэкологии и океанографии. Для расширения технического функционала на подводные дроны устанавливаются дополнительные инструменты и оборудование. Одним из таких инструментов, является механический манипулятор, который позволяет выполнять сбор образцов морских растений и грунта морского дна [3]. Установка специальной технической пробирки на подводный дрон открывает ряд возможностей и преимуществ в области исследования водной биосферы, позволяя брать пробы с разной глубины и местоположения.

С помощью подводных дронов можно собирать пробы воды, образцы морской породы и биологических организмов для анализа в лаборатории. Это открывает новые возможности для мониторинга биологического разнообразия, состояния экосистем и воздействия человеческой деятельности на морскую среду. Предлагаемый способ, при котором пробы воды и гидробионта берутся подводным дроном с установленной технической пробиркой, имеет ряд преимуществ по сравнению с классическим методом, когда специализированная команда водолазов погружается на глубину для сбора образцов.

Кроме исследовательских задач, подводный дрон также может заниматься диагностированием уровня коррозионной защиты у судов, что позволяет значительно продлить срок эксплуатации судна. Одним из условий эффективного решения данной задачи является организация на судах контроля состояния коррозионной защиты [4]. Для мониторинга контроля также можно использовать подводный дрон.

Основным преимуществом предлагаемого решения является безопасность персонала, поскольку при сборах проб воды и гидробионтов с использованием подводного дрона человек управляет всем процессом дистанционно и не погружается в воду. Кроме того, использование дрона позволяет значительно снизить затраты и повысить общую эффективность благодаря более простой процедуре взятия проб. После сбора полученные образцы используют в лаборатории, где они подвергаются различным анализам, экспериментам и физико-химическим и биологическим тестам. К примеру, для определения общего состояния водной биосферы проводятся измерения pH, содержания кислорода и иных параметров. Такие анализы позволяют провести общую оценку качества изучаемой водной экосистемы и выявить основные факторы, оказывающие как негативное, так и положительное влияние на нее.

Для реализации предлагаемого способа сбора подводных образцов и проб на кафедре «Энергетические установки и электрооборудование судов» в КамчатГТУ разрабатывается свой подводный дрон модульной конструкции. Особенность этого дрона заключается в модульной конструкции, которая представляет собой возможность присоединения различных сменных модулей.

На данный момент уже разработана механическая клешня, которая имеет два хвата из металла с острыми ребрами жесткости. В ее основе лежит водостойкий шаговый двигатель, имеющий питание в 24 В и обладающий скоростью вращения в 2 800 об/мин, что позволяет полностью открывать и закрывать клешню за 2,5 с. Ее максимальная сила сжатия составляет 14 кг, диаметр открытия 12 см, что вполне достаточно для того, чтобы поднимать и передвигать небольшие объекты массой до 7 кг, длиной до 20 см, шириной до 8 см. Сама масса клешни составляет 650 г. Класс защиты будет соответствовать IP68, что позволит погружать устройство на глубину до 50 м на 2 часа, а рабочий диапазон температуры составляет от -15 до 40°C [5].

Кроме уже разработанной механической клешни планируются следующие модули: инженерная лопатка, которая позволит брать образцы подводного грунта, и техническая пробирка, позволяющая осуществлять взятие образцов воды и проб гидробионта. Визуализация технической пробирки представлена на рис. 1.

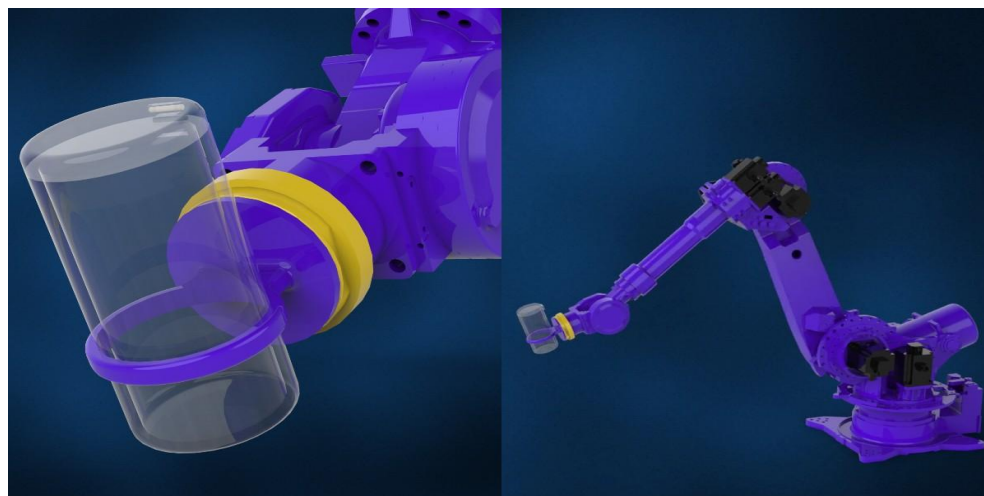


Рис. 1. Визуализация технической пробирки

Модульность конструкции заключается в том, что все сменные модули будут иметь унифицированный разъем подключения и одинаковые элементы крепления к подводному дрону. Такое техническое решение позволяет экипировать подводный дрон тем инструментом, который необходим в конкретной ситуации и для конкретной цели. Проектируется техническая пробирка с вмещаемым объемом 300 мл, которая будет устанавливаться на разрабатываемый подводный дрон модульной конструкции. Все подвижные элементы будут работать от специализированных герметичных сервоприводов, изолированных при помощи разъемов, силиконовых вставок и резьбовых соединений. Корпус технического модуля планируется выполнять из АБС пластика на 3D-принтере. Модуль техническая пробирка предполагается использовать для сбора проб воды и гидробионта, что является уникальным устройством в Камчатском крае.

В рамках разработки подводного дрона модульной конструкции собран макет подводного дрона, фотографии которого представлены на рис. 2.



Рис. 2. Фотографии макета подводного дрона

Корпус макета изготовлен из нержавеющей стали толщиной 5 мм. С двух сторон имеются крышки, одна из которых, передняя, выполнена из оргстекла, задняя – из эпоксидной смолы. На задней крышке расположены разъемы для безопасного подключения электродвигателей и пульта управления к подводному дрону. Макет комплектуется четырьмя электродвигателями [6]. Крепления для электродвигателей напечатаны из АБС пластика. Макет подводного дрона комплектуется инфракрасной камерой. Внутри корпуса находятся элементы электроники и автоматики, а также аккумулятор, благодаря которому дрон способен работать на протяжении двух часов. Управление подводным дроном осуществляется специальным пультом управления, который выполнен в форме пластмассового кейса. В верхней части установлен дисплей, на который передается изображение с камеры на подводном дроне. В нижней части кейса находятся платы управления, аккумулятор, вольтметр и джойстик управления.

Одним из инновационных направлений в развитии подводных дронов является установка технической пробирки, которая открывает новые перспективы для исследований под водой. Основным преимуществом использования подводного дрона с установленной технической пробиркой является возможность сбора образцов и различных объектов, под водой с высокой мобильностью. Техническая пробирка позволяет захватывать различные материалы, образцы грунта, воды, биологические образцы, отложения и другие объекты для дальнейшего анализа и исследования. Это позволяет значительно расширить возможности для исследования водной экосистемы и всех составных ее частей.

Использование подводных дронов с установленной технической пробиркой может быть широко использовано в морской отрасли, причем сфера применения практически не ограничена. Данное техническое решение позволяет исследователям и специалистам получать более точные и надежные данные о состоянии водных ресурсов с определенной периодичностью, что позволяет построить уже целую модель водной биосферы, тем самым выявить оптимальное значение использования природных ресурсов.

Кроме того, использование подводного дрона с технической клешней может повысить эффективность и скорость исследований водных пространств и морского дна, в частности, обеспечивая возможность составления карт местности и глубоководных труднодоступных пещер. Это позволяет расширить границы исследований под водой и получить новые знания о мире, скрытом под водной гладью. В общем и целом перспективы использования подводных дронов с установленной технической пробиркой в исследованиях морской среды не ограничены определенной сферой деятельности.

Подводя итог вышесказанному, хочется еще раз отметить, что использование подводного дрона с установленной технической пробиркой представляет собой перспективный и высокоэффективный инструмент для исследований под водой, который открывает новые возможности для изучения, мониторинга и охраны водных экосистем. Также стоит помнить, что дальнейшее развитие и применение этой технологии могут значительно улучшить наше понимание протекания различных процессов в водной биосфере, что способствует сохранению биологического разнообразия и устойчивому использованию водных экосистем.

### Литература

1. *Змеев А.Д., Рогожников А.О., Ястребов Д.П.* Разработка и организация испытаний подводного дрона модульной конструкции // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование: Материалы Тринадцатой нац. науч.-практ. конф. (Петропавловск-Камчатский, 22–23 марта 2022 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 97–101.
2. *Гараев Р.А., Рогожников А.О.* Разработка робота-манипулятора для работы в морских условиях // Молодежь. Наука. Инновации. – 2023. – Т. 1. – С. 616–621.
3. *Гараев Р.А., Рогожников А.О.* Перспектива использования робота-манипулятора в различных отраслях // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф. (Петропавловск-Камчатский, 18–21 октября 2022 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 57–60.
4. *Рогожников А.О., Белов О.А.* Разработка программного обеспечения обработки данных для автоматизированного устройства контроля коррозионной защиты // Техническая эксплуатация

водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Четвертой междунар. науч.-техн. конф. (Петропавловск-Камчатский, 25–26 ноября 2021 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 63– 68.

5. *Гараев Р.А., Змеев А.Д.* Перспектива эксплуатации подводного дрона с установленной механической клешней // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (Петропавловск-Камчатский, 09–10 ноября 2023 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2024. – С. 39–42.

6. *Змеев А.Д., Рогожников А.О.* Натурные испытания по подбору мощности освещения для подводного дрона модульной конструкции // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Пятой междунар. науч.-практ. конф. (Петропавловск-Камчатский, 18–21 октября 2022 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 109–112.

УДК 550.389.5(571.66)

**А.С. Гладких**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: Alinagolden01@mail.ru*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ КАМЧАТСКОГО КРАЯ  
ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 10 МАЯ 2024 ГОДА**

Используя локальную электросеть Камчатского края, в частности электрическую линию на Мутновскую геотермальную электростанцию, получены и анализируются результаты измерения уровня высших гармоник промышленного тока. Исследования представили возможность диагностики ГИТ на основе оценки вариаций высших гармоник промышленного тока и показали, что четные гармоники, а именно четвертая, шестая и восьмая, хорошо коррелируют с изменениями магнитного поля Земли. На основе полученных данных и их интерпретации стало возможным показать влияние геомагнитно-индуцированных токов на параметры высоковольтных линий электропередачи. Впервые показано наличие в составе тока, протекающего в линии электропередачи колебаний с периодом около 20 секунд, что соответствует параметрам геомагнитных пульсаций Pc3.

**Ключевые слова:** геомагнитно-индуцированные токи, высшие гармоники промышленного тока, высоковольтная линия электропередач.

**A.S. Gladkikh**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: Alinagolden01@mail.ru*

**STUDY OF GEOMAGNETIC-INDUCED CURRENTS IN THE ELECTRIC NETWORKS  
OF THE KAMCHATKA TERRITORY DURING A MAGNETIC STORM  
ON THE 10<sup>th</sup> OF MAY, 2024**

Using the local power grid of Kamchatka region, in particular the electric line to the Mutnovskaya geothermal power plant, the results of measuring the level of higher harmonics of industrial current are obtained and analyzed. The studies provided the possibility of diagnosing the GIC based on the assessment of variations in higher harmonics of industrial current and showed that even harmonics, namely the fourth, sixth and eighth, correlate well with changes in the Earth's magnetic field. Based on the obtained data and their interpretation, it became possible to show the influence of geomagnetic-induced currents on the parameters of high-voltage transmission lines. The presence of oscillations in the current flowing in the power line with a period of about 20 seconds was shown first time, which corresponds to the parameters of geomagnetic pulsations Pc3.

**Key words:** geomagnetic-induced currents, industrial current harmonics, high-voltage power line.

Проблема воздействия геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) на электротехнические системы является актуальной и важной, поскольку постоянное и бесперебойное снабжение электроэнергией критически важно для всех сфер человеческой жизни. В 1989 г. была зафиксирована сильнейшая геомагнитная буря, произошедшая во время 22-го цикла солнечной активности. Это событие 13 марта 1989 г. привело к крупнейшей аварии в электрической сети канадской провинции Квебек. Для оценки влияния ГИТ на электрические сети в мировой практике используется подход, основанный на измерении параметров ГИТ в нейтральном проводе. Так измеряют в Финляндии и на Кольском полуострове. Такой способ измерения предполагает установку дополнительного оборудования в систему электроснабжения, что вызывает трудности в получении разрешения эксплуатирующих организаций. Второй метод основывается на вычислении ГИТ,

исходя из данных магнитометрических станций. Этот метод предполагает построение модели электротехнической системы, которая учитывает множество факторов, таких как конфигурация и топология проводников системы, электродинамические характеристики подстилающей поверхности и т. д. Существует и другой способ, разработанный и апробированный на Камчатке [1–4], а именно измерения влияния ГИТ на электрические сети путем оценки вариаций высших гармоник промышленного тока. На этом методе и основываются наши измерения. Чтобы провести анализ данных использовалась оценка корреляции между вариациями магнитного поля Земли и величиной гармоник в сети.

В начале статьи разберемся, что же это такое геомагнитно-индуцированные токи (GIC). Это электрические токи, индуцируемые на поверхностях Земли быстрыми изменениями в геомагнитном поле, вызванными явлением космической погоды. Токи влияют на работу систем с длинными электрическими проводами (например, сети электропередачи и заглубленные трубопроводы). Геомагнитные возмущения, которые вызывают геомагнитно-индуцированные токи, включают в себя несколько факторов, таких как временное возмущение магнитосферы Земли, вызванное ударной волной солнечного ветра (геомагнитные бури) и кратковременное возмущение в магнитосфере Земли (суббури).

Сильные изменения геомагнитного поля вызывают геомагнитно-индуцированные токи в линиях электропередачи. Так, изменения геомагнитного поля с частотой  $f$  вызывают геоэлектрическое поле Земли, которое можно определить с помощью уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} E = -\frac{dB}{dt} \operatorname{rot} B = \mu_0 j = \mu_0 \sigma E,$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,  
 $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  
 $\sigma$  – проводимость среды,  
 $B$  – магнитная индукция.

Следовательно, напряженность геоэлектрического поля зависит от скорости изменения геомагнитного поля  $dB / dt$ . Глубина проникновения вариаций геомагнитного поля (и геоэлектрического поля) определяется их частотой  $f$  и проводимостью пород  $\sigma$ :

$$\sigma \geq 2\pi f \epsilon \epsilon_0,$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  
 $f$  – частота,  
 $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

Нейтральные провода силовых трансформаторов являются обязательным звеном пути протекания геомагнитно-индуцированных токов в электрической сети (рис. 1).

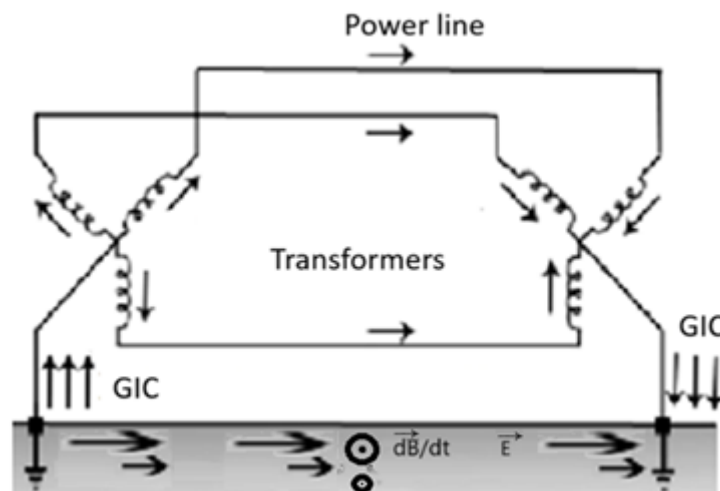


Рис. 1. Пути протекания геомагнитно-индуцированных токов



Наличие в обмотках трансформатора квазипостоянного тока приводит к сдвигу рабочей точки в область нелинейного режима. Появление частоты = 0,0001–1 Гц в обмотке силового трансформатора приводит к намагничиванию сердечника трансформатора. Что приводит к:

- 1) перепадам напряжения,
- 2) перегреву силовых трансформаторов,
- 3) изменению реактивной мощности в высоковольтной линии электропередачи,
- 4) генерации гармоник,
- 5) сбоем срабатывания автоматики.

Наши исследования основываются на измерении влияния геомагнитно-индуцированных токов на электрические сети путем оценки вариаций высших гармоник, как было сказано ранее. Геомагнитно-индуцированные токи влияют на надежность работы электротехнических сетей, уменьшают срок службы электрооборудования и приводят к множеству различных нежелательных последствий.

Для наших исследований и измерений была выбрана Мутновская геотермальная электростанция. На рис. 2 ниже показана схема ЛЭП и пункты мониторинга.



Рис. 2. Схема линии электропередачи 220кВ и пункты мониторинга

Также от нее недалеко расположена магнитометрическая обсерватория ИКИР, что позволяет использовать локальные магнитные данные. Уровни гармоник рассчитываются с помощью спектрального анализа. Проводимые исследования на протяжении многих лет показали, что вариации 4-й, 6-й и 8-й гармоник достаточно хорошо коррелируют с вариациями магнитного поля Земли (рис. 3).

Для описания нелинейности трансформаторов используются различные методы аппроксимации зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля. Мы используем кусочно-линейную аппроксимацию (рис. 4), поскольку она позволяет через коэффициенты Берга показать вариации гармонических составляющих в зависимости от нелинейности системы, а именно угла отсечки:

$$\alpha_n(\theta) = \frac{2(\sin\theta\cos\theta - n\cos\theta\sin\theta)}{\pi n(n^2 - 1)(1 - \cos\theta)},$$

где  $\theta$  – угол отсечки,  
 $n$  – номер гармоники.

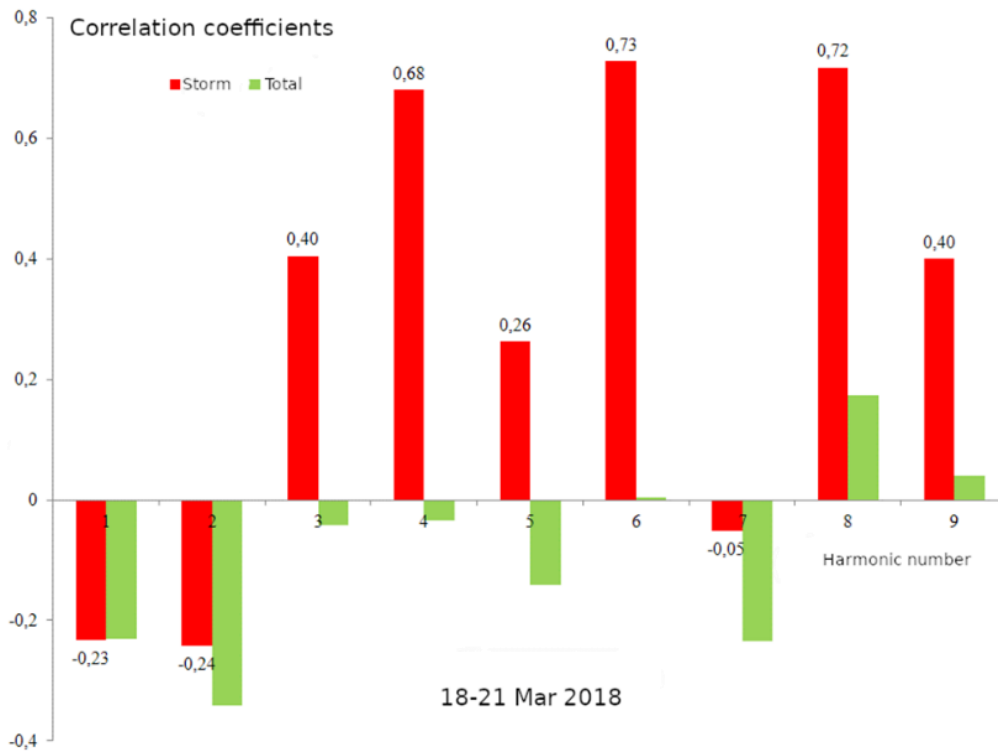


Рис. 3. Корреляционная амплитуда гармоник от вариаций геомагнитного поля

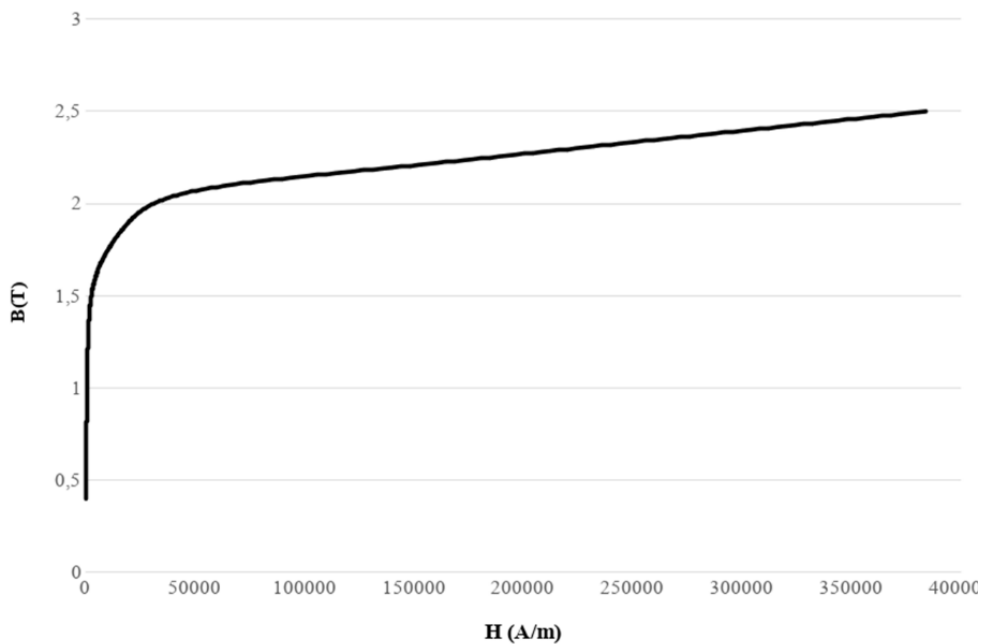


Рис. 4. Кривая намагничивания для трансформаторной стали ТРДН-40000/230 и кривая приближения Берга

Зависимость величины коэффициентов Берга от угла отсечки позволяет предположить, что протекание геомагнитно-индуцированного тока может проявляться в виде вариаций гармоник. Так, если геомагнитно-индуцированные токи увеличиваются, то угол отсечки также увеличивается, и соотношение между гармониками изменяется. Например, при  $120 > \theta > 110$  коэффициенты Берга для 8-й гармоники положительные, а для 4-й и 6-й отрицательные, что позволяет определить диапазон углов отсечки, исходя из величин отдельных гармонических составляющих (рис. 5).

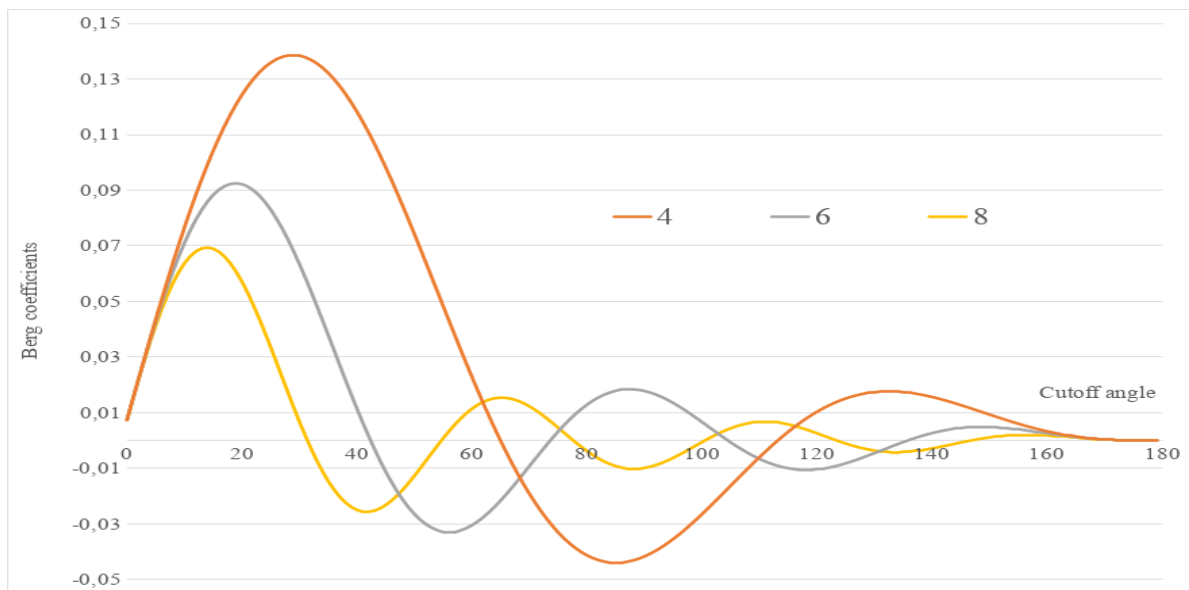


Рис. 5. Зависимость коэффициентов Берга от угла отсечки

Более того, использование такого подхода напрямую позволяет наблюдать проявление ГИТ в виде геомагнитных пульсаций Рс3 (рис. 6).

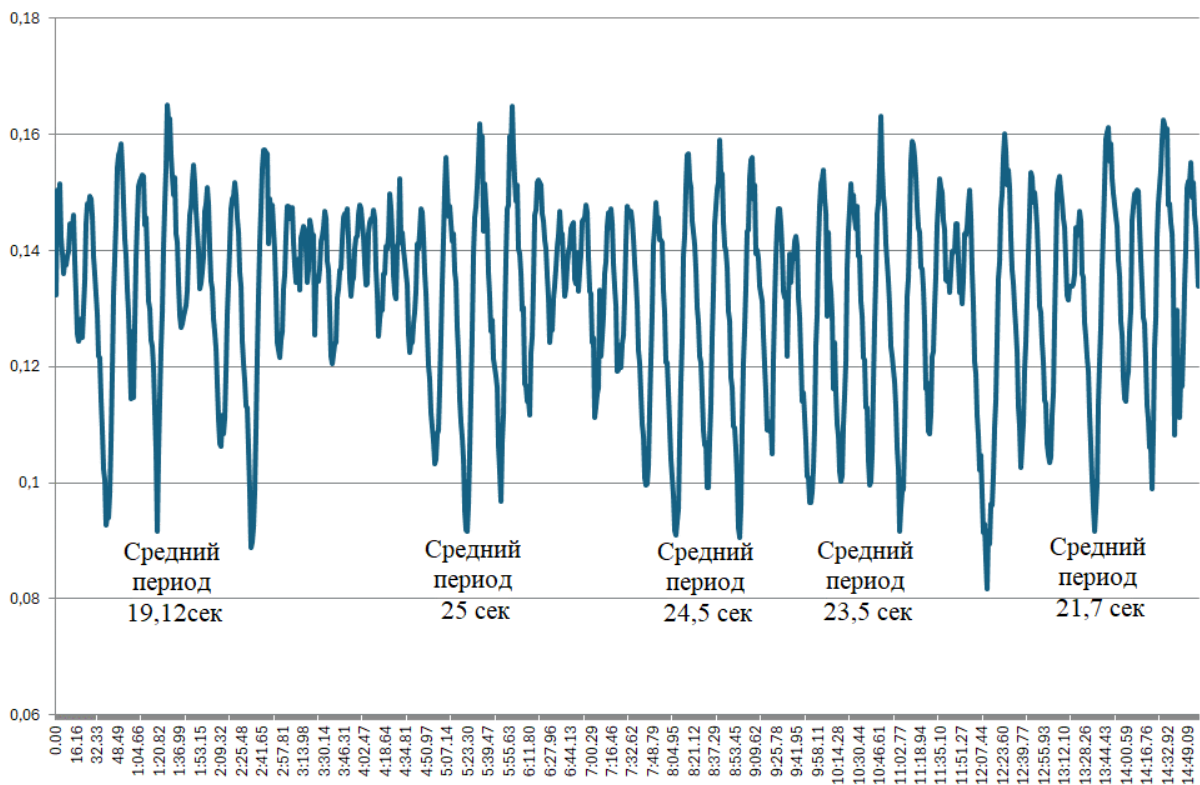


Рис. 6. Геомагнитные пульсации в вариациях 6-й гармоники промышленного тока

Данные, получаемые из высоковольтной линии без непосредственного подключения к ней, показали приемлемую эффективность в исследовании геомагнитно-индуцированных токов. Для диагностики ГИТ необходимо использовать 4-ю, 6-ю или 8-ю гармонику, так как эти гармоники в полной мере позволяют оценить его проявление в электрических системах Камчатского края.

### Литература

1. *Сивоконь В.П., Сероветников А.С., Писарев А.В.* Высшие гармоники как индикатор геомагнитно-индуцированных токов // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность.* – 2011. – № 3. – С. 30–34.
2. *Сивоконь В.П., Сероветников А.С.* Геомагнитно-индуцированные токи в электрических сетях Камчатки // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность.* – 2013. – № 3. – С. 19–22.
3. *Sivokon V.P.* A new method for detecting geomagnetically induced currents // *Russian electrical engineering.* – 2021. – V. 92, № 11. – P. 685–690.
4. *Сероветников А.С., Сивоконь В.П.* Вариации спектра тока трансформатора, подверженного воздействию геомагнитно-индуцированных токов // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность.* – 2015. – № 1. – С. 15–18.

УДК 621.311.42

**В.С. Гринев, М.Н. Бурнаев**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: maxon20032003@gmail.ru*

## **ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Тепловизор – это специальное устройство, которое нашло широкое применение в электроэнергетике. Изделие такого типа весьма дорогостоящее, однако благодаря назначению и эффективности выполнения поставленных задач является неотъемлемой частью предупреждения аварий. Периодичность тепловизионного контроля электрооборудования, а также методика выполнения обследования прописывается в нормативной документации: в правилах техники эксплуатации, в РД 34.45-51.300-97.

Контроль состояния соединений заносится в протокол, на основании которого должен проводиться вывод оборудования в ремонт. Необходимость устранения подобных дефектов определяется главным инженером энергопредприятия. Технология является спасительной для высоковольтных сетей, что снижает аварийность минимум на 70%. В большинстве случаев устранение дефектов не требует гашения ВЛ.

**Ключевые слова:** тепловизор, тепловизионный контроль, контроль состояния соединений, контактные соединения.

**V.S. Grinev, M.N. Burnaev**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: maxon20032003@gmail.ru*

## **THERMAL IMAGING CONTROL OF POWER ELECTRICAL EQUIPMENT**

The thermal imager is a special device that is widely used in the electric power industry. A product of this type is very expensive, but due to the purpose and efficiency of performing the tasks set, it is an integral part of accident prevention. The frequency of thermal imaging control of electrical equipment, and also the method of performing the survey is prescribed in the regulatory documentation: in the rules of operation, such as WD34. 45-51. 300-97.

Monitoring of the connections condition is recorded in the protocol, on the basis of which the equipment must be repaired. The need to eliminate such defect is determined by the chief engineer of the energy company. This technology is life-saving for high-voltage networks, which reduces the accident rate by at least 70%. In most cases, the elimination of defects does not require extinguishing the overhead power line.

**Key words:** thermal imager, thermal imaging control, connection condition monitoring, contact connections.

В настоящее время во многих структурах электроэнергетики наблюдается тенденция перехода от плановых ремонтов оборудования к ремонтам по фактическому состоянию оборудования. Такой подход требует внедрения и развития различных методов диагностики состояния электрооборудования [1–3]. Тепловизионный контроль оборудования – один из таких методов [4, 5].

Тепловизионное обследование силового электрооборудования проводилось на технической базе ОАО «Камчатскэнерго». Выполнено тепловизионное обследование электрооборудования ОРУ 110 и 220 кВ РПП-1. Работы выполнялись 15 и 19 апреля 2024 г. с помощью комплекта тепловизионной аппаратуры TESTO 875 и для контроля выборочно дублировались тепловизором THERMOVISION-470 фирмы AGEMA в вечернее время при отсутствии прямого солнечного освещения объектов.

Обследование электрооборудования проведено с целью выявления аварийных элементов оборудования и косвенных измерений изоляционных характеристик аппаратов. Тепловизионное обследование выполнялось по рабочей программе.

Обследовано следующее оборудование:

- 1) контактные соединения ошиновки, присоединения к электрическим аппаратам и разъемные контактные соединения разъединителей 110 и 220 кВ;
- 2) вводы и баки силовых трансформаторов, автотрансформаторов;
- 3) вентильные разрядники и ОПН;
- 4) конденсаторы связи и ВЧ-заградители;
- 5) индуктивные и емкостные ТН;
- 6) вводы масляных выключателей 110 и 220 кВ;
- 7) измерительные ТТ.

По результатам обработки тепловизионных изображений по специальной программе на компьютере, расчетов изоляционных характеристик по авторской методике, анализа результатов составлено заключение, которые иллюстрируется таблицами расчетных данных и характерными термограммами.

Обследованы контакты и контактные соединения ошиновки, присоединения к электрическим аппаратам и разъемные контактные соединения разъединителей 110 и 220 кВ. Обнаруженные дефектные контактные соединения перечислены в табл. 1.

Таблица 1

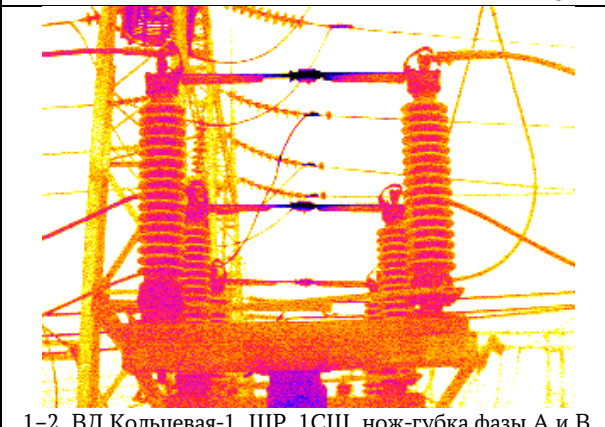
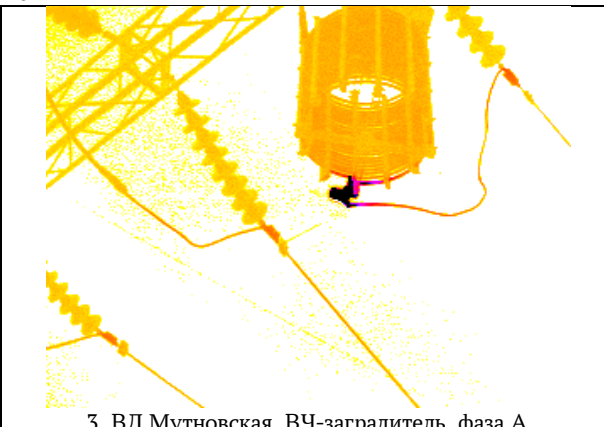
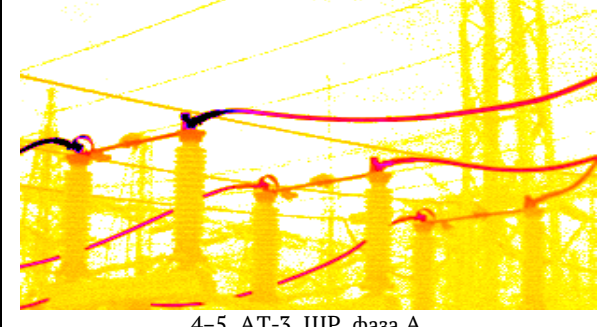
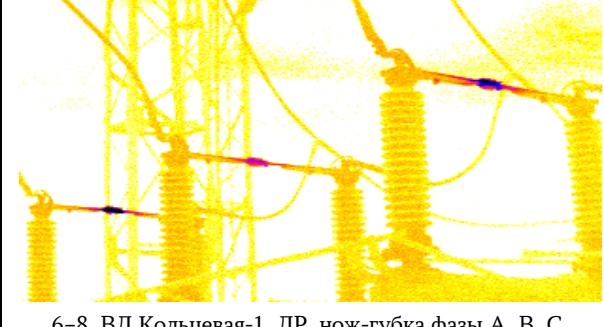
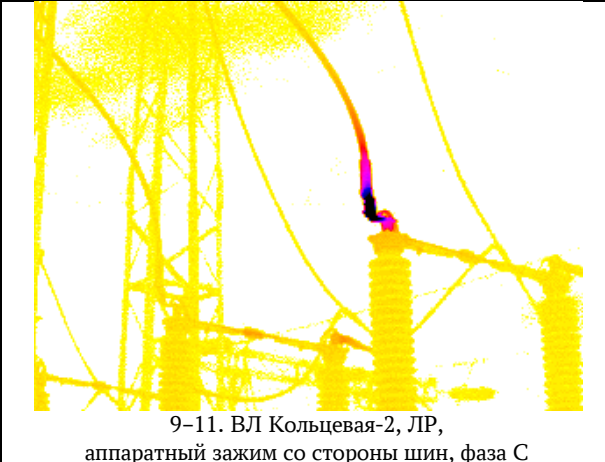
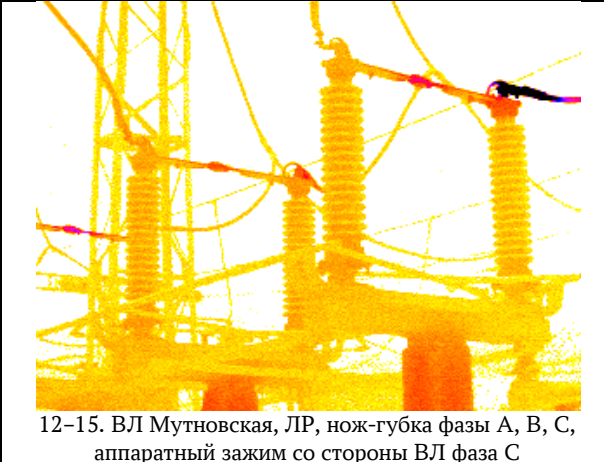
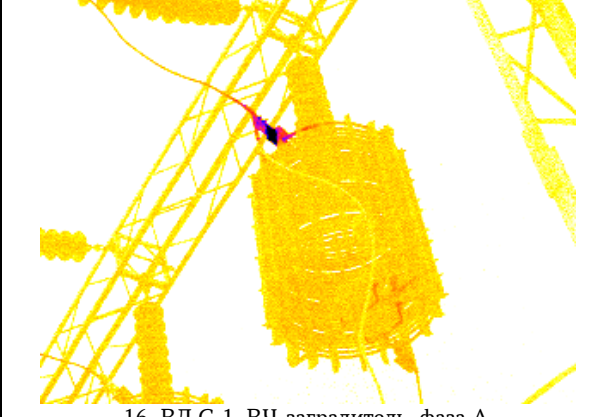
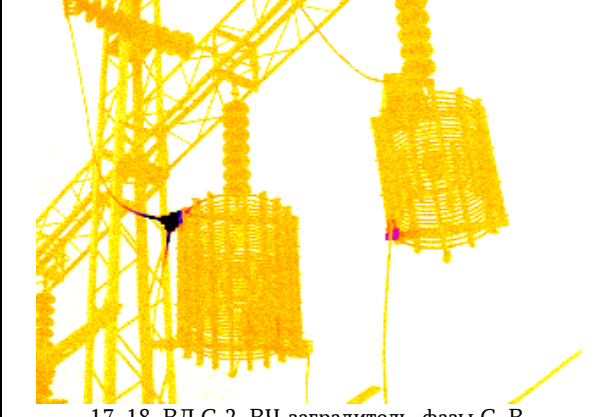
**Результаты тепловизионного контроля**

№	Оборудование	Элемент	Фаза	T	To	T – To
	ОРУ-110					
1	ВЛ Кольцевая-1, ШР, 1СШ	нож-губка	А	21,0	15,0	6,0
2	ВЛ Кольцевая-1, ШР, 1СШ	нож-губка	В	19,3	15,0	4,3
3	ВЛ Мутновская, ВЧ-заградитель	нижний контакт	А	>71,4	14,7	>56,7
4	АТ-3, ШР	аппаратный зажим со стороны АТ	А	56,8	19,7	37,1
5	АТ-3, ШР	аппаратный зажим со стороны шин	А	52,6	19,7	32,9
6	ВЛ Кольцевая-1, ЛР	нож-губка	А	30,8	13,9	16,9
7	ВЛ Кольцевая-1, ЛР	нож-губка	В	20,1	13,9	6,2
8	ВЛ Кольцевая-1, ЛР	нож-губка	С	25,5	13,9	11,6
9	ВЛ Кольцевая-2, ЛР	аппаратный зажим со стороны шин	С	49,0	12,6	36,4
10	ВЛ Кольцевая-2, ЛР	аппаратный зажим со стороны ВЛ	В	18,8	13,1	5,7
11	ВЛ Кольцевая-2, ЛР	нож-губка	В	18,1	13,1	5,0
12	ВЛ Мутновская, ЛР	нож-губка	А	21,9	13,4	8,5
13	ВЛ Мутновская, ЛР	нож-губка	В	16,2	13,4	2,8
14	ВЛ Мутновская, ЛР	нож-губка	С	18,6	13,4	5,2
15	ВЛ Мутновская, ЛР	аппаратный зажим со стороны ВЛ	С	40,1	13,4	26,7
16	ВЛ С-1, ВЧ-заградитель	верхний контакт	А	31,9	13,0	18,9
17	ВЛ С-2, ВЧ-заградитель	верхний контакт	С	60,4	12,6	47,8
18	ВЛ С-2, ВЧ-заградитель	нижний контакт	А	18,9	12,6	6,3
19	ВЛ С-2, ЛР	нож-губка	С	26,8	12,1	14,7
20	ШС МВ, ВМВ	присоединение ошиновки со стороны шин	С	19,1	10,2	8,9
	ОРУ-220					
21	АТ-3	аппаратный зажим ввода	В	52,5	20,6	31,9
22	ВЛ Эн-1, ЛР	нож-губка	А	16,2	10,9	5,3
23	ВЛ Мет-2, ВЧ-заградитель		А	24,7	11,1	13,6
24	ТСН-1 0,4 кВ	присоединение ошиновки		51,0	15,7	35,3
25	ТСН-2 0,4 кВ	присоединение ошиновки		24,8	18,3	6,6

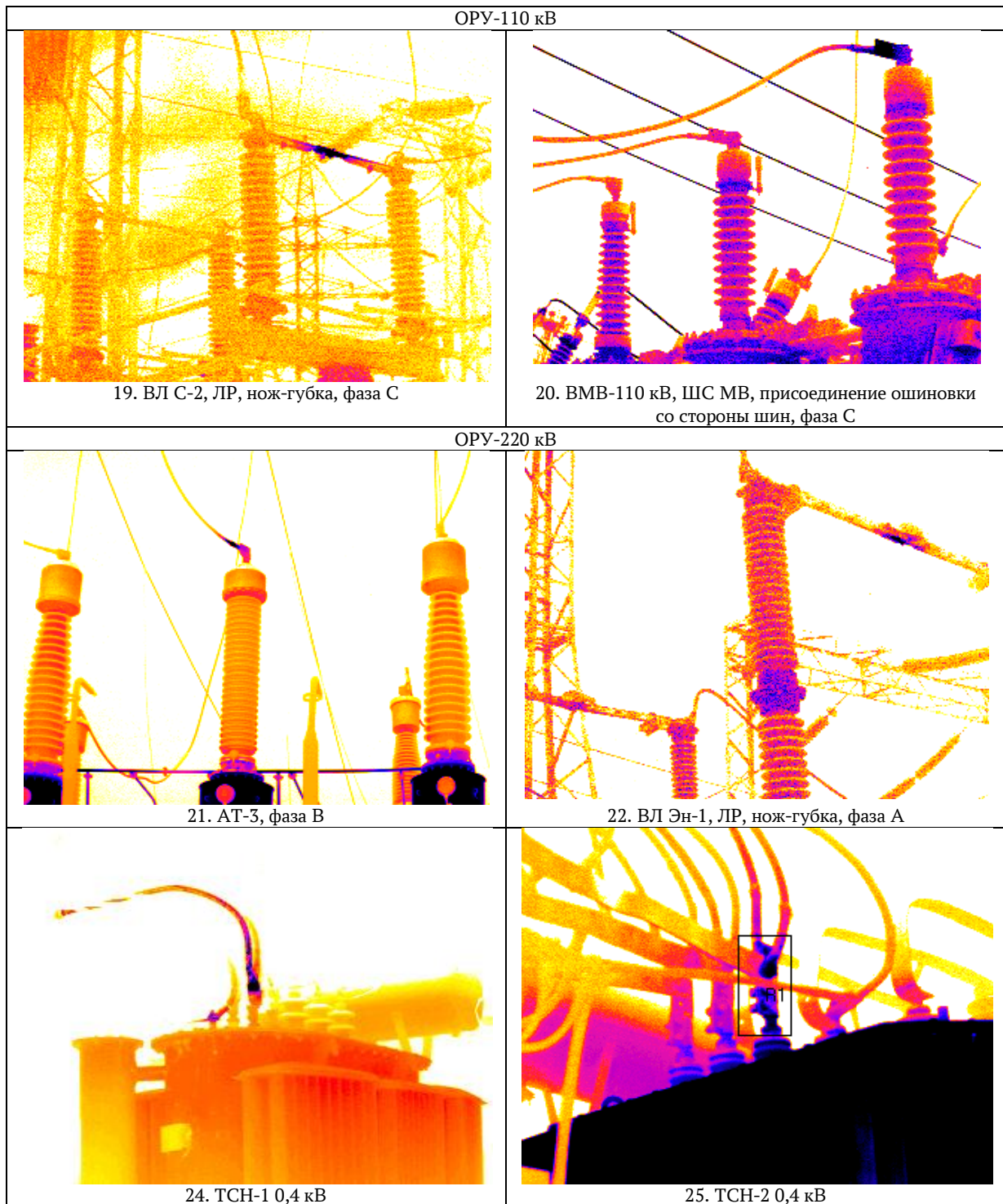
В табл. 2 включены термограммы всех выявленных дефектов контактных соединений.

Таблица 2

Итоговые термограммы контроля элементов электрооборудования

ОРУ-110 кВ	
 <p>1-2. ВЛ Кольцевая-1, ШР, 1СШ, нож-губка фазы А и В</p>	 <p>3. ВЛ Мутновская, ВЧ-заградитель, фаза А</p>
 <p>4-5. АТ-3, ШР, фаза А</p>	 <p>6-8. ВЛ Кольцевая-1, ЛР, нож-губка фазы А, В, С</p>
 <p>9-11. ВЛ Кольцевая-2, ЛР, аппаратный зажим со стороны шин, фаза С</p>	 <p>12-15. ВЛ Мутновская, ЛР, нож-губка фазы А, В, С, аппаратный зажим со стороны ВЛ фаза С</p>
 <p>16. ВЛ С-1, ВЧ-заградитель, фаза А</p>	 <p>17-18. ВЛ С-2, ВЧ-заградитель, фазы С, В</p>





Для вводов силовых трансформаторов и самих трансформаторов тепловизионный контроль является дополнительным к основным видам диагностики. Проверены все вводы трансформаторов, системы охлаждения и поверхности баков силовых трансформаторов и автотрансформаторов. На поверхности баков и охладителей силовых трансформаторов и автотрансформаторов температурные аномалии, характеризующие наличие дефектов, не обнаружены.

Проведение систематического тепловизионного контроля повышает устойчивость и качество электроснабжения в изолированных энергоузлах [6–12].



### Литература

1. Белов О.А., Парфенкин А.И. Обзор основных факторов снижения безопасности сложных технических систем // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2015. – № 35. – С. 11.
2. Белов О.А. Анализ современных диагностических средств в системах электроснабжения // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2013. – № 26. – С. 5–8.
3. Белов О.А. Интегрированные системы технической диагностики электроустановок // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2013. – № 25. – С. 5–8.
4. Ещенко Д.В., Никитин А.Т., Белов О.А. Практическое применение методов тепловизионного анализа и контроля // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2020. – № 54. – С. 6–19.
5. Пантина А.И., Белов О.А. Перспективы методики инфракрасной диагностики силовых трансформаторов // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Восьмой всерос. науч.-практ. конф. (23–25 мая 2017 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2017. – С. 102–104.
6. Белов О.А. Оценка динамики электропотребления и перспективы развития генерации в Ключевском изолированном энергоузле Камчатского края // Электронный сборник материалов I Междунар. науч.-практ. конф.: «Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики». – Новополюцк, 2023. – С. 251–260.
7. Белов О.А. Анализ структуры генерирующей мощности и динамики электропотребления Соболевского изолированного энергоузла Камчатского края // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 1 (21). – С. 118–138.
8. Мясников Г.С., Белов О.А. Общая оценка эффективности электроснабжения в Усть-Камчатском изолированном энергоузле // Материалы Всерос. междисциплин. науч. конф. «Наука и практика – 2022». – Астрахань, 2022. – С. 258–262.
9. Белов О.А. Оценка эффективности электроснабжения в Паланском изолированном энергоузле Камчатского края // Сборник трудов III всерос. науч.-практ. конф. «Энергетика будущего – цифровая трансформация». – Липецк, 2022. – С. 308–313.
10. Белов О.А., Мясников Г.С. Оценка динамики электропотребления и перспективы развития генерации в Козыревском изолированном энергоузле Камчатского края // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф. (18–21 октября 2022 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 45–51.
11. Белов О.А., Федоров О.В. Анализ структуры генерирующей мощности и динамики электропотребления в Средне-Камчатском изолированном энергоузле // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 5. – С. 120–135.
12. Белов О.А. Анализ структуры генерирующей мощности и динамики электропотребления в Алеутском изолированном энергоузле Камчатского края // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2022. – № 62. – С. 6–17.

УДК 629.5.03

**А.К. Кулдасов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: kuldasov00001@gmail.com*

## **ОБЩАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОПУЛЬСИВНЫХ УСТАНОВОК СОВРЕМЕННЫХ СУДОВ**

В настоящее время требования к энергоэффективности и стремление к минимизации негативного воздействия на окружающую среду в морском транспорте обуславливают необходимость совершенствования силовых и пропульсивных установок судов. Изменение климата и загрязнение воздуха, вызванные отчасти выбросами судов, стали важнейшими проблемами XXI века, которые привлекают внимание судходной отрасли. Эффективность работы судна во многом зависит от его силовой и пропульсивной установки, которая определяет его энергоэффективность и уровень выбросов. В данной статье предлагается решение этой проблемы через использование дизель-электрической силовой установки, которая приводит судно в движение. Она имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными установками, что делает ее особенно привлекательной для судходства.

**Ключевые слова:** пропульсивная установка, силовая установка.

**A.K. Kuldasov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: kuldasov00001@gmail.com*

## **GENERAL ASSESSMENT OF PROSPECTS FOR PROPULSIVE INSTALLATIONS DEVELOPMENT IN MODERN SHIPS**

Currently, energy efficiency requirements and the desire to minimize the negative impact on the environment in maritime transport demand to improve the power and propulsion systems of ships. Climate change and air pollution, caused in part by ship emissions, have become the most important issues of the XXIst century that attract the attention of the shipping industry. The efficiency of vessel operation depends largely on its power and propulsion system, which determines its energy efficiency and emissions levels. A solution to solve this problem through the use of a diesel-electric power plant that drives the ship is proposed. It has a number of advantages over traditional installations, which makes it attractive for shipping.

**Key words:** propulsive installation, power plant.

Азипод – это пропульсивный комплекс, спроектированный по принципу «все в одном», представляющий собой двигательную установку, в которой электродвигатель расположен внутри так называемой гондолы за пределами корпуса судна. Агрегаты «Азипода» могут вращаться на 360 градусов, сильно повышая маневренность и эффективность работы судна по сравнению со стандартными пропульсивными установками и рулевыми устройствами, а также сокращая расход топлива до 20%, что положительно влияет на снижение выброса вредных веществ в атмосферу и изменения климата.

С момента создания тридцать лет назад и до сегодняшних дней «Азипод» востребован в морском транспорте благодаря своей производительности, эффективности, устойчивости и надежности в различных условиях эксплуатации.

Азиподами обычно называют вообще все системы, отдалено похожие на те, что представлены на рис. 1. Но «Азипод» – это не технология, а зарегистрированная торговая марка (Azipod) компании АВВ. На сегодняшний день компания АВВ предлагает широкий выбор подобных комплексов, способных удовлетворить любые задачи.



Рис. 1. Модели аzipода

С момента первого применения, что датируется 1990-м годом прошло более трех десятилетий, и развитие аzipодов не останавливалось. За более чем 30 лет работы все выпущенные аzipоды наработали более 15 миллионов часов. Сюда входят более 60 судов ледового класса и более 25 лет опыта работы в ледовых условиях, а также более 140 тяжелых аzipодов ледового класса, но самое главное – ни одного случая поломки аzipода по причине контакта со льдом.

«Аzipод IV», что на рис. 2, разработан специально для ледоколов. Пропульсивный модуль вращается вокруг вертикальной оси на 360 градусов модулем руления, а электродвигатель может выдавать на консольно установленный гребной фиксированного шага винт от 6 до 17 Мегаватт мощности [1, 2].

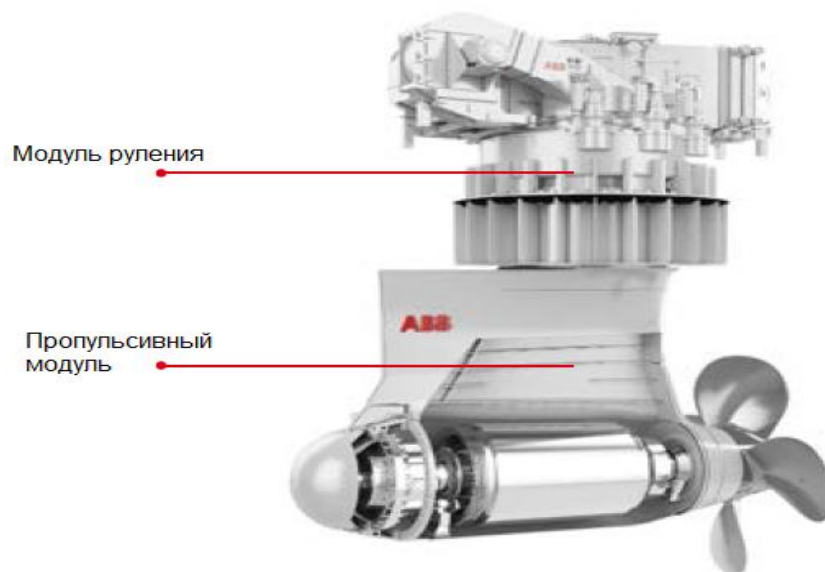


Рис. 2. Модули аzipода на примере «Аzipод IV»

Практически все ледокольные суда являются электроходами [3]. Подкупает электротяга своим крутящим моментом в любых условиях и длительная работа по фактически «швартовой характеристике» в режиме колки льда, но не все электроходы оснащены аzipодами. На рис. 3 представлен график, характеризующий работу системы электродвижения ледокольного судна.

Синим цветом обозначена рабочая зона в режиме навигации, то есть хода ледокола в свободной от льда воде. При этом максимально возможный крутящий момент постоянен и обозначен как 100% на графике. Справа рабочая зона упирается в кривую максимальной мощности (те самые 17 МВатт), а снизу в самую легкую винтовую характеристику.

Примерно такая рабочая зона справедлива и для дизельного двигателя, но выше есть «зона работы в режиме ломания льда», что полностью выходит за линию максимального крутящего момента в режиме навигации. Работать в таком режиме электродвигатель может долго, эта зона рабочая.

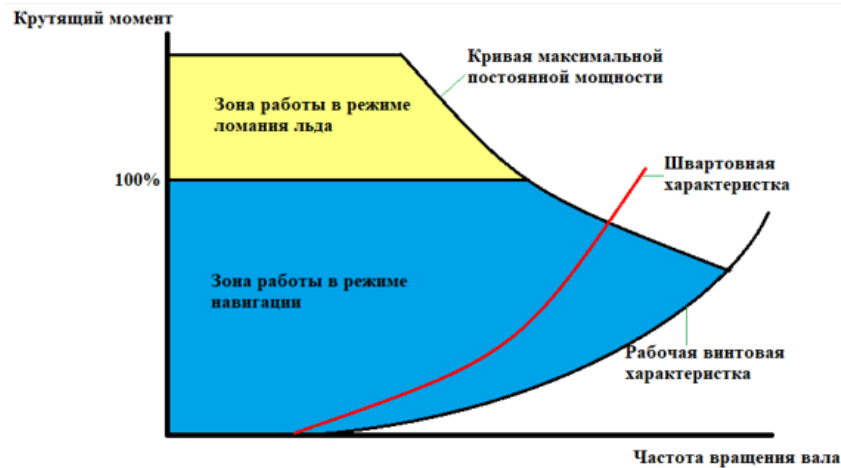


Рис. 3. Характеристики работы пропульсивного комплекса «Азипод»

Дизельная энергетическая установка физически не может обеспечить данные режимы. При этом что эта зона находится даже выше швартовной характеристики (красная линия), что соответствует работе пропульсивного корпуса на полный ход судна, привязанного к причалу. Очень тяжелый режим, но электродвигатель может на нем довольно долго работать [4, 5].

Компания АВВ может поставлять полный набор оборудования для выполнения точно поставленной задачи. Но суда компания АВВ не строит, поэтому установочный фланец для азипода устанавливает судостроительная верфь (рис. 4). Требования для фланца высокие, через него на корпус будет передаваться вся нагрузка, поэтому специалисты из АВВ осуществляют контроль минимальных требований к фланцу.

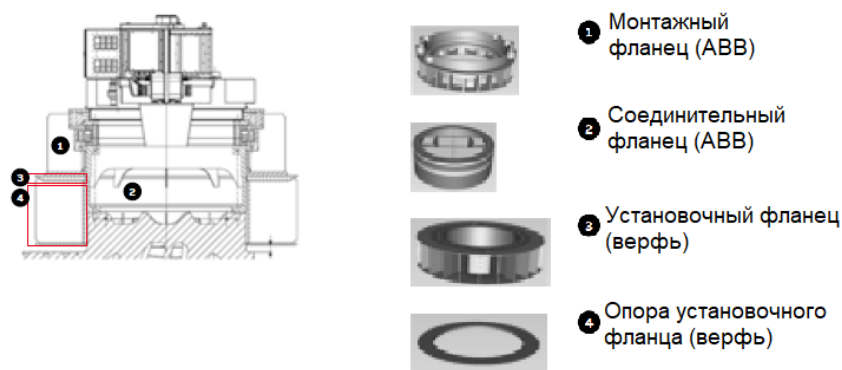


Рис. 4. Зоны ответственности при установке азипода

Охлаждение воздушное, и для этого имеется два вентилятора радиального типа. Воздух охлаждается в теплообменнике за пределами азипода пресной водой из низкотемпературного контура охлаждения (примерно 36 градусов) (рис. 5).

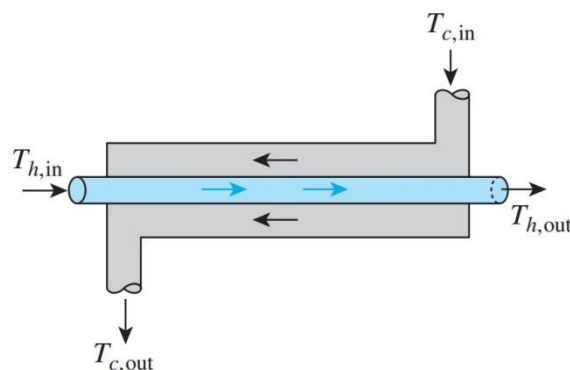


Рис. 5. Схема простейшего теплообменника по типу «труба в трубе»

Воздух прокачивается через шахту и затем через систему охлаждения электродвигателя (рис. 6). За температурой воздуха следит система управления, поддерживая ее на заданном уровне.

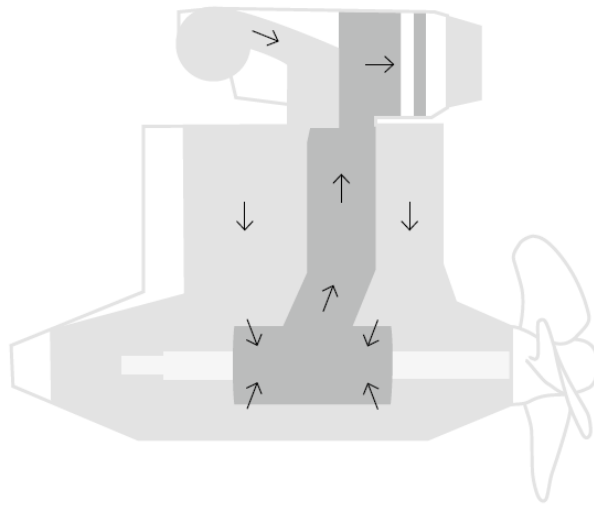


Рис. 6. Схема вентиляции азипода

Подшипники (опорные и упорный) находятся в масляной ванне и частично погружены в масло. Масло забирается насосами из масляных ванн подшипников и поднимается в напорный танк (выше азипода), откуда масло самотеком поступает к подшипникам. Так как вся система находится ниже ватерлинии, попадание воды в масло исключать нельзя. Поэтому азипод имеет и систему обнаружения воды в масле и систему удаления таковой. На случай протечек (воды или масла) в нижней части имеется поддон для сбора разливов и специальный насос для откачивания.

Система уплотнения гребного вала азипода идентична дейдвудному уплотнению для пропульсивных комплексов с валопроводами. Естественно, что система эта проще организована в азиподе, но принцип тот же. Есть еще один очень важный момент. Система может получать серьезный уровень обслуживания, например замену подшипников, не посещая сухой док. Это экономит деньги существенно. Но возможность эта имеется только для комбинированного типа подшипников. Чтобы поменять традиционные роликовые, необходима постановка судна в док [6].

Конструктивно предусмотрена система сбора протечек и их отвода (рис. 7).

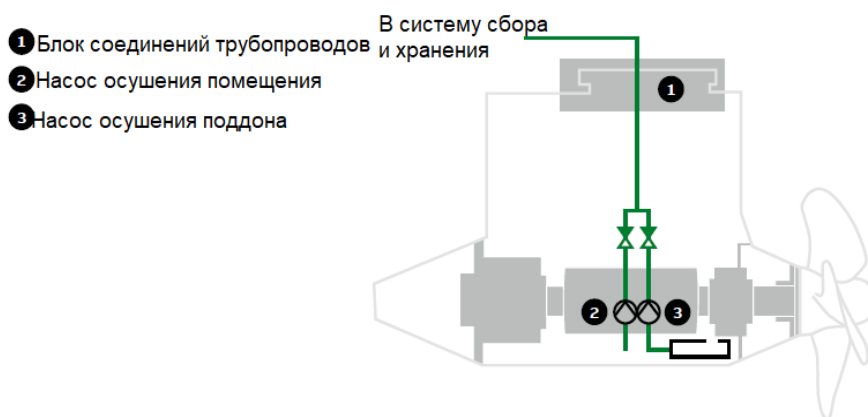


Рис. 7. Системы азипода

Таким образом, перспективы развития пропульсивных установок современных судов выглядят многообещающе благодаря инновациям, направленным на снижение негативного воздействия на окружающую среду, повышение энергоэффективности и внедрение новых технологий. Итого преимущества электродвижения по сравнению с обычным [7]:

- хорошие тяговые характеристики,
- надежность,

- возможность работы системы динамического позиционирования по GPS/Глонас,
- приемистость,
- снижение негативного воздействия на окружающую среду,
- повышение энергоэффективности.

Таким образом, «Азипод IV» в ледовой модификация обеспечивает передачу полной проектной мощности при любом угле работы установки и в режиме реверса. Короткий и жесткий единый вал позволяет работать на любых расчетных режимах, не имея механических ограничений. Жесткая конструкция всего комплекса и его фундаментной рамы специально разработана для работы во льдах. При этом свободный от валопроводов корпус позволяет экономно использовать внутреннее пространство судна. В совокупности данные технологические решения обеспечивают высокую эффективность работы судна во льдах

### Литература

1. ABB Group. (2020). Azipod® propulsion. URL: <https://new.abb.com/marine/systems-and-solutions/azipod>
2. Marine Research Institute. (2022). Fuel Efficiency in Marine Propulsion: A Comparative Study of Azipod Systems.
3. Белов О.А. Техническое обеспечение морских судов как фактор эффективной и безопасной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Четвертой междунар. науч.-техн. конф. (25–26 ноября 2021 г.). – Петропавловск-Камчатский, 2022. – С. 5–9.
4. Белов О.А., Мясников Г.С. Внедрение комплексной защиты судовых асинхронных электроприводов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Второй междунар. науч.-техн. конф. (23–25 октября 2019 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2020. – С. 73–76.
5. Кротенко Д.С., Тимощук В.Н., Белов О.А. Моделирование оптимальных режимов работы электростанции с различными генераторами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – Т. 15, № 3. – С. 36–40.
6. Белов О.А. Анализ результатов ультразвукового контроля корпуса рыбопромыслового судна // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф. (18–19 октября 2022 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 5–9.
7. Белов О.А., Парфёнкин А.И. Электротехника и электроника на судах рыбопромыслового флота: Учебное пособие. – М.: Моркнига, 2017.

УДК 621.313.333

**Г.С. Мясников, А.Р. Поляков, О.А. Белов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: ap241240@gmail.com*

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ УСТРОЙСТВА ИМИТАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Асинхронный электропривод широко распространен в использовании на судах. Количество электрооборудования растет с каждым днем, и с этим растут требования к их надежности. Электроприводы работают в различных условиях эксплуатации и тепловых режимах на судне. Из-за разных режимов двигателя изнашиваются по-разному, необходимо понимать фактические процессы, протекающие в двигателе для того, чтобы настроить индивидуальные настройки, подходящие условиям работы и способствующие достижению максимальной производительности, эффективности и долговечности работы. Так как физическое исследование этих процессов в реальных условиях на судне затруднено высокой трудоемкостью и дороговизной, было создано устройство имитации режимов асинхронного электропривода. Это помогло в доступной форме провести сбор данных испытаний. Для оценки его работоспособности были проведены экспериментальные исследования, которые представлены в данной работе.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, условия эксплуатации, тепловые режимы, фактические процессы, индивидуальные настройки.

**G.S. Myasnikov, A.R. Polyakov, O.A. Belov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: dhhkg8@gmail.com*

### **EXPERIMENTAL EVALUATION OF DEVICE FUNCTIONALITY FOR SIMULATING THE OPERATING MODES OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE**

Asynchronous electric drive is widely used on ships. The number of electrical equipment is growing every day, and the requirements for their reliability are growing. The electric drives operate in various operating conditions and thermal conditions on the ship. Due to the different modes, engines wear out in different ways. So it is necessary to understand the actual processes taking place in the engine in order to adjust individual settings that are suitable for working conditions and achieving maximum productivity, efficiency and durability of operation. Since the physical study of these processes in real conditions on a ship is complicated by high labor intensity and high cost, a device to simulate asynchronous electric drive modes was created. It made possible to collect test data in accessible form. The experimental studies to assess its performance were conducted.

**Key words:** asynchronous electric drive, operating conditions, thermal conditions, actual processes, individual settings.

Асинхронный электропривод широко распространен в использовании на судах. Примерно 80–90% электроприводов от общего числа двигателей на судне – это асинхронные электроприводы.

Количество электрооборудования растет с каждым днем, и с этим растут требования к их надежности. Электроприводы работают в различных условиях эксплуатации и тепловых режимах на судне. Для примера рассмотрим двигатель, используемый в пожарном насосе и двигатель насоса забортной воды, первый работает в кратковременном режиме, а второй, в свою очередь, работает в продолжительном режиме. Из-за разных режимов двигателя изнашиваются по-разному, необходимо понимать фактические процессы, протекающие в двигателе для того, чтобы выполнить индивидуальные настройки, подходящие условиям работы и способствующие достижению максимальной производительности, эффективности и долговечности работы [1–3].

Так как физическое исследование этих процессов в реальных условиях на судне затруднено высокой трудоемкостью и дороговизной, было создано устройство имитации режимов асинхронного электропривода. Это помогло в доступной форме провести сбор данных испытаний.

Цель статьи – оценить работоспособность [4] устройства имитации режимов работы асинхронного электропривода посредством проведения экспериментов.

Была произведена сборка устройства режимов работы, включающая в себя:

- частотный преобразователь ПЧВ 1К5 с отдельным управлением,
- осциллограф fairesi 1014D,
- два стационарных амперметра (мультиметра),
- испытуемый двигатель – 3-фазный индукционный двигатель С.Е.SET. CIM 2/55-132/AD4

с номиналами 195В, 2А, 600Вт, 310 Гц, 17 500 об/мин и классом F.

Нагрузка представлена следующими элементами:

- шесть ламп накаливания: 3×75 Вт, 2×100 Вт, 1×52 Вт,
- коллекторный двигатель: 9000 287 464, 2 000 кВт, 50 Гц, 230 В, 1 400 об/мин.

Характер нагрузки:

- активный,
- индуктивный.

Средство внешней диагностики [5, 6]:

- тепловизор Testo-875-2i. Погрешность:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 2\%$  от изм. зн. ( $\pm 3^{\circ}\text{C}$  от изм. зн. при  $-30 \dots -22^{\circ}\text{C}$ ).

Были проведены опыты по работе устройства в нескольких режимах работы: холостой ход, режим под нагрузкой 50% и номинальный режим.

Режимы работы электродвигателей – это конкретный порядок чередования периодов, который характеризуется продолжительностью и величиной нагрузки, условиями охлаждения, частотой пуска, охлаждений, частотой реверса и соотношениями потерь в период пуска, движения и остановки [7–9].

Холостой ход – это процесс, при котором нагрузочный двигатель вращает испытуемый без нагрузки.

В начале эксперимента отсутствует нагрузка. Поднимаем частоту вращения и напряжение нагрузочного двигателя до рабочего и проводим эксперимент без подключения нагрузки, что можно увидеть на рис. 1. Эксперимент проходит в течение 30 минут.



Рис. 1. Процесс эксперимента. Холостой ход



На рис. 2 представлены одни из средних показателей напряжения испытываемого двигателя  $V_{rms1}$  и напряжение обмотки возбуждения  $V_{rms2}$ , снятые осциллографом, и занесены в таблицу, приведенную ниже.

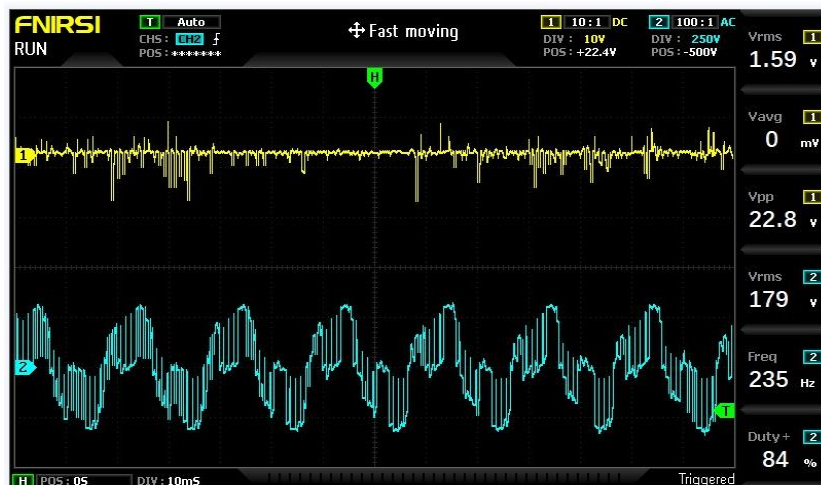


Рис. 2. Показания холостого хода на осциллографе

**Параметры нагрузочного и испытываемого двигателя**

Параметры	Исследуемый			Параметры	Нагрузочный		
	Холостой	Под активной нагрузкой (50%)	Под индуктивной нагрузкой (100%)		Показания	Холостой	Под активной нагрузкой (50%)
$T1$ (мин)	30	30	30	$T2$ (мин)	30	30	30
$U_{1\text{генер}}$ (В)	179	182	260	$U_{2\text{генер}}$ (В)	5	1,7	11,1
$I_{1\text{генер}}$ (А)	0,65	1,54	2	$I_{2\text{генер}}$ (А)	0	0,65	0,88
$t_{1\text{обм}}$ (С)	31	53,1	75,1	$t_{2\text{обм}}$ (С)	32,6	41,1	48,4
$t_{1\text{корп}}$ (С)	30,5	57	59,8	$t_{2\text{корп}}$ (С)	28	37	44,3
				$U_{20,в}$ (В)	0	2,42	5
				$I_{20,в}$ (А)	0	1,94	4

Эксперимент начинается при средней начальной температуре обмоток М1 испытываемого двигателя и М3 нагрузочного двигателя и при средней температуре корпусов М2 испытываемого и М4 нагрузочного, эти средние значения отражены в рабочем окне на рис. 3.

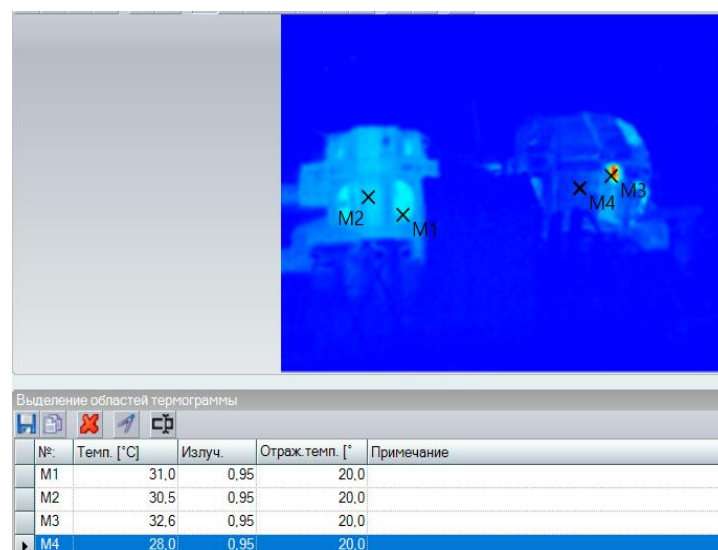


Рис. 3. Показания на тепловизоре испытываемого и нагрузочного двигателя на холостом ходу

Нагрузочный режим под активной нагрузкой. Для приведения двигателя к нагрузочному режиму (50% нагрузки) подключаем к схеме 6 ламп накаливания: 3×75 Вт, 2×100 Вт, 1×52 Вт. в виде нагрузки и повышаем напряжение нагрузочного двигателя (рис. 4). Эксперимент продлился 30 минут.

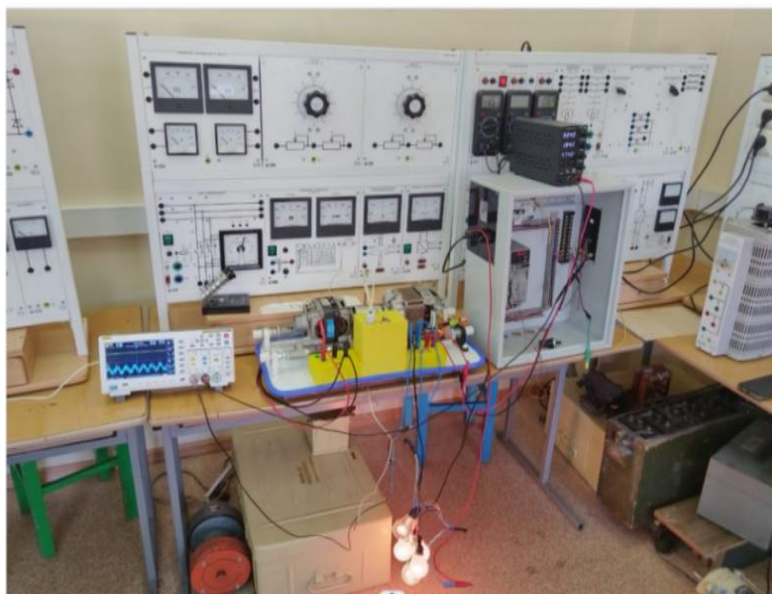


Рис. 4. Процесс эксперимента. Режим под нагрузкой

За время эксперимента по работе установки в нагрузочном режиме были сняты средние данные с помощью осциллографа (рис. 5).



Рис. 5. Показания осциллографа под активной нагрузкой

На рис. 6 и 7 показаны данные с тепловизора в момент достижения нагрузки в 50% от номинальной.

Номинальный режим – режим нагрузки двигателя с использованием 100% ресурса двигателя. Эксперимент длился по времени 30 минут (рис. 8).

На рис. 9 представлен один из средних показателей осциллографа за эксперимент.

Термограмма электродвигателя и лобовой части обмотки со стороны переднего подшипникового щита в начале нагрузочного режима представлена на рис. 10.

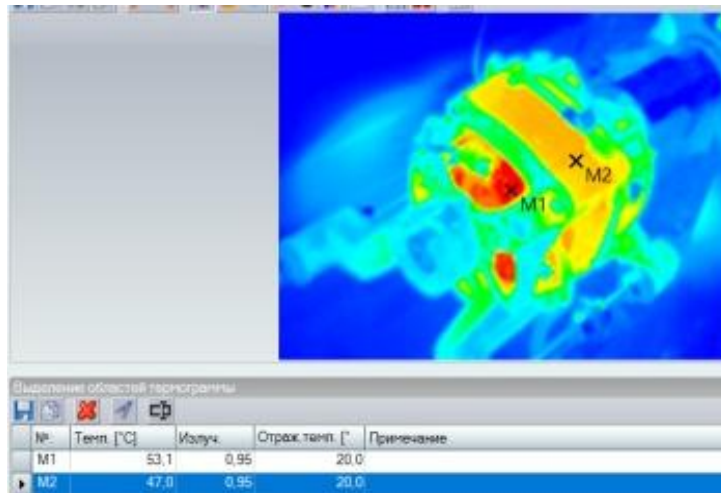


Рис. 6. Показания на тепловизоре испытуемого двигателя в номинальном режиме

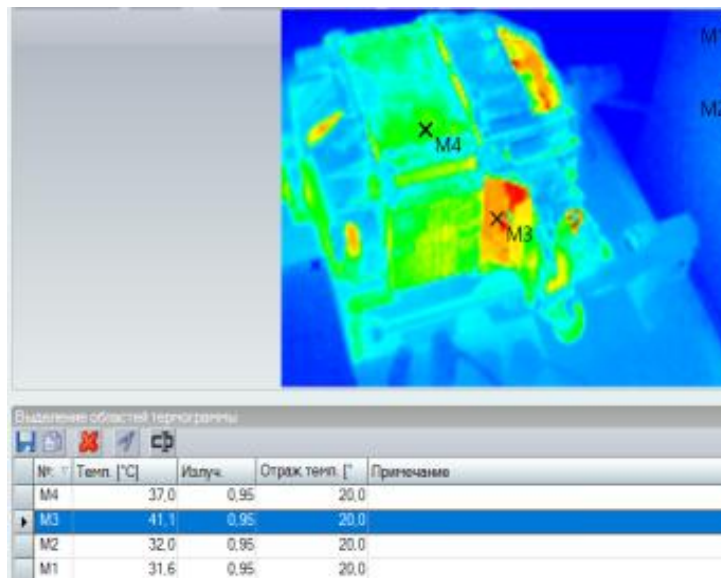


Рис. 7. Показания на тепловизоре нагруженного двигателя в номинальном режиме



Рис. 8. Процесс эксперимента. Номинальный режим

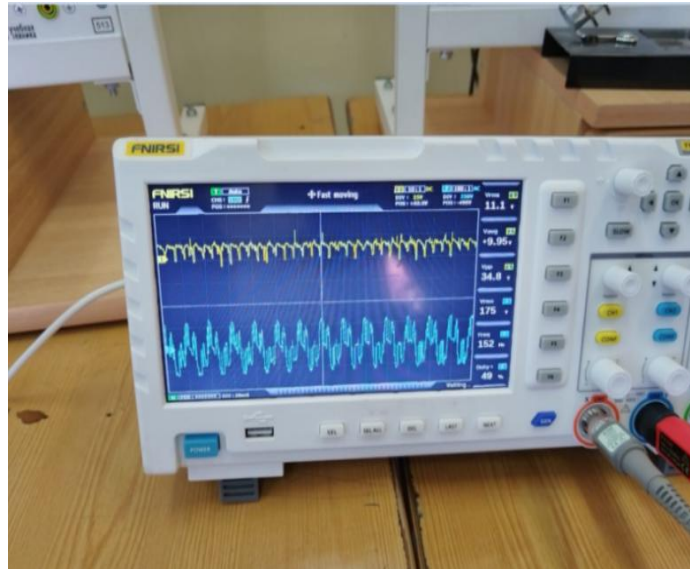


Рис. 9. Показания номинального режима на осциллографе

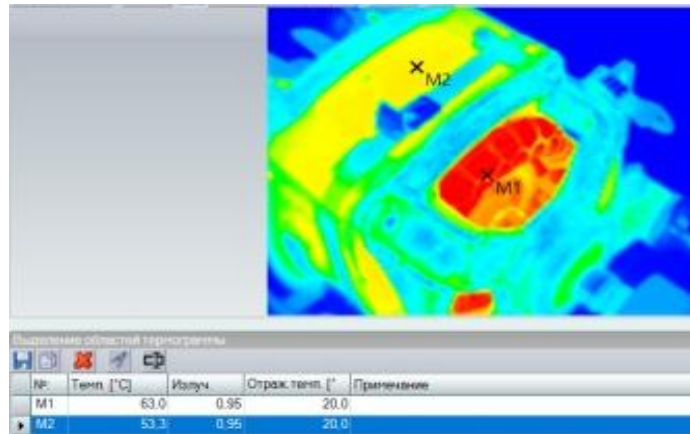


Рис. 10. Показания с тепловизора исследуемого двигателя в начале нагрузочного режима

Термограмма электродвигателя и лобовой части обмотки со стороны заднего подшипникового щита в конце нагрузочного режима представлена на рис. 11.

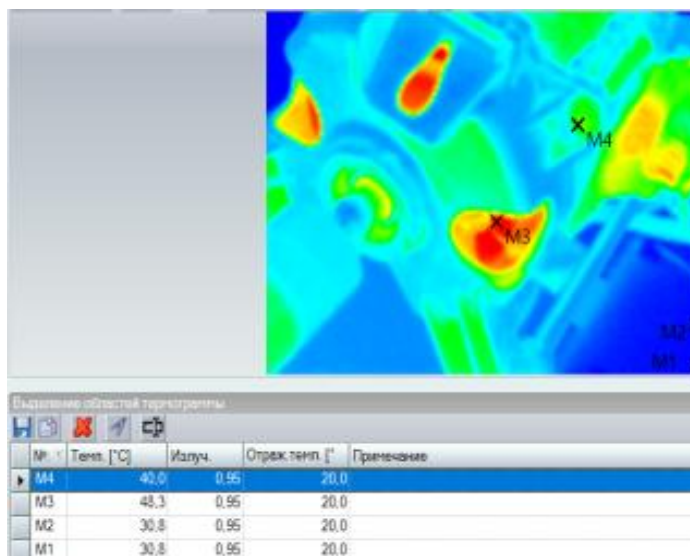


Рис. 11. Показания с тепловизора исследуемого двигателя в конце нагрузочного режима

В таблице приведены средние квадратические значения, собранные при испытании устройства в трех режимах.

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что работоспособность устройства подтверждена многократными испытаниями: в холостом режиме, под активной нагрузкой и в номинальной нагрузке [10, 11]. Устройство рекомендуется к применению в учебной деятельности, так как поможет в процессе обучения получить дополнительные знания, что даст возможность более глубокого понимания тепловых процессов в двигателях и научной деятельности, что даст возможность для разработки новых устройств и новых способов усовершенствования методов защиты электроприводов.

### Литература

1. *Грязев М.В., Кузнецова О.А.* Оптимальное управление асинхронным электроприводом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2011. – № 5. – С. 212–220.
2. *Макаров В.Г.* Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 6. – С. 79–93.
3. *Макаров В.Г.* Анализ современного состояния теории и практики асинхронного электропривода // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 6. – С. 109–120.
4. *Рябинин И.А., Парфенов Ю.М.* Надежность, живучесть и безопасность корабельных электроэнергетических систем. – СПб.: ВМА, 1997. – 430 с.
5. *Ещенко Д.В., Никитин А.Т., Белов О.А.* Практическое применение методов тепловизионного анализа и контроля // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2020. – № 54. – С. 6–19.
6. *Пантина А.И., Белов О.А.* Перспективы методики инфракрасной диагностики силовых трансформаторов // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Восьмой всерос. науч.-практ. конф. (23–25 мая 2017 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2017. – С. 102–104.
7. *Михеев Е.А.* Частотное регулирование электропривода // Символ науки. – 2016. – № 11. – С. 124–126.
8. *Козярук А.Е., Рудаков В.В.* Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – СПб.: Санкт-Петербургская электротехническая компания (СПЭК), 2004. – С. 127.
9. *Халина Т.М., Стальная М.И.* Исследование характеристик электропривода с преобразователем векторно-алгоритмического типа // Электротехника. – 2018. – № 12. – С. 48–52.
10. *Зюзев А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В.* Программно-аппаратный симулятор электропривода // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2013. – № 1. – С. 116–123.
11. *Цвенгер И.Г.* Сравнительный анализ программных средств моделирования электромеханических процессов в электроприводе // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 12. – С. 246–251.



УДК 621.313.33

**И.В. Нестерук**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: ivandranin00@gmail.com*

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ СИСТЕМ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ**

Автоматизация технологических процессов является одним из основных способов повышения эффективности судовых систем и технологического оборудования. Качественная работа автоматики обеспечивает непрерывность рабочего процесса, поддержание параметров в пределах установленных норм, защиту от нестандартных режимов, а также в целом надежность и безопасность эксплуатации технических систем. Развитие элементной базы систем автоматического управления существенно расширяет возможности их применения в судовых технологических комплексах и способствует повышению эффективности обслуживаемых технологических процессов. В связи с этим возникает целесообразность замены устаревших элементов автоматики на новые образцы, чтобы повысить функциональность и эффективность производственных комплексов. Кроме того, в процессе эксплуатации судна и отдельных видов оборудования вскрываются проектные недостатки, которые требуется устранить для обеспечения нормализации технологического процесса. В этом случае также необходимо использовать более современную элементную базу, внедрение которой позволит не только устранить недостатки, но и расширит функциональные возможности технологического комплекса. В статье на примере датчиков контроля уровня жидкости приводится обоснование их замены в одной из судовых технологических систем.

**Ключевые слова:** автоматика, автоматическое управление, датчики уровня, электропривод, техническая эксплуатация, эффективность, надежность, безопасность.

**I.V. Nesteruk**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: ivandranin00@gmail.com*

### **SHIP SYSTEMS EFFICIENCY IMPROVEMENT BY INTRODUCING MODERN AUTOMATION ELEMENTS**

Automation of technological processes is one of the main ways to improve the efficiency of ship systems and technological equipment. High-quality operation of automation ensures the continuity of the work process, maintaining parameters within established standards, protection from non-standard modes, as well as overall reliability and safety of operation of technical systems. The development of the element base of automatic control systems significantly expands the possibilities of their application in ship technological complexes and contributes to increasing the efficiency of the serviced technological processes. In this regard, it becomes expedient to replace outdated automation elements with new models, thereby increasing the functionality and efficiency of production complexes. In addition, during the operation of the vessel and individual types of equipment, design deficiencies are revealed that need to be eliminated to ensure the normalization of the technological process. In this case, it is also necessary to use more modern element base, the implementation of which will not only eliminate the deficiencies, but also expand the functionality of the technological complex. Using the example of liquid level control sensors, the rationale for their replacement in one of the ship's technological systems is given in the article.

**Key words:** automation, automatic control, level sensors, electric drive, technical operation, efficiency, reliability, safety.

Потребности судовладельцев рыбодобывающей промышленности растут с каждым годом все больше и больше. Это, в свою очередь, прямо или косвенно подталкивает судовладельцев

на некое развитие своего рыбодобывающего флота. Судовладельцы не жалеют финансирования на улучшение и ускорение процессов обработки рыбы.

Рыбный цех судов стараются снабдить максимально современным обрабатывающим оборудованием, которое способно: ускорить процесс обработки, обслуживаться с наименьшими затратами для судовладельца, не привлекать большое количество персонала к процессу работы оборудования. Все это благоприятно складывается на финансовом положении судовладельца. Однако качество и объемы производства нужно повышать не только прямо, но и косвенно. К одному из таких улучшений технологического оборудования можно отнести частичную модернизацию цепи управления насосов-измельчителей.

Эта модернизация способна не только увеличить объемы и качество выпускаемой продукции, но также повысить общий уровень техники безопасности рабочего персонала в рыбном цеху, снизить риск выхода из строя других силовых агрегатов рыбного цеха, и в целом повысить исправность и стабильность работы всего процесса по обработке рыбы, к которому и стремятся все судовладельцы [1].

В основном все суда рыбопромыслового флота РФ были построены примерно в 90-х годах, и большая часть силовых агрегатов технологического оборудования попросту устарела и нуждается в замене. Однако замена старого оборудования на новое не всегда экономически выгодна и целесообразна, если есть возможность модернизировать имеющееся оборудование и при этом получить такой же результат, который бы получился и при полной замене [2].

Почти на всех судах постройки 90-х годов насосы-измельчители рыбного цеха устроены одинаково. Есть два режима работы насосов: автоматический и ручной. Автоматический режим представляет собой опустошение колодца с отходами после замыкания цепи питания поплавковым датчиком. Как только колодец полностью заполняется водой, вода поднимает поплавок и замыкает цепь управления насоса на работу, причем время, которое он работает, равно рассчитано на полное опустошение колодца [3, 4].

Как только установленное время проходит, работа насоса прекращается, и колодец заново набирается водой. Ручной режим работы применяется в экстренных ситуациях, когда автоматический режим не работает, или поток воды на колодец, в котором находится насос, очень большой и целесообразно использовать ручной режим работы насоса.

Особенность конструкции автоматического режима работы заключается в исполнении поплавкового датчика, изображенного на рис. 1, который и организует автоматический режим работы насоса.



Рис. 1. Поплавковый датчик

Датчик представляет собой поплавок, расположенный и прикрепленный на поверхности колодца. Датчик имеет два функциональных положения, а именно: крайнее верхнее и крайнее нижнее. Когда толща воды поднимает поплавок до крайнего верхнего положения, насос начинает работать.

Однако у данного вида датчика есть некоторые технические просчеты, которые не позволяют ему работать во всех возможных условиях. Одним из таких условий является низкая температура в рыбном цеху. Когда температура в рыбном цеху опускается ниже нуля градусов

по Цельсию, возникает риск намерзания воды и частиц отходов на самом поплавке. Это, в свою очередь, создает некое препятствие для достижения крайнего верхнего положения датчика, и как следствие это приводит к невозможности работы насоса в автоматическом режиме. Если в цепи управления выбран автоматический режим работы, и датчик не срабатывает, то рыбный цех начинает тонуть в отходах с водой.

Во избежание данных проблем оптимальным решением по частичной модернизации насосов-измельчителей будет являться замена поплавковых датчиков на датчики давления, конструктивные особенности которых позволяют избежать всех вышеперечисленных проблем.

Датчики давления являются более эффективным и надежным элементов автоматики, работоспособность которых практически не зависит от внешних факторов. В этом заключается их главное преимущество [5].

Данные датчики начали устанавливать на судах 2000-х годов постройки. Конструктивно датчик давления представляет собой металлический стакан, опущенный к самому верхнему положению уровня воды в колодце, соединенный резиновым шлангом с реле давления, изображенного на рис. 2.



Рис. 2. Реле давления

Когда толща воды попадает в стакан, она начинает толкать воздух, который находится в шланге, а воздух в свою очередь создает давление на мембрану, расположенную внутри реле, которая и замыкает цепь автоматического режима работы насоса. Благодаря этим конструктивным особенностям данного вида датчиков, намерзание воды и частиц отходов на этом датчике ни коем образом не сказывается на его работе, а значит гарантировано опустошение колодцев насосами согласно автоматическому управлению, без привлечения рабочего персонала. Также предполагается, что палуба завода не будет завалена отходами, а значит минимизируется риск браковок продукции, а также повышается общая техника безопасности рабочего персонала в рыбном цеху.

Несмотря на то что повышение производительности рыбного цеха путем замены или модернизации старого оборудования зачастую является сильно финансово затратным, есть силовые агрегаты, даже частичная модернизация которых может нести за собой положительные эффекты для всего рыбного цеха в целом при меньших затратах, чем замена старого оборудования на новое [6].

Таким образом, замена устаревших и неэффективных элементов автоматики на современные и более технически совершенные устройства позволит решить ряд технологических проблем, связанных с особыми условиями эксплуатации, а также повысить надежность и безопасность системы в целом. В судовых условиях факторы надежности и безопасности являются приоритетными, и их обеспечение является важной задачей [7].



Кроме того, эффективная работа системы очистки предотвращает возможность затопления производственных помещений, снижает воздействие заборной воды на электрооборудование, расположенное в цеху, и способствует повышению качества и эффективности производства. Немаловажным фактором также является улучшение условий труда персонала рыбообрабатывающего цеха, что в свою очередь, несомненно, существенно влияет на производительность труда.

### Литература

1. Белов О.А. Техническое обеспечение морских судов как фактор эффективной и безопасной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Четвертой междунар. науч.-техн. конф. (25–26 ноября 2021 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 5–9.

2. Белов О.А. Аналитический обзор факторов эффективной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. (17–18 октября 2018 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2019. – С. 5–9.

3. К вопросу совершенствования судоремонта и технического обслуживания морских судов Камчатского края / Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.О. Рогожников, Ю.В. Крутьень // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы XIV Нац. (всерос.) науч.-практ. конф. (21–22 марта 2023 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2023. – С. 109–112.

4. Исследование тепловых процессов асинхронного электродвигателя в продолжительном режиме работы с вариативной нагрузкой / Г.С. Мясников, К.Р. Федосеев, Н.С. Рябовол, О.А. Белов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (9–10 ноября 2023 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2024. – С. 58–62.

5. Федосеев К.Р. Исследование тепловых процессов асинхронного электродвигателя в кратковременном режиме работы с номинальной нагрузкой / К.Р. Федосеев, Н.С. Рябовол, Г.С. Мясников, О.А. Белов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (9–10 ноября 2023 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2024. – С. 86–90.

6. Белов О.А., Марченко А.А., Труднев С.Ю. Анализ расчетно-аналитических методов прикладных задач технической безопасности // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2015. – № 4. – С. 7.

7. Белов О.А., Парфенкин А.И. Обзор основных факторов снижения безопасности сложных технических систем // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2015. – № 35. – С. 11.

УДК 621.311

**О.С. Парсентьев<sup>1</sup>, Т.А. Мусаев<sup>2</sup>, О.В. Федоров<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Луганский государственный университет имени Владимира Даля,  
Луганск, 291034*

*e-mail: parsentevo@mail.ru;*

<sup>2</sup> *АО «Сетевая компания»,  
Казань, 420094*

*e-mail: musaevkgeu@rambler.ru;*

<sup>3</sup> *Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,  
Нижний Новгород, 603155*

*e-mail: fov52@mail.ru*

### **МИНИМИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 35 КВ СЕВЕРНОГО РЕГИОНА ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ ПУТЕМ РЕНОВАЦИИ ПОНИЗИТЕЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ**

Рассмотрена проблема технического состояния массива масляных двухобмоточных силовых трансформаторов с сочетанием напряжений 35/10 кВ в распределительных электрических сетях напряжением 35кВ Северного региона ГУП ЛНР «Республиканская сетевая компания». Используя обобщенный метод расчета, установлено, что при трансформации электрической энергии через массив масляных двухобмоточных силовых трансформаторов с сочетанием напряжений 35/10 кВ этой электросети в последних выделяются основные потери активной электроэнергии, превышающие нормируемое значение. Для снижения основных потерь активной электроэнергии, связанных с трансформацией в понизительных подстанциях распределительной электрической сети напряжением 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «Республиканская сетевая компания», в работе предлагаются варианты реновации этих подстанций с установкой групп энергоэффективных двухобмоточных масляных и сухих силовых трансформаторов с сочетанием напряжений 35/10 кВ производства России и Китая. По результатам анализа выбран вариант реновации понизительных подстанций в распределительной электрической сети напряжением 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «Республиканская сетевая компания» с установкой энергоэффективных групп силовых трансформаторов с сочетанием напряжений 35/10 кВ, имеющих наименьшие потери активной электроэнергии при трансформации.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, реновация, понизительная подстанция, сухое исполнение, класс напряжения, сочетание напряжений, трансформация электрической энергии, потери холостого хода, потери короткого замыкания, группа номинальной мощности.

**O.S. Parsentev<sup>1</sup>, T.A. Musaev<sup>2</sup>, O.V. Fedorov<sup>3</sup>,**

<sup>1</sup> *Lugansk State University named after Vladimir Dahl,  
Lugansk, 291034*

*e-mail: parsentevo@mail.ru;*

<sup>2</sup> *JSC "Setevaya kompaniy",  
Kazan, 420094*

*e-mail: musaevkgeu@rambler.ru;*

<sup>3</sup> *Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, 603155*

*e-mail: fov52@mail.ru*

### **MINIMIZATION OF MAJOR ELECTRICITY LOSSES IN 35 KV ELECTRIC GRIDS IN THE NORTHERN REGION OF THE LUHANSK PEOPLE'S REPUBLIC THROUGH THE RENOVATION OF STEP-DOWN SUBSTATIONS**

The problem of the technical condition of an array of oil double-winding power transformers with a combination of voltages of 35/10 kV in distribution electric networks with a voltage of 35 kV in the Northern region of the SUE LPR "Respublikanskaya setevaya kompaniya" is considered. Using a generalized calculation method, it was

found that during the transformation of electrical energy through an array of oil-fired double-winding power transformers with a combination of voltages of 35/10 kV of this power grid, the main losses of active electricity exceeding the normalized value are allocated in the latter. To reduce the main losses of active electricity associated with the transformation in step-down substations of the 35 kV distribution electric network in the Northern region of the SUE LPR “Respublikanskaya setevaya kompaniya”, the renovation options for these substations with the installation of groups of energy-efficient double-winding oil and dry power transformers with a combination of 35/10 kV voltages produced in Russia and China are suggested. Based on the results of the analysis, a variant of renovation of step-down substations in the 35 kV distribution electric grid of the Northern region of the SUE LPR “Respublikanskaya setevaya kompaniya” was selected with the installation of energy-efficient groups of power transformers with a combination of voltages of 35/10 kV, having the least loss of active electricity during transformation.

**Key words:** power transformer, renovation, step-down substation, dry design, voltage class, voltage combination, transformation of electrical energy, no-load losses, short circuit losses, rated power group.

Текущее состояние российской электроэнергетики остается сложным. Снизить потери при трансформации электрической энергии без реновации подстанций не представляется возможным [1].

Распределительные электрические сети напряжением 35 кВ Северного региона Государственного унитарного предприятия Луганской Народной Республики «Республиканская сетевая компания» (РЭС – 35 кВ ГУП ЛНР «РСК») состоят из 58 питающих понизительных подстанций (ПС) с сочетанием напряжений 35/10 кВ, в которых установлены 87 двухобмоточных масляных силовых трансформатора (СТ) с аналогичными сочетаниями напряжений суммарной установленной мощностью 255 530 кВА [2]. Осуществляют электрификацию объектов народного хозяйства на территории Беловодского, Белокуракинского, Марковского, Меловского, Новоайдарского, Новопсковского, Станично-Луганского и Старобельского муниципальных округов через понизительные трансформаторные ПС с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ, находящиеся в оперативно-техническом обслуживании районов электрических сетей, закрепленных на этих территориях [3].

На понизительных ПС напряжением 35/10 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» эксплуатируется массив масляных двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ, II и III габаритов, номинальной мощностью от 630 до 6 300 кВА, одна часть которого представляет ряд мощностей, сформированный по ГОСТ 9680 – 77 [2].

Другая часть на этих понизительных ПС напряжением 35/10 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» представляет массив, состоящий из шести масляных двухобмоточных СТ (6,9 % от общего количества) номинальной мощностью: 1 800 и 3 200 кВА, срок эксплуатации которых в настоящий момент превышает 50 лет, а потери холостого хода и короткого замыкания при трансформации электрической энергии превышают в несколько раз нормируемое значение по ГОСТ 11677 – 85 «Общие технические условия».

Целью работы является реновация понизительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» для минимизации основных годовых потерь активной электроэнергии при трансформации.

Для достижения цели в работе поставлены такие задачи:

1. Провести сравнительный анализ суммарных годовых потерь активной электроэнергии, связанных с трансформацией в массиве номинальной мощности существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ на ПС напряжением 35/10 кВ промышленной частоты от токов нагрузки, а также в планируемых для замены группах номинальной мощности энергоэффективных двухобмоточных СТ с аналогичным сочетанием напряжений с масляной и литой изоляцией промышленной частоты отечественного и зарубежного производства после реновации этих ПС в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК».

2. По итогам сравнительного анализа выбрать варианты для реновации понизительных подстанций в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» с группами номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ, имеющих наименьшие суммарные годовые потери активной электроэнергии при ее трансформации.

Для определения основных суммарных годовых потерь активной электроэнергии в существующем централизованном парке двухобмоточных масляных СТ промышленной частоты с сочетанием напряжений 35/10 кВ РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» от токов

нагрузки при трансформации электрической энергии используется обобщенный метод расчета, суть которого и допущения изложены в [4].

При расчете не учитываются потери активной электроэнергии, выделяемые:

- в СТ, балансодержателями которых не являются РЭС – 35кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК»;

- в коммутационно-защитных аппаратах, контрольно-измерительном оборудовании и ошиновке, связанных с образованием переходного сопротивления в понизительных ПС напряжением 35/10 кВ РЭС – 35кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК»;

- от действия электромагнитных переходных процессов, возникающих в результате коммутации в РЭС от действия токов одно-, двух-, трехфазного и межвиткового короткого замыкания, бросков токов намагничивания при включении СТ в работу и аномальных режимов работы в РЭС – 35кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК».

Таким образом, после всех уточнений и допущений формулы для определения основных суммарных годовых потерь активной электроэнергии в существующем массиве двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» при ее трансформации, а также в группах номинальной мощности двухобмоточных масляных и сухих СТ аналогичного сочетания напряжения, планируемых для замены существующего массива трансформаторов, окончательно примет вид [4]:

$$\sum W_{\text{АКТ.ГРУП.СТ}}^{\text{ГОД}} = \frac{n \cdot T \cdot (P_{\text{ХХ}} + P_{\text{КЗ}} \cdot K_3^2)}{10^9}, \text{ [ГВт}\cdot\text{ч]}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ХХ}}$  – мощность потерь холостого хода, Вт [2–5];

$P_{\text{КЗ}}$  – мощность потерь короткого замыкания, Вт [2–5];

$T$  – время работы СТ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК», ч,  $T = 8\,760$  ч;

$K_3$  – коэффициент нагрузки на СТ;

$n$  – количество одинаковых по мощности СТ, ед.

Расчеты основных суммарных годовых потерь активной электроэнергии в существующем массиве двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ ГУП ЛНР «РСК» промышленной частоты при ее трансформации проводились при следующих значениях коэффициента нагрузки на СТ  $K_3 = 0; 0,25; 0,5; 0,75$  и  $1,0$ .

Анализ проведенных расчетов по формуле (1) позволил сделать заключение о том, что при изменении нагрузки  $K_3$  от 0,5 до 1,0 в массиве существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ промышленной частоты, эксплуатируемых на понизительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК», суммарные основные годовые потери активной электроэнергии  $\sum W_{\text{АКТ.ГРУП.СТ}}^{\text{ГОД}}$  будут составлять 6,24–16,69% от величины суммарного отпуска электрической энергии, поступаемого из единой национальной электрической сети (ЕНЭС) ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» общего назначения, и будут в 1,54–4,11 раза выше усредненного показателя норматива потерь электрической энергии при ее передаче по ЕНЭС с уровнем напряжения «220 кВ и ниже» и остаются высокими [6].

Далее проводится сравнительный анализ годовых потерь активной электроэнергии в существующем массиве двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ на понизительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК», с годовыми потерями активной электроэнергии в вариантах групп номинальной мощности энергоэффективных двухобмоточных СТ отечественного и зарубежного производства, предназначенных для установки после реновации этих ПС.

В варианте № 1 предлагается реновация понизительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» с заменой существующего массива двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ, представленных в [2; 3] на группы номинальной мощности масляных двухобмоточных СТ серии S9 промышленной частоты с уровнем напряжения короткого замыкания 6–8% аналогичного сочетания напряжений номиналом: 800; 1 000; 1 600; 2 000; 2 500; 3 150; 4 000 и 6 300 кВА производства компании CNC Electric GroupCo., Ltd [5].

Уточненное количество групп двухобмоточных масляных СТ серии S9 промышленной частоты с сочетанием напряжений 35/10 кВ будут такими, как это представлено в таблице. Суммарная мощность групп номинальной мощности СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ на понижительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» после такой реновации составит 256 400 кВА.

**Количество и суммарная номинальная мощность групп двухобмоточных СТ серии S9 с сочетанием напряжений 35/10 кВ, принимаемых к установке после реновации понижительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК»**

Номинальная мощность СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ $S_{ном}$ , кВА	Количество, ед.	Потери холостого хода одного СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ, $P_{хх}$ , Вт	Потери короткого замыкания одного СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ, $P_{кз}$ , Вт
800	1	1 250	9 900
1 000	1	1 480	12 150
1 600	11	2 130	17 550
2 000	4	2 610	19 350
2 500	39	3 150	20 700
3 150	2	3 870	24 300
4 000	25	4 640	28 800
6 300	4	6 570	36 900
Итого	87	-	-

Анализ расчетов позволил сделать заключение о том, что при изменении коэффициента нагрузки  $K_3$ :

– от 0 до 1,0 в группах номинальной мощности двухобмоточных масляных СТ серии S9 с сочетанием напряжений 35/10 кВ суммарные основные годовые потери активной электроэнергии при трансформации  $\sum W_{АКТ.ГРУП.СТ}^{ГОД}$  будут составлять 1,71–12,86% от величины суммарного отпуска электрической энергии, поступаемого из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» общего назначения [6];

– от 0,5 до 1,0 в группах номинальной мощности двухобмоточных масляных СТ серии S9 с сочетанием напряжений 35/10 кВ суммарные основные годовые потери активной электроэнергии при трансформации  $\sum W_{АКТ.ГРУП.СТ}^{ГОД}$  будут в 1,11–3,17 раза выше усредненного показателя норматива потерь электрической энергии при ее передаче по ЕНЭС с уровнем напряжения «220 кВ и ниже» [6].

В варианте № 2 предлагается реновация понижительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» с заменой существующего массива двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ, представленных в [2, 3] на группы номинальной мощности двухобмоточных СТ серии SC(Z)B9, выполненных с литой изоляцией промышленной частоты, уровнем напряжения короткого замыкания 6–9% аналогичного сочетания напряжений номиналом: 800; 1 000; 1 600; 2 000; 2 500; 3 150; 4 000 и 6 300 кВА, производства компании CNC Electric Group Co., Ltd [5]. Количество и суммарная номинальная мощность групп СТ серии SC(Z)B9 с сочетанием напряжений 35/10 кВ на понижительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» будут аналогичны представленным в таблице.

Анализ расчетов позволил сделать заключение о том, что при изменении коэффициента нагрузки  $K_3$ :

– от 0 до 1,0 в группах номинальной мощности двухобмоточных сухих СТ серии SC(Z)B9 с сочетанием напряжений 35/10 кВ суммарные основные годовые потери активной электроэнергии при трансформации  $\sum W_{АКТ.ГРУП.СТ}^{ГОД}$  будут составлять 2,95–14,93% от величины суммарного отпуска электрической энергии, поступающей из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» общего назначения [6];

– от 0,5 до 1,0 в группах номинальной мощности двухобмоточных сухих СТ серии SC(Z)B9 с сочетанием напряжений 35/10 кВ суммарные основные годовые потери активной электроэнергии при трансформации  $\sum W_{АКТ.ГРУП.СТ}^{ГОД}$  будут в 1,46–3,68 раза выше усредненного

показателя норматива потерь электрической энергии при ее передаче по ЕНЭС с уровнем напряжения «220 кВ и ниже» [6].

Обобщающий анализ позволяет сделать заключение о том, что реновация понизительных ПС напряжением 35/10 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК», предусмотренная в варианте № 1, обеспечит наименьшие суммарные основные годовые потери активной электроэнергии при ее трансформации.

В работе предложено решение актуальной научно-технической задачи – минимизация основных потерь активной электроэнергии на понизительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35 Северного региона кВ ГУП ЛНР «РСК» при трансформации. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что при изменении нагрузки  $K_3$  от 0 до 1,0 в массиве существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ промышленной частоты, эксплуатируемых на понизительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК», суммарные основные годовые потери активной электроэнергии при трансформации  $\sum W_{\text{АКТ.ГРУП.СТ}}^{\text{ГОД}}$  будут составлять 2,75–16,69% от величины суммарного отпуска электрической энергии, поступающей из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» общего назначения [6].

2. При изменении коэффициента нагрузки  $K_3$  от 0 до 1,0 в группах номинальной мощности двухобмоточных масляных СТ серии S9 с сочетанием напряжений 35/10 кВ промышленной частоты, планируемых к установке на понизительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» после реновации, суммарные основные годовые потери активной электроэнергии при трансформации  $\sum W_{\text{АКТ.ГРУП.СТ}}^{\text{ГОД}}$  снизятся в 1,30–1,61 раза в сравнении с существующими основными потерями активной электроэнергии, возникающими в массиве двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ, эксплуатируемых в настоящий момент в этих ПС.

3. Для дальнейшей минимизации суммарных основных и дополнительных потерь активной и перетекания реактивной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 35/10 кВ, предусмотренных вариантом № 1, рекомендуется использование на понизительных ПС напряжением 35/10 кВ в РЭС – 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» фильтрокомпенсирующих устройств.

### Литература

1. Россети ЛЕНЭНЕРГО/Реновация основных фондов – оптимальный способ снизить потери в электросетях [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosseti-lenenergo.ru> (дата обращения: 03.09.2024).

2. Парсентьев О.С. Современные научные и прикладные задачи электроэнергетики: Учеб. пособие. – Луганск: ООО «НПК ПЕРСПЕКТИВА», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», 2023. – 271 с. – ISBN 978-5-605-07958-3. – EDNDXUWME.

3. Парсентьев О.С. Качество электрической энергии: Учеб. пособие. – Луганск: ООО «НПК ПЕРСПЕКТИВА», 2024. – 306 с. – ISBN 978-5-605-15700-7. – EDNWNKLG.

4. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 582 с.

5. Каталог силовых трансформаторов CNC Deliver/Power for better/Life Power transformer/Oil immersed transformer/Dry-type transformer [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cncele.com> (дата обращения: 12.07.2024).

6. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 30.11.2022 года № 1272 «Об утверждении нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по единой национальной (общероссийской) электрической сети, осуществляемой публичным акционерным обществом «Федеральная сетевая компания – Россети» с использованием объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих публичному акционерному обществу «Федеральная сетевая компания – Россети» на праве собственности или ином законном основании, на 2023 год» [Электронный ресурс]. – URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/23795/195515#:~:text=yf> (дата обращения: 03.10.2023).

УДК 004.94:621.313.333

**С.В. Попов, О.А. Бурмакин, Ю.С.Мальшев**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
Нижний Новгород, 603951  
e-mail: elektrikasp@mail.ru*

### **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЯКОРНОЙ ЛЕБЕДКИ ПРИ ПИТАНИИ ОТ СУДОВОЙ СЕТИ ЧЕРЕЗ СОГЛАСУЮЩИЙ ТРАНСФОРМАТОР**

В статье рассмотрены вопросы выбора установленной мощности согласующего трансформатора для питания электропривода якорно-швартовного механизма (ЯШМ) в условиях ограниченности серии электроприводов лебедок с напряжением питания 220 В. Разработана модель системы электроснабжения электропривода лебедки, получающей питание от судового генератора через согласующий трансформатор. Приведены диаграммы напряжений судовой сети и питания электродвигателя при изменении режимов работы якорно-швартовного механизма. Рассмотрены режимы пуска при номинальной нагрузке, стоянке под током и последующим разгоне до номинальной скорости. Построены диаграммы зависимостей значений падения напряжения сети и питания электродвигателя от изменения загрузки генератора с различными соотношениями мощностей согласующего трансформатора и электродвигателя. Проведен анализ полученных зависимостей с целью сверки соответствия требованиям правил Российского Классификационного Общества (РКО). Сформулированы рекомендации для проектантов судовых систем при выборе палубных механизмов.

**Ключевые слова:** моделирование судового электропривода, якорно-швартовный механизм, согласующий трансформатор, напряжение питания электродвигателя, значение провала напряжения, коэффициент загрузки генератора.

**S.V. Popov, O.A. Burmakin, Yu.S. Malyshev**

*Volga State University of Water Transport,  
Nizhny Novgorod, 603951  
e-mail: elektrikasp@mail.ru*

### **ANALYSING THE RESULTS OF ANCHOR WINCH ELECTRIC DRIVE SIMULATION SUPPLIED FROM SHIP'S NETWORK THROUGH A MATCHING TRANSFORMER**

The issues of selecting the installed capacity of the matching transformer for power supply of the electric drive of the anchor-mooring mechanism (AMM) in conditions of a limited series of winch electric drives with a supply voltage of 220 V are discussed. A model of the power supply system of the winch electric drive, powered by the ship's generator through the matching transformer, was developed. Oscillograms of the ship's network voltage and electric motor power supply when changing the operating modes of the anchor-mooring mechanism are given. The modes of starting at rated load, parking under current and subsequent acceleration to rated speed are considered. Diagrams of dependencies of the network voltage drop and electric motor supply on changes in generator load with different ratios of the powers of the matching transformer and electric motor were constructed. The analysis of the obtained dependencies is carried out in order to verify compliance with the requirements of the rules of the Russian Classification Society. The recommendations for designers of ship systems when choosing deck mechanisms are formulated.

**Key words:** ship electric drive simulation, anchor mooring mechanism, matching transformer, electric motor supply voltage, voltage dip value, generator load factor.

Насыщение судна электрооборудованием и необходимыми для его эксплуатации механизмами является непростой инженерной задачей, особенно в период дефицита и ограниченной возможности подбора импортного оборудования. Оптимальным решением вопроса выбора оборудования является соответствие реальных электромеханических и массогабаритных параметров расчетным.

Особенно остро такие вопросы возникают при подборе палубных механизмов, работающих от судовой сети с напряжением 220 В [1]. Предложенный стандартный ряд промышленно изготовленного оборудования не удовлетворяет конструкторским решениям, что приводит к изменению параметров в сторону увеличения установленной мощности необходимого оборудования [1, 2].

Замена оборудования на более мощное приводит к изменениям чертежей и конструктивных особенностей расположения оборудования на палубах, расчетов остойчивости, нагрузки на электростанцию и др. В ряде случаев наиболее оптимальным вариантом, с точки зрения мощности лебедки и создаваемых моментов на цепной звездочке, будут устройства с электроприводом, рассчитанным на питание напряжением 380 В. Для согласования напряжения цепи питания электропривода лебедки и сети удобно использовать трехфазный трансформатор сухого типа [1].

Применение трансформатора в качестве согласующего устройства требует ответов на несколько вопросов:

- Каково влияние трансформатора на судовую сеть, поскольку трансформатор является активно-индуктивной нагрузкой с изменяемым коэффициентом мощности, зависящим от нагрузки на вторичной обмотке?

- По каким критериям можно определить мощность трансформатора в зависимости от мощности электропривода лебедки?

- Как изменяются характеристики электропривода лебедки при изменении напряжения питания вследствие действия внешней характеристики трансформатора?

Ответы на поставленные вопросы возможно получить при исследовании работы физического оборудования, что связано со значительными экономическими затратами, поэтому более целесообразным вариантом для исследования характеристик электропривода является имитационное моделирование. Моделирование в программе Matlab позволяет получать как модели, использующие стандартные блоки с ограниченным набором вводимых параметров, так и созданные пользователем блоки, учитывающие больше возмущающих воздействий, с целью повышения точности моделирования.

Исследование работы электропривода с подключением электродвигателя через согласующий трансформатор производилось для трех основных режимов: пуск, работа при номинальной нагрузке и стоянка под током – режим, соответствующий процессу отрыва якоря от грунта. Моделирование выполнялось для двух электроприводов судовых лебедок с применением электродвигателей мощностью ( $P_d$ ) 1,2 кВт (1,7 кВА) и 5 кВт (6,49 кВА), а также согласующими трансформаторами с номинальными мощностями 2,5; 6,3 и 10 кВА для первого и 6,3; 10 и 40 кВА для второго электродвигателей соответственно.

Модель настроена таким образом, что согласующий трансформатор подключается к судовой сети с включенным к его вторичной обмотке электродвигателем. Анализ степени влияния на судовую сеть каждого из перечисленных электроприводов был выполнен на основе исследования разработанных моделей. Моделирование выполнялось при подключении электропривода к предварительно загруженному на 20; 40 и 60% от номинальной мощности генератору. Коэффициент мощности подключаемой нагрузки равен 0,8.

На рис. 1, а приведены диаграммы напряжений судовой сети при подключении электропривода мощностью 5 кВт через согласующий трансформатор мощностью 6,3 кВт, а на рис. 1, б – напряжение питания электродвигателя, при предварительной загрузке генератора на 60% от номинальной мощности. На диаграмме показано изменение напряжения при подключении электропривода к сети на 0,2-й с, затем происходит его разгон до номинальной скорости в течение 1 секунды с последующей загрузкой до полной остановки на 2-й с.

При подключении нагрузки наблюдается провал напряжения судовой сети  $\Delta U_{cc}$  до 17% от номинального значения и существенный провал напряжения питания двигателя  $\Delta U_d$  до 33%, что свидетельствует о недостаточной мощности согласующего трансформатора.

На диаграммах рис. 2 и 3 приведены зависимости значений провалов напряжения питания электродвигателей, подключенных к генератору через согласующие трансформаторы различной мощности, при пуске  $\Delta U_d\%$  и отрыве якоря от грунта (стоянка под током)  $\Delta U_{дв}\%$  соответственно. На диаграммах рис. 4 и 5 показаны провалы напряжения судовой сети ( $\Delta U_{cc}\%$  и  $\Delta U_{св}\%$ ) при тех же режимах.

Из зависимостей следует, что значение падения напряжения питания электродвигателя  $\Delta U_d\%$  уменьшается при увеличении мощности трансформатора  $P_{тр}$ , однако при этом увеличивается значение падения напряжения судовой сети  $\Delta U_{cc}\%$ .



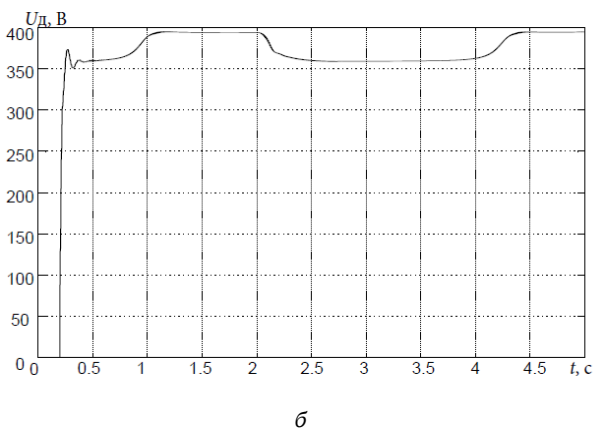
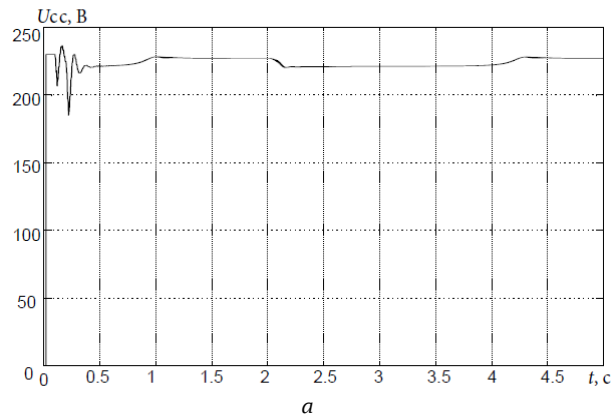


Рис. 1. Диаграммы напряжений при подключении электропривода к генератору, нагруженному на 60% от номинальной мощности: а – сети, б – двигателя

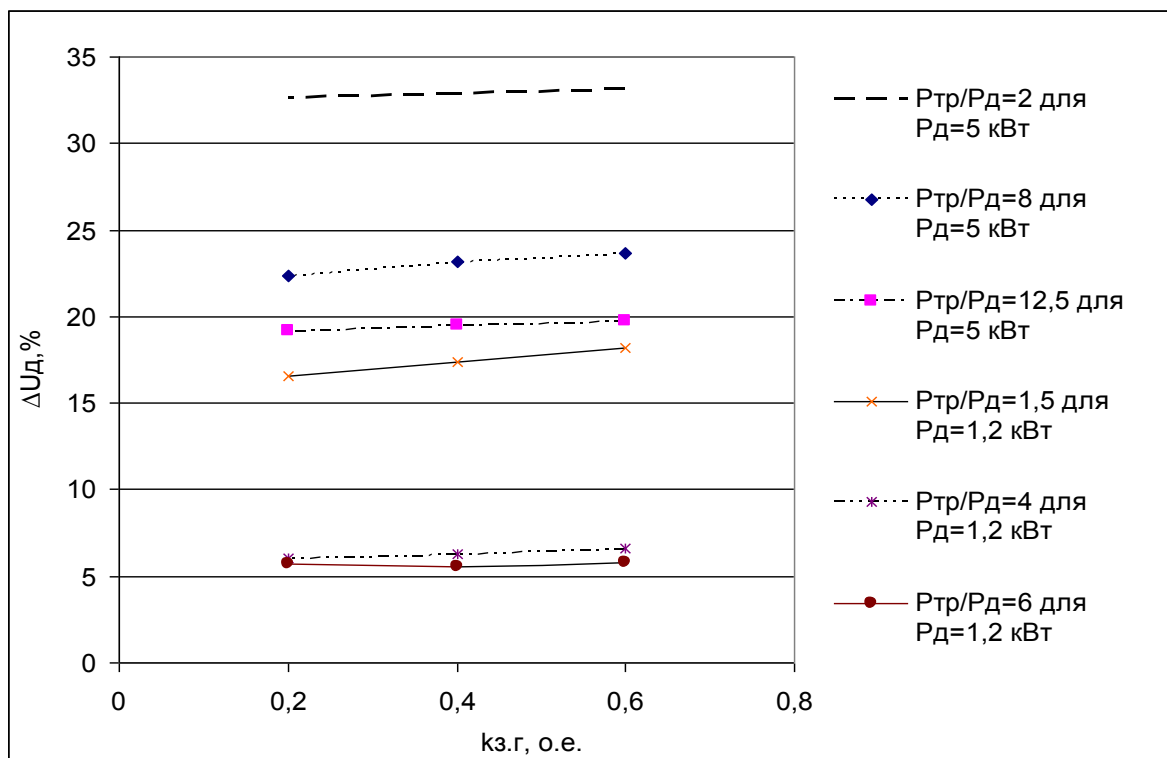


Рис. 2. Зависимости величины провала напряжения питания электродвигателя  $\Delta U_d\%$  при его пуске от коэффициента загрузки генератора  $k_{з.г}$  с различными соотношениями мощностей электродвигателя ЯШМ и согласующего трансформатора

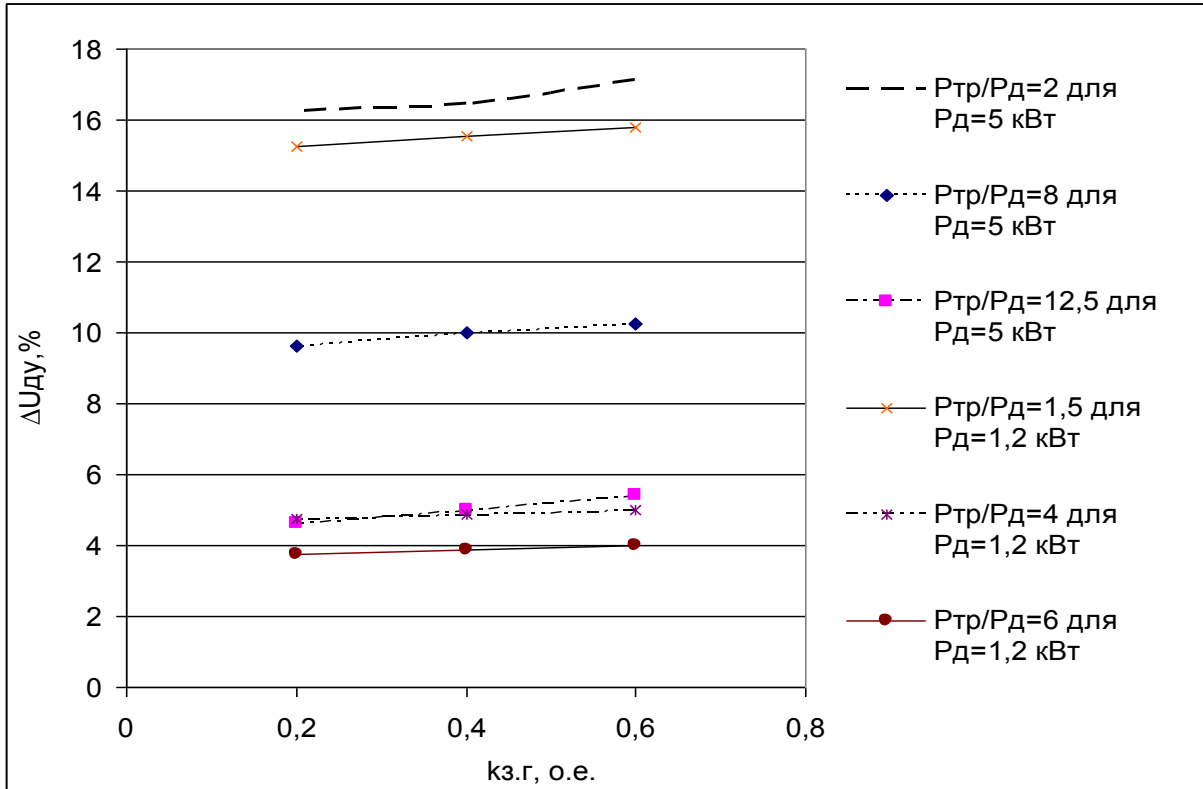


Рис. 3. Зависимости установившегося значения отклонения напряжения питания электродвигателя  $\Delta U_{ду},\%$  при стоянке под током от коэффициента загрузки генератора  $k_{з,2}$  с различными соотношениями мощностей электродвигателя ЯШМ и согласующего трансформатора

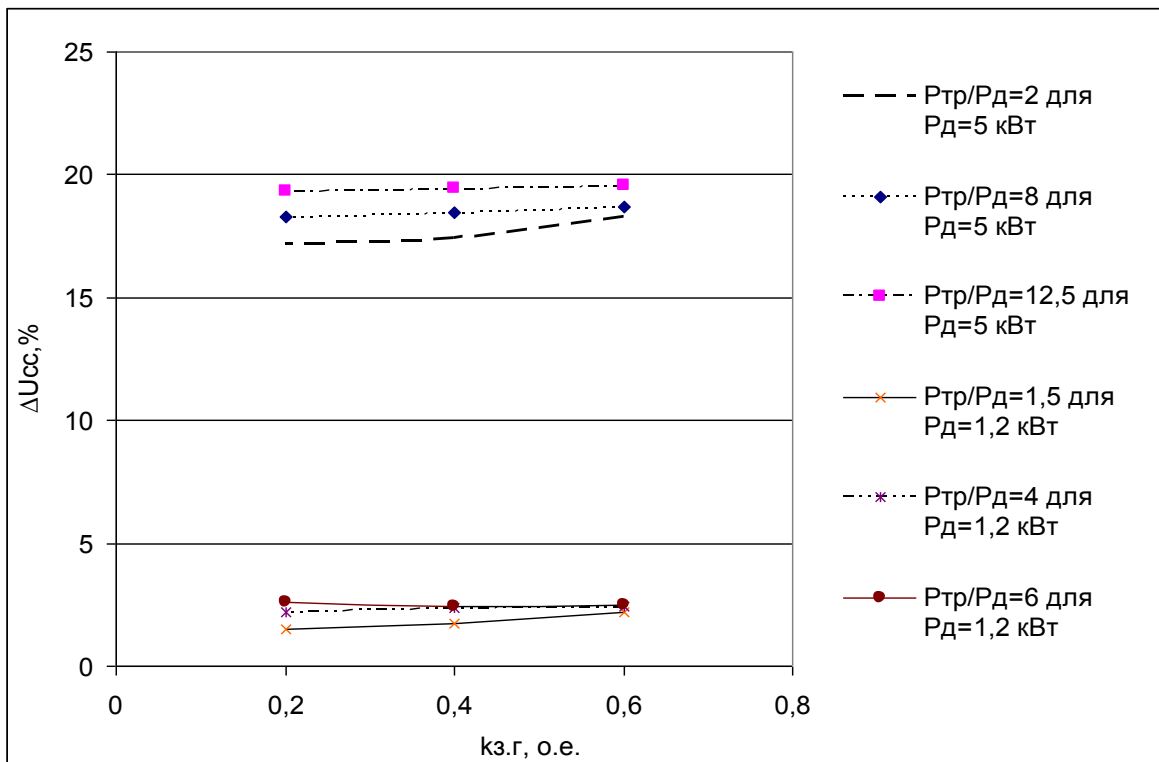


Рис. 4. Зависимости значения провала напряжения судовой сети  $\Delta U_{сс},\%$  при пуске электродвигателя от коэффициента загрузки генератора  $k_{з,2}$  с различными соотношениями мощностей электродвигателя ЯШМ и согласующего трансформатора

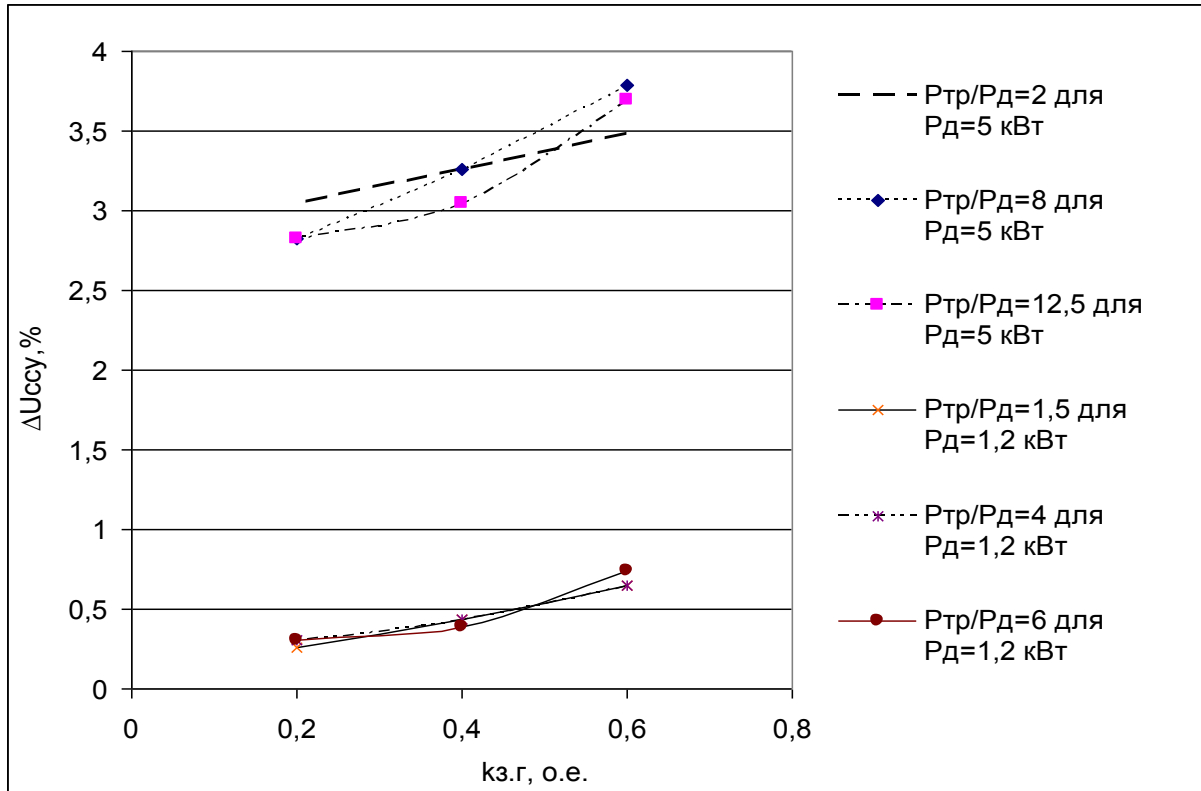


Рис. 5. Зависимости установившегося значения отклонения напряжения судовой сети  $\Delta U_{ccу}, \%$  при стоянке под током электродвигателя от коэффициента загрузки генератора  $k_{з.г}$  с различными соотношениями мощностей электродвигателя ЯШМ и согласующего трансформатора

Анализ зависимостей значений провалов напряжений показал, что для обеспечения требований РКО [3] к качеству напряжения судовой электроэнергетической системы соотношение мощностей трансформатора  $P_{тр}$  и электродвигателя  $P_{д}$  должно составлять от двух до четырех крат, однако при увеличении мощности электропривода увеличивается падение напряжения судовой электросети  $\Delta U_{cc}, \%$ , что также следует учитывать при проектировании.

Одним из рабочих режимов электропривода лебедки является режим стоянки под током, когда вал электродвигателя заторможен механизмом [3–7]. По требованиям правил РКО этот режим должен быть обеспечен в течение времени не менее 30 с. Этот факт приводит к тому, что мощность трансформатора  $P_{тр}$  должна быть завышена с целью поддержания пускового момента на валу электродвигателя в течение установленного времени [8].

Было проведено моделирование режимов стоянки электродвигателя с пусковым током для различных мощностей трансформаторов и коэффициентов загрузки генератора, в результате которого построены зависимости, приведенные на рис. 3 и 5. Анализ зависимостей рис. 3 показал, что при стоянке электродвигателя под током с соотношением мощностей трансформатора и электродвигателя равным  $P_{тр}/P_{д} = 4$  и более напряжение питания электродвигателя снижается до значений не более 10% от номинального, что находится в допустимых пределах. При этом снижение напряжения судовой сети (рис. 5) достигает 3% и более и зависит от коэффициента загрузки генератора  $k_{з.г}$ .

Имитационное моделирование электропривода позволило получить переходные характеристики, которые соответствуют физическим процессам реального оборудования.

Анализ построенных зависимостей показал что:

- величина мощности согласующего трансформатора существенно влияет как на характеристики привода с одной стороны, так и судовую сеть с другой стороны;
- степень влияния на судовую сеть описанной системы в различных режимах зависит от коэффициента загрузки генератора.

Приведенные зависимости могут быть полезны при выборе судового электрооборудования с учетом требований РКО.

### Литература

1. *Малышев Ю.С., Бурмакин О.А., Попов С.В.* Имитационная модель электропривода якорно-швартовой лебедки, учитывающая режим стоянки под током // Транспорт. Горизонты развития. 2024: Материалы междунар. науч.-практ. форума [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2024. – URL: [http://вф-река-море.рф/2024/2\\_15.pdf](http://вф-река-море.рф/2024/2_15.pdf) (дата обращения: 02.10.2024).
2. *Малышев Ю.С., Бурмакин О.А., Попов С.В.* Имитационная модель электропривода якорной лебедки, работающей от судовой электростанции через согласующий трансформатор: Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ 2024662262 от 27.05.24.
3. Правила классификации, постройки и освидетельствования судов ВВП, судов смешанного (река – море) плавания, плавучих объектов [Электронный ресурс]. – URL: <https://rfclass.ru/izdaniya-rko/pravila-klassifikatsii-postroyki-i-osvidetelstvovaniya-sudov-vvp-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya-plavuchikh-obektov/> (дата обращения: 20.05.2023).
4. *Бурков А.Ф.* Основы теории и эксплуатации судовых электроприводов: Учеб. для вузов. – 5-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2023. – 340 с.
5. *Богословский А.П.* Судовые электроприводы. Справочник [Текст]: в 2 т. / А.П. Богословский [и др.]; под ред. И.Р. Фрейдзона; Т. 1. – Л.: Судостроение, 1983. – 352 с.
6. Электрооборудование палубных механизмов. Информационный сборник / А.П. Марков и др.; отв. ред. П.И. Струмпе. – М.: ЦБНТИ, 1970. – 91 с.
7. *Токарев П.Н.* Стоянка судна на якоре в стесненных путевых условиях [Электронный ресурс] // Научные проблемы водного транспорта. – 2024. – № 78. – С. 234–244. – <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78.442>.
8. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. В 2-х т. Том 1: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 656 с., ил.

УДК 621.313:629.05.03:62-83

**А.Н. Рак<sup>1</sup>, В.О. Гутаревич<sup>2</sup>, И.П. Арзютов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: lion15ua@rambler.ru;

<sup>2</sup> Донецкий национальный технический университет»,  
Донецк, 283001

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИИ МОРСКИХ СУДОВ**

В статье рассмотрены основные принципы обеспечения электродвижения судна с применением конвенционных генераторов, аккумуляторных батарей и статических генераторов. Представлены различные сценарии энергопотребления для соблюдения экологических требований по выбросам с морских судов.

**Ключевые слова:** главный двигатель, гребная электрическая установка, аккумуляторная батарея, статический генератор.

**A.N. Rak<sup>1</sup>, V.O. Gutarevich<sup>2</sup>, I.P. Arzyutov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: lion15ua@rambler.ru;

<sup>2</sup> Donetsk National Technical University,  
Donetsk, 283001

## **MODERN TRENDS OF STORAGE BATTERY USE IN MARINE VESSELS ELECTRIC PROPULSION**

The basic principles of ensuring the electric propulsion of a vessel using conventional generators, storage batteries and static generators are enumerated. Various energy consumption scenarios to meet environmental requirements for emissions from sea vessels are presented.

**Key words:** main engine, propulsion electric plant, storage battery, static generator.

Научно-техническое направление по перемещению морских судов было начато в 1836 г., когда профессор Санкт-Петербургского университета Б.С. Якоби продемонстрировал государственной комиссии, в состав которой входили известные ученые и мореплаватели, возможность приведения в движение морского судна при помощи электродвигателя (ЭД) постоянного тока собственной конструкции от аккумуляторных батарей (АБ). Данный эксперимент получил высокую положительную оценку и восторженные отзывы не только членов комиссии, а также и признанных ученых того времени в области электротехники, но, к сожалению, уровень развития электротехнических технологий того времени не позволил в полной степени реализовать все задуманное автором. Дальнейшее развитие электродвижение получило уже в военно-морском подводном флоте, и только в наши дни мы можем по достоинству оценить это изобретение.

Цель работы – показать возможность применения современных АБ в гребных электрических установках (ГЭУ).

В работе использованы материалы, приведенные в открытых источниках и технической документации.

Возврат в наши дни к данной технологии не случаен. Это, прежде всего, диктуется с одной стороны условиями соблюдения международной конвенции MARPOL 73/78 в части сокращения выбросов с морских судов на допустимом уровне [1], а с другой стороны стремлением обеспечить регулирование частот вращения ГЭУ в широком диапазоне именно за счет электрической части и упрощением конструкции самих генераторов.

Поскольку в эксплуатации находится еще достаточное количество морских судов с дизель-механическими пропульсивными установками (ПУ), то рассмотрим вариант с так называемой комбинированной ПУ (рис. 1).

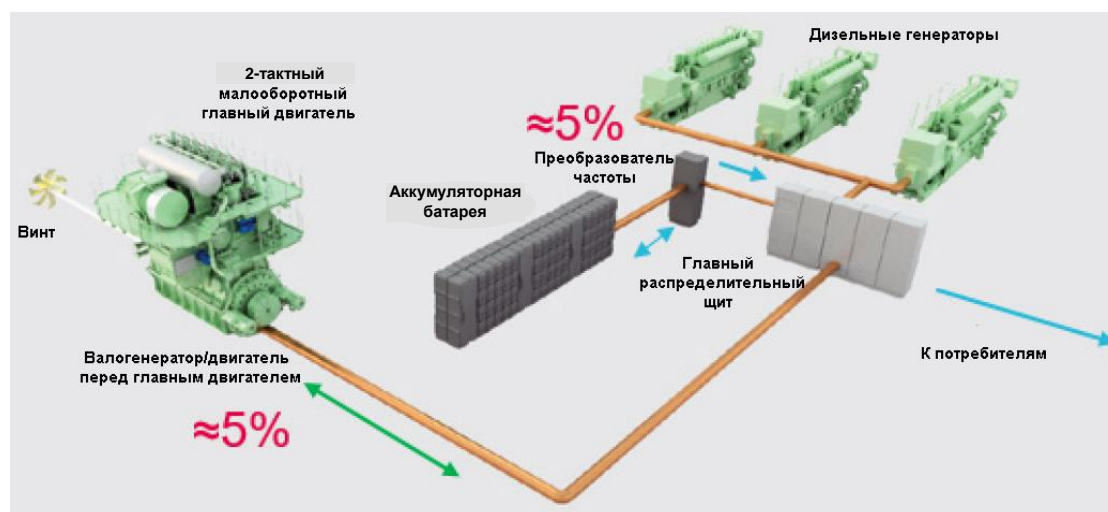


Рис. 1. Комбинированная пропульсивная установка

Такая концепция позволяет обеспечить не только движение судна для соблюдения требований конвенции в зонах экологического контроля, но и подзарядку АБ при дальнейшей работе [1]. Оценим возможности такой системы с точки зрения потребления энергии.

Энергия, необходимая для выхода из порта на пять морских миль, оценивается в табл. 1. Общая энергия, необходимая для ускорения судна и выхода из порта ограничена. Для контейнеровозов основное потребление энергии обусловлено электрической нагрузкой, а не фактической движущей силой. В приведенные расчеты не включены возможные изменения потребления энергии ДГ. Следует отметить, что потребление энергии при маневрировании может значительно увеличиться при сильном ветре.

Таблица 1

Энергия для выхода из порта на 5 морских миль

Типы судов	Балкер	Балкер	Балкер	Балкер	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Ро-ро
Размер	50k dwt	82k dwt	200k dwt	320k dwt	2,500 teu	14,000 teu	20,000 teu	5,000 lm
Энергия для выхода из порта, кВт·ч	314	428	873	1,324	212	655	777	198
Потребление энергии на судне, кВт·ч	230	280	340	400	1,200	5,600	8,000	1,300
Общая энергия, МВт·ч	0.5	0.7	1.2	1.7	1.4	6.3	8.8	1.5

Информация об энергии для выхода из территориальных вод (12 морских миль) от причала, представлена в табл. 2. При этом это расстояние может быть несколько больше, что зависит от расположения порта и береговой линии. Полагаем, что скорость составляет 10 узлов. Тем не менее потребление энергии для фактического движения судна ограничено, а поэтому общее потребление энергии низкое для судов с низкой нагрузкой на судовую сеть.

Таблица 2

Энергия для выхода из территориальных вод на 12 морских миль

Типы судов	Балкер	Балкер	Балкер	Балкер	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Ро-ро
Размер	50k dwt	82k dwt	200k dwt	320k dwt	2,500 teu	14,000 teu	20,000 teu	5,000 lm
Энергия для выхода из территориальных вод, МВт·ч	2.2	2.7	5.1	7.5	1.7	4.2	5.0	1.5
Потребление энергии на судне, МВт·ч	0.4	0.5	0.6	0.7	2.0	9.5	13.6	2.2
Общее потребление энергии, МВт·ч	2.6	3.2	5.7	8.2	3.7	13.7	18.6	3.7

Двигатель, питаемый от АБ, может быть вариантом для обеспечения соблюдения правил в пределах 200 морских миль, как показано в табл. 3. Здесь считается, что судно ускоряется до своей рабочей скорости за пределами территориальных вод (12 морских миль). Энергия, необходимая для покрытия 200 морских миль, в этом случае зависит от энергии, необходимой для движения судна, а не от нагрузки потребителей на борту.

Таблица 3

Энергия для выхода из 200-мильной зоны

Типы судов	Балкер	Балкер	Балкер	Балкер	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Контейнеровоз	Ро-ро
Размеры	50k dwt	82k dwt	200k dwt	320k dwt	2,500 teu	14,000 teu	20,000 teu	5,000 lm
Энергия для выхода из экосоны, МВт · ч	77	94	147	219	116	320	467	134
Судовые потребители, МВт · ч	3.6	4.2	5.0	5.7	14.6	62.1	82.0	14.4
Общее потребление энергии, МВт · ч	81	98	152	225	131	383	549	149

Анализ источников показывает, что в настоящее время значительный прогресс в развитии ПУ связан с использованием литий-ионных АБ. Но, несмотря на всю привлекательность с экологической точки зрения, такие системы имеют ограниченный характер из-за значительных массо-габаритных и ценовых показателей и могут применяться только для конкретных маршрутов [2]. Информация о массо-габаритных показателях систем с указанным выше типом АБ представлена в [2] и табл. 4.

Таблица 4

Удельная масса, объем и цена больших 1МВт·ч тяжелых литий-ионных батарей

Основные показатели	Уровень системы	Групповой уровень	Модульный уровень	Уровень элемента
Удельная масса, кг/кВт · ч	11-30	7-28	6-24	6-8
Удельный объем, л/кВт	12-35	10-12	7-10	1,5-2,5
Удельная цена, USD/кВт · ч	500			200-250

На массу и объем батареи на системном уровне (кроме массы элемента) влияет множество факторов, например: тип изоляции между элементами и модулями, системы охлаждения (воздушное/водяное), интеграция с другими бортовыми устройствами, системами и др. Особенно метод, который применяется для тепловой изоляции отдельной АБ и модулей, для снижения риска теплового разгона, влияет на массу и объем модулей.

Это отображается в значительном увеличении удельного веса как на уровне отдельной АБ, так и на уровне модуля.

Возможная топология схем применения комбинированных установок представлена на рис. 2.

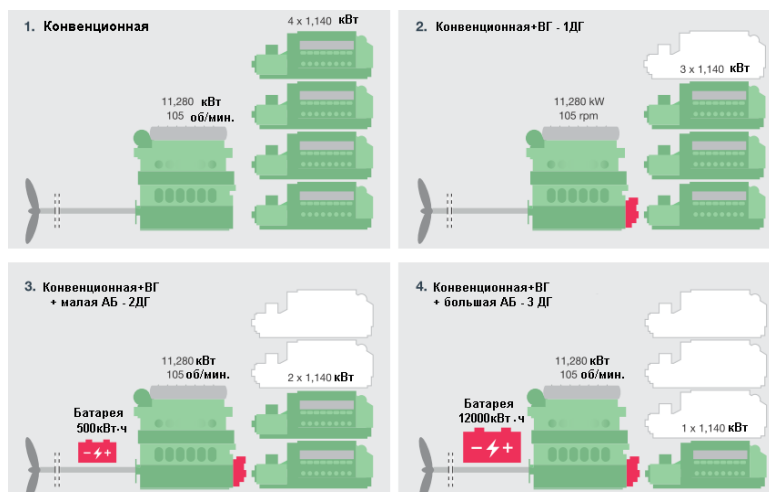


Рис. 2. Возможная топология схем применения комбинированных установок

Возможное снижение удельных затрат топлива на производство энергии для топологических схем, приведенных на рис. 2, представлено на рис. 3.

Следующим этапом в развитии ГЭУ с АБ можно считать так называемые системы со статическими генераторами, разработанными фирмой MAN B&W - MAN Hybrid EcoAux (рис. 4). Его технические характеристики приведены в [1] и табл. 2.

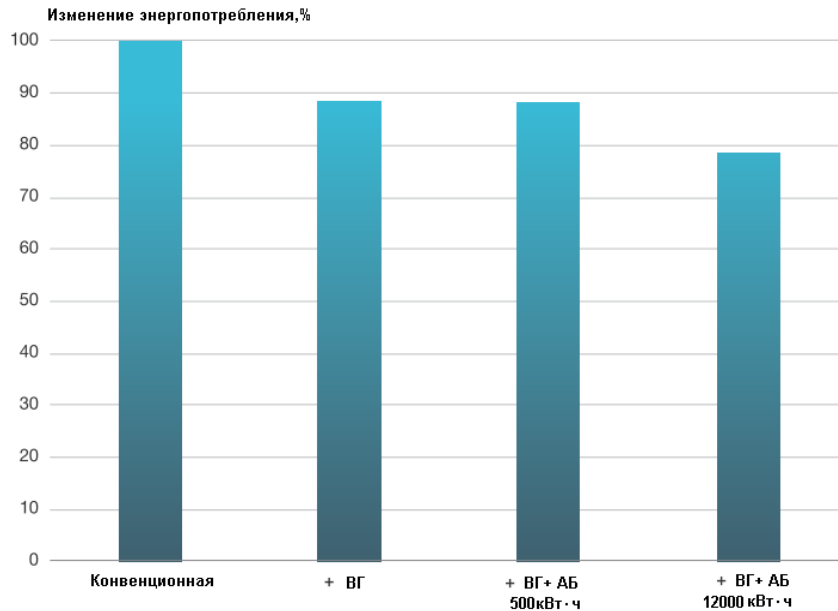


Рис. 3. Возможное снижение удельных затрат топлива на производство энергии для различных топологических схем

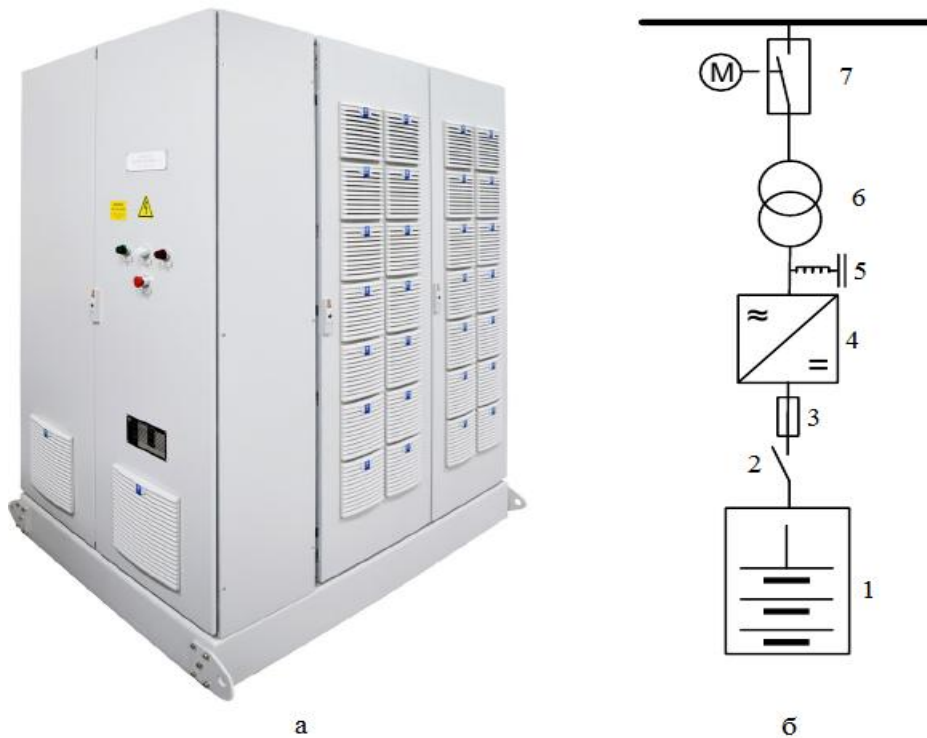


Рис. 4. «Твердотельный» генератор MAN Hybrid EcoAux: а – внешний вид; б – состав генератора:  
 1 – накопитель энергии (АБ); 2 – выключатель; 3 – система защиты; 4 – двунаправленный инвертирующий преобразователь; 5 – фильтр; 6 – разделительный трансформатор; 7 – выключатель с моторным приводом



Технические характеристики «твердотельных» генераторов MAN Hybrid EcoAux

Типоразмер	Напряжение сети, В	Частота, Гц
625 кВт · ч (5С)*	400–690	50 или 60
405 кВт · ч (5С)	400–690	50 или 60
270 кВт · ч (5С)	400–690	50 или 60
135 кВт · ч (5С)	400–690	50 или 60

\* С – скорость заряда. С = 12 мин, т. е. 5С = 5 · 12 = 60 мин

Такую систему можно будет использовать в качестве «горячего» резерва. Типовая конфигурация вспомогательной системы состоит как минимум из трех ДГ (рис. 5). Два ДГ работают с низкой нагрузкой (обычно ниже 40%), при этом один ДГ находится в режиме ожидания во время критических операций, таких как маневрирование или разгрузка судна, где следует избежать отключения электроэнергии. Такая конфигурация допускает внезапную остановку одного генератора. При пересечении океана один ДГ может покрывать нагрузку, второй – готов к запуску, а третий – находится на техническом обслуживании.

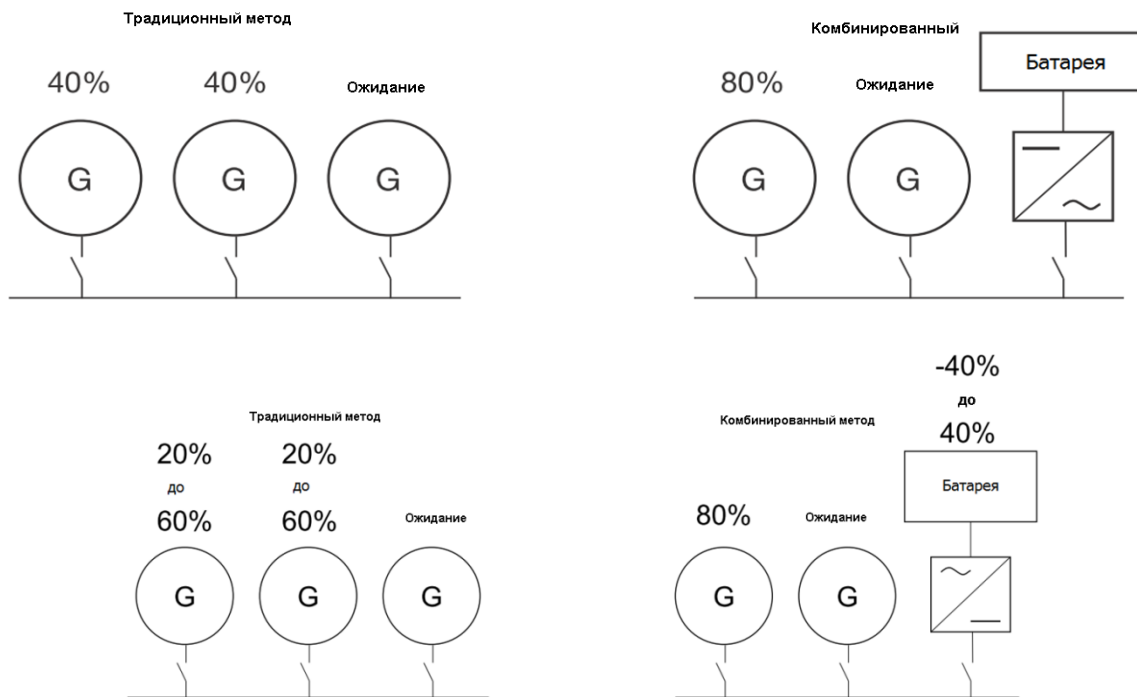


Рис. 5. Принцип действия системы с АБ «горячий» резерв

1. Применение комбинированных систем позволяет сэкономить до 10% потребляемой энергии на судне, поскольку вся энергия на судах производится от сжигания углеводородного топлива, и тем самым обеспечить соблюдение требований конвенции по сокращению выбросов с морских судов. Массогабаритные и энергетические характеристики батарейных систем будут зависеть прежде всего от конкретных условий их применения.

2. Применение статических генераторов в качестве «горячего» резерва позволяет существенным образом сократить удельный расход топлива и также сократить количество выбросов. Определение параметров таких систем не должно вызывать особых затруднений. Но здесь необходимо будет учесть еще один момент, связанный с согласованием заменяемых мощностей, поскольку мощности статических генераторов могут оказаться меньше мощности традиционных.

### Литература

1. *Труднев С.Ю., Рак А.Н., Марченко А.А.* Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: Судовые источники электрической энергии. Часть I. [Электронный ресурс]: Учеб. пособие. – Текстовое (символьное) электронное издание. – Новокузнецк: Знание-М, 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – С. 174–188.
2. MAN Energy Solutions. Batteries on board ocean-going vessels [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf/> (дата обращения: 04.10.2024).

УДК 621.431.74

**А.Н. Рак, Б.А. Ключин**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: lion15ua@rambler.ru*

## **ВЫБОР МУФТ ДЛЯ МОРСКИХ СУДОВ С ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ**

На современных морских судах широкое распространение получили соединительные виды муфт. Они применяются для непосредственной передачи вращательного движения от главного двигателя на гребной вал или от дизельного двигателя к генератору. Кроме этого каждый тип муфт обладает специфическими особенностями. Так, соединительные муфты обеспечивают необходимые режимы работы судовой энергетической установки, а гибкие муфты кроме функции соединения позволяют устранить различные дефекты и нарушения в конструкции судовых механизмов, например, при выработке несущих поверхностей или деформациях опорных поверхностей, на которых расположены механизмы и оборудование. Естественно, в этом случае могут возникать различные вибрационные колебания, которые в дальнейшем могут привести к выходу из строя как отдельного устройства, так и механизма в целом, если не принять соответствующих мер. Также рассматриваются и муфты с электрическим приводом.

**Ключевые слова:** морское судно, главный двигатель, генератор, двигатель, вал, редуктор, вращение, муфта, электрический привод.

**A.N. Rak, B.A. Klyushin**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: lion15ua@rambler.ru*

## **SELECTION OF COUPLINGS FOR MARINE VESSELS WITH DIESEL-ELECTRIC POWER PLANT**

Connecting types of couplings are widely used on modern marine vessels. They are used for direct transmission of rotational motion from the main engine to the propeller shaft or from the diesel engine to the generator. In addition, each type of couplings has specific features. Thus, connecting couplings provide the necessary operating modes of the ship's power plant, and flexible couplings, in addition to the connection function, allow to eliminate various defects and violations in the design of ship mechanisms, for example, when developing bearing surfaces or deformations of the support surfaces on which the mechanisms and equipment are located. Naturally, in this case, various vibrations may occur, which in the future may lead to the failure of both an individual device and the mechanism as a whole, if appropriate measures are not taken. Couplings with an electric drive are also considered.

**Key words:** marine vessel, main engine, generator, motor, shaft, gearbox, rotation, coupling, electric drive.

Обеспечение движения морского судна всегда являлось и является актуальной технической задачей. От этого, во-первых, зависит жизнь членов экипажа, а во-вторых, сохранность груза, возможность и своевременность его доставки в порт назначения. Современный уровень развития технологий позволяет обеспечить движение морского судна не только с помощью тепловых двигателей, а и электрических. Так, передача вращающего момента от первичного двигателя к гребному винту или на вал электрического двигателя осуществляется через специальные соединительные муфты, которые, в свою очередь, обладают целым рядом специфических особенностей. Рассмотрим некоторые из них.

Цель работы – показать конструктивные особенности соединительных муфт и ознакомить с упрощенными методиками их выбора.

В работе использована информация из технической документации по применению валогенераторов/двигателей и соединительных силовых муфт на морских судах, которая доступна в открытых источниках.

В комбинированной дизель-электрической системе возможно несколько способов подключения электрических машин для обеспечения движения судна (рис. 1), приведенные в [1, 2].

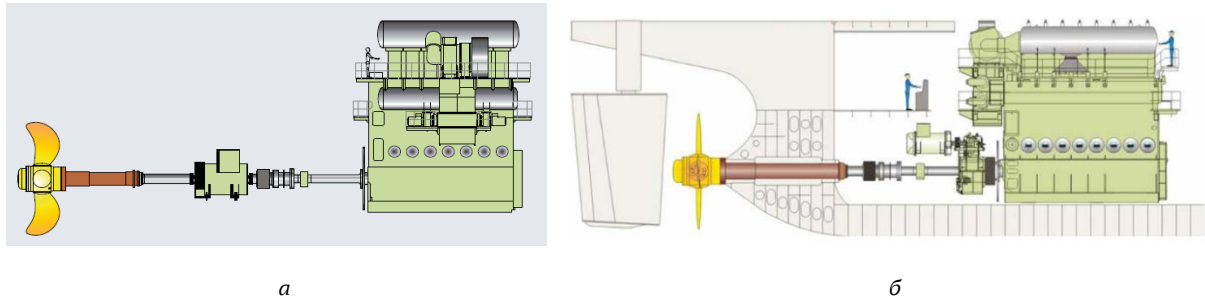


Рис. 1. Способы подключения электрических машин: в линии гребного вала (а); через редуктор (б)

Такой подход позволяет обеспечить следующие режимы работы: генераторный (рис. 2, а), двигательный усилительный (рис. 2, б), двигательный (аварийный или вспомогательный) (рис. 2, в), что обеспечивается соединительной муфтой, входящей в данную систему.

Одной из ведущих фирм-производителей соединительных муфт для судов с дизель-электрическим движением является RENKMARHY® (ФРГ), выпускающая их различных типоразмеров, зависящих непосредственно от основных параметров главных двигателей: мощности и частоты вращения [3].

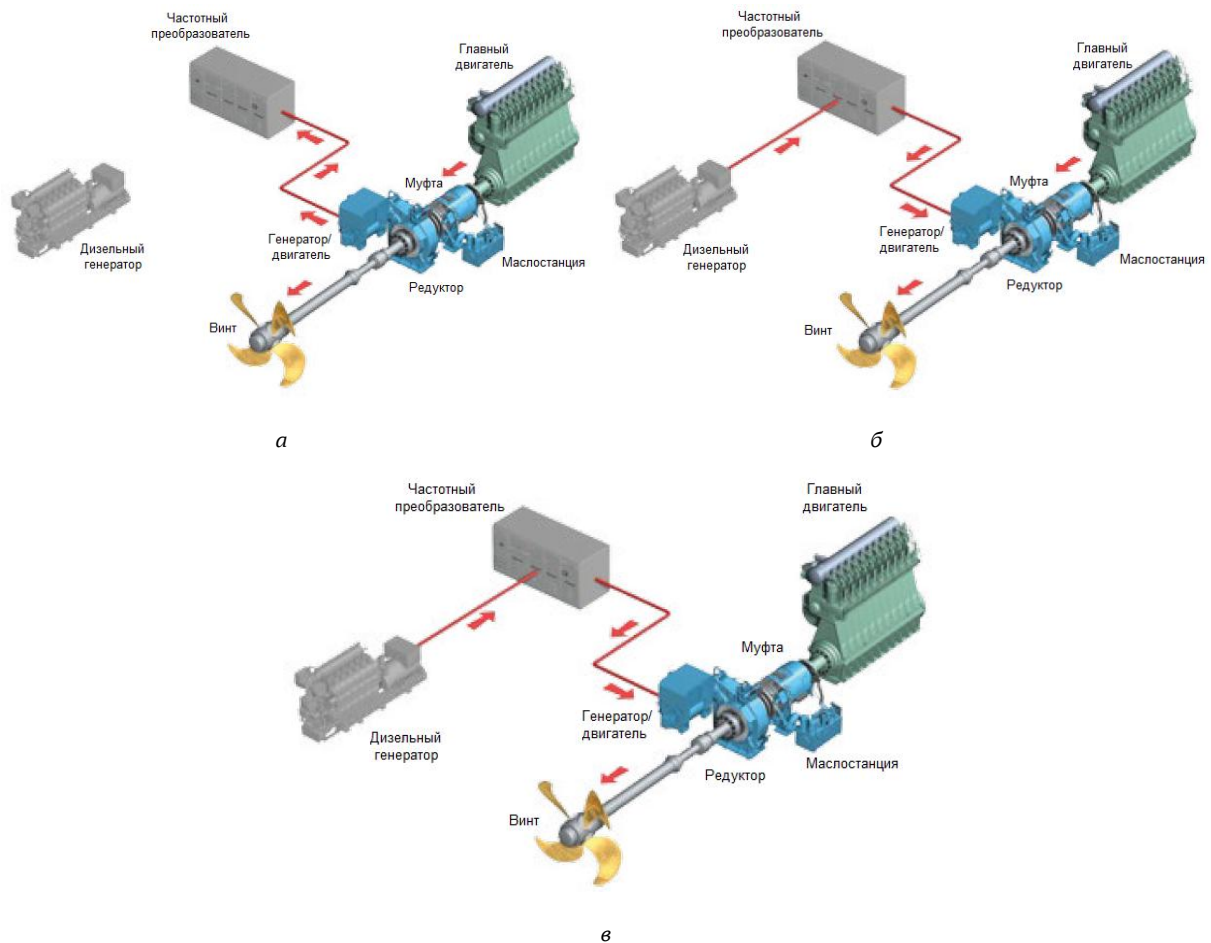


Рис. 2. Режимы работы комбинированной дизель-электрической системы RENKMARHY®: генераторный (а); двигательный (б); аварийный или вспомогательный (в)

Основные типоразмеры таких муфт представлены в табл. 1.

Таблица 1

Типоразмеры соединительных муфт

Типоразмер	Момент, кНм	Макс. осевая нагрузка, кН	Осевая нагрузка, кН	Длина, мм	Длина прокладки, мм	Макс. внешний диаметр, мм	Фланец втулки, мм	Вес, т	Вес прокладки, т
32	320	600	125	1 500	400	700	600	3,8	0,3
63	600	1 040	208	1 650	600	870	645	4,8	0,5
85	850	1 250	280	1 775	675	950	750	6,5	0,8
132	1260	1 600	364	1 875	750	1 000	850	8,2	1,1
225	2150	2 600	520	2 350	1 000	1 230	1 070	14	2,3
355	3400	3 500	650	2 650	1 150	1 430	1 250	22	3,6
480	4600	4 800	900	3 050	1 300	1 680	1 400	33	5,1
800	7800	75 000	1 600	3 600	1 450	1 930	2 050	44	6,5

Последовательность выбора типоразмера муфт для конкретных типов дизелей представлена ниже:

Мощность главного двигателя .....  $P = 16\,550$  кВт;

Частота вращения главного двигателя .....  $n = 87$  об/мин;

Коэффициент мощности .....  $\frac{P}{n} = \frac{12640\text{кВт}}{127\text{об/хв}} = 99$ ;

Таким образом, выбранный типоразмер муфты – 132.

Стремление к уменьшению массогабаритных показателей элементов пропульсивного комплекса морских судов создает предпосылки к применению электрически управляемых муфт (рис. 3), приводимых в действие высокооборотными электрическими двигателями для обеспечения целого ряда не только морских судов, таких как исследовательские суда, мегаяхты, но в том числе и военных кораблей. Это позволяет не только уменьшить влияние вибраций и шума, присущих судам с дизель-механическим движением, например, в случае малооборотных двигателей, а также существенно сократить количество выбросов NOx в атмосферу.

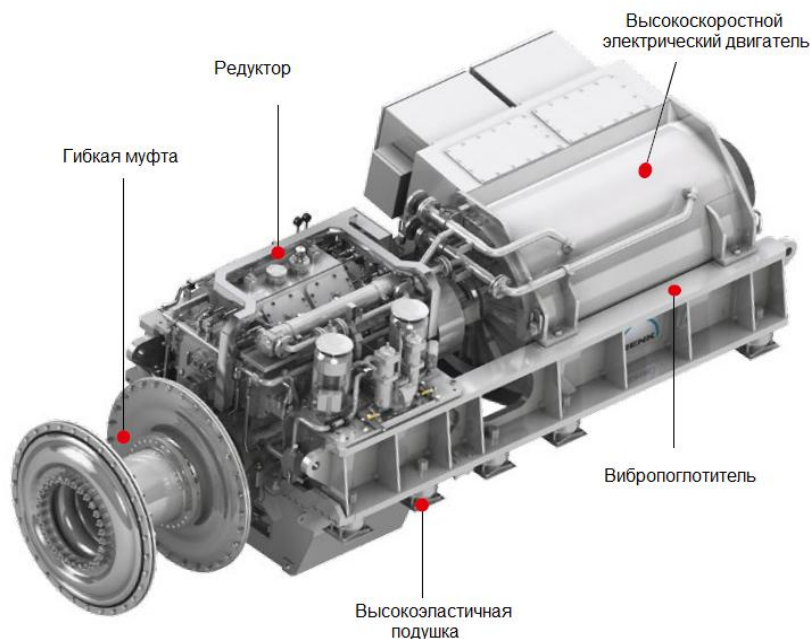


Рис. 3. Муфта с электрическим приводом RENKAED

Технические характеристики муфт с электрическим управлением RENKAED представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики муфт с электрическим управлением RENKAED

	AED 14	AED 23	AED 37	AED 60
Максимальная мощность, кВт	1400	2300	3700	6000
Частота вращения электродвигателя, об/мин.	1800	1800	1800	1900
Частота вращения винта, об/мин.	250-450	250-400	190-350	190-300
Напряжение питания электродвигателя, В	690	690	690 (4000)	4000
Вес, т	13	18	23	34

Схема электродвижения с электрически управляемыми муфтами представлена на рис. 4.



Рис. 4. Схема электродвижения с электрически управляемыми муфтами

1. Рассмотрено применение соединительных муфт различного назначения на морских судах для обеспечения заданных режимов работы.
2. Представленный выше подход позволяет быстро выбрать конкретный тип муфт.

#### Литература

1. Shaft generators for low speed main engines. – URL: <http://www.mandieselturbo.com>.
2. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII Механические установки. НД № 2-020101-138 / ФАУ «Российский морской регистр судоходства». – Санкт-Петербург, 2021. – 118 с.
3. RENK AED – Advanced Electric Drive. The ultimate propulsion for quiet ships. – URL: <http://www.renk.eu>.

УДК 681.586.7

**Д.Н. Решетов, Е.И. Ханеев**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: anonimus1706@gmail.com*

### **ДАТЧИКИ ГЛУБИНЫ: БАРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ. РЕМОНТ ДАТЧИКОВ ГЛУБИНЫ**

В статье представлена информация о датчиках глубины и их возможном саморемонте с дальнейшей попыткой усовершенствования качеств датчика, что позволяет сократить расходы на закупку и последующие натурные испытания, а также расширяет возможные области применения. Датчики глубины являются важными инструментами в различных областях, таких как гидрология, океанография, нефтегазовая отрасль и аквакультура. Одним из наиболее распространенных типов датчиков глубины являются барометрические датчики, которые используют принцип давления для определения глубины погружения в воду. Кроме того, данный материал в дальнейшем может быть использован в образовательном процессе для инженерных специальностей как пособие к ремонту данных датчиков.

**Ключевые слова:** датчики глубины, барометрические датчики, океанография, нефтегазовая отрасль, аквакультура, барометрические датчики, глубина, ремонт, усовершенствование, логгер.

**D.N. Reshetov, E.I. Khaneev**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: anonimus1706@gmail.com*

### **DEPTH SENSORS: BAROMETRIC MEASUREMENT METHODS. DEPTH SENSORS REPAIR**

The information about depth sensors and their possible self-repair with a further attempt to improve the sensor qualities, thus reducing procurement costs and subsequent field testing, as well as expanding possible applications is presented. Depth sensors are important tools in various fields such as hydrology, oceanography, oil and gas, and aquaculture. One of the most common types of depth sensors are barometric sensors, which use the principle of pressure to determine the depth of immersion in water. In addition, this material can be further used in the educational process for engineering specialties as aids to the repair of these sensors.

**Key words:** depth sensors, barometric sensors, oceanography, oil and gas industry, aquaculture, barometric sensors, depth, repair, improvement, logger.

В этой статье рассмотрены датчики глубины, методы измерения с помощью этих датчиков, а также их ремонт без причастия сервисных центров. С каждым годом появляется все более продвинутое способы измерения глубины, требующие для использования специально обученный персонал, что зачастую приводит к проблемам на предприятиях. Данные датчики и по сей день остаются актуальными и используются во множестве отраслей промышленности и научных экспериментах. Все это приводит к необходимости знать их принцип действия и при необходимости произвести ремонт этих датчиков.

Исходя из вышесказанного, предлагается использовать в качестве примера американский регистратор НОВОУ20-001-04, поскольку он обладает высокой точностью измерений и соответствует современным требованиям эксплуатации. На его примере мы сможем разобрать принцип действия логгеров, их устройство, составные части, возможные неисправности, а также способы их устранения.

Данный регистратор был выбран случайно, поскольку именно его зачастую используют инженеры и крупнейшие компании по всему миру, благодаря своим техническим характеристикам, надежности и отсутствию возможных аналогов [1, 2].

Барометрические датчики глубины широко применяются для мониторинга и изучения океанических глубин, а также для наблюдения за изменениями уровня моря. В гидрологических исследованиях датчики применяются для измерения уровней грунтовых вод, а также для анализа потоков рек и озер. В нефтегазовой отрасли датчики нужны для мониторинга глубины скважин и состояния резервуаров. В рыболовстве и других хозяйствах барометрические датчики помогают контролировать условия среды, что является необходимым для состояния и роста морских организмов.

Барометрические датчики глубины работают на основе закона Паскаля, в котором говорится о том, что давление в жидкости возрастает с глубиной. Основной уровень давления в море считается 1 атмосфера на уровне моря (примерно 1013 мбар). Как только мы начинаем погружение в воду, давление возрастает каждые 10 м глубины на 1 атмосферу.

Для расчета глубины датчик определяет атмосферное давление на поверхности и давление на заданной глубине, взяв во внимание изменение давления с увеличением глубины. Основная формула выглядит следующим образом:

$$D = (P - P_0) / (\rho \cdot g),$$

где D – глубина,

P – давление на глубине,

P<sub>0</sub> – атмосферное давление на поверхности,

ρ – плотность воды (обычно приравнивается к 1 000 кг/м<sup>3</sup> для пресной воды),

g – ускорение свободного падения (примерно 9,81 м/с<sup>2</sup>).

Регистратор имеет довольно простую конструкцию, состоящую из цельного корпуса, интегрального преобразователя, штуцера для подключения логгера к компьютеру, системной платы, шлейфа, батарейки, диодов и разделительной мембраны.

Логгер конструктивно выполнен в виде моноблока и производит измерения автономно, записывая все данные в свою память. По окончании измерений или эксперимента датчик вытаскивают и подключают с помощью кабеля к компьютеру. Далее через программное обеспечение производителя необходимые данные структурируются и выводятся на экран.

Преимуществами данного датчика являются:

- высокая точность измерений глубины, особенно в стабильных условиях;
- возможность применения датчика без постоянного контакта с водой, что делает его идеальным для различных применений;
- не требует вентиляционных трубок или осушителей для произведения измерений;
- простота использования и надежность конструкции, позволяющая использовать его в лабораторных и в полевых исследованиях;
- поддержка разных видов измерений, таких как уровень воды, барометрическое и атмосферное давление, а также температура;
- компактность, долговечность и относительно невысокая стоимость.

Недостатками данного датчика являются:

- температурные колебания: изменения температуры воды может повлиять на плотность, что, в свою очередь, может привести к погрешностям в измерениях. Обычно датчики калибруют с учетом температуры на разных уровнях;
- атмосферные условия: давление воздуха на поверхности может различаться из-за погодных условий, что должно учитываться при получении данных. Существуют специальные модели, которые помогают контролировать измерения для таких ситуаций;
- наличие пузырьков воздуха: в некоторых случаях, особенно при бурении или в водоемах с высокой активностью, могут появляться пузырьки воздуха, что также может повлиять на полученные данные.

Существуют две версии исполнения корпуса этого датчика: стальная и титановая. Стальная версия предназначена для погружения только в пресную воду, а титановая рассчитана на погружение в соленую воду. Также для приобретения доступны два комплекта поставки: Starter kit и Deluxe kit. Разница комплектов заключается в том, что в Deluxe издании в комплект поставки входит кейс для переноски, два регистратора уровня воды и водонепроницаемый шаттл для возможности подключения датчика под водой.



В табл. 1 приведены технические характеристики регистратора НОВОУ20-001-04 [3].

Таблица 1

Технические характеристики регистратора НОВОУ20-001-04

Рабочий диапазон	От 0 до 145 кПа; приблизительно от 0 до 4 м глубины воды на уровне моря или от 0 до 7 м воды на высоте 3 000 м
Диапазон заводской калибровки	От 69 до 145 кПа; от 0 до 40°C
Разрывное давление	310 кПа или 18 м глубины
Точность измерения уровня воды	Среднее значение: $\pm 0,075\%$ от полной шкалы или 0,3 см высоты водяного столба Максимальное значение: $\pm 0,15\%$ от полной шкалы или 0,6 см высоты водяного столба
Точность исходного давления	$\pm 0,3\%$ от полной шкалы или 0,43 кПа
Разрешение	$< 0,014$ кПа
Время отклика на давление	$< 1$ с (точность измерения зависит от температуры)
<b>Измерения температуры</b>	
Рабочий диапазон	от $-20$ до $50^\circ\text{C}$
Погрешность	$\pm 0,44^\circ\text{C}$ от 0 до $50^\circ\text{C}$
Разрешение	$0,10^\circ\text{C}$ при $25^\circ\text{C}$
Время отклика	5 мин находясь в воде
Отклонение	$0,1^\circ\text{C}$ в год
<b>Логгер</b>	
Отклонение часов прибора	$\pm 1$ минута в месяц при температуре от 0 до $50^\circ\text{C}$
Батарея	2/3 AA, 3,6 V, литиевая, заменяемая на заводе
Срок службы батареи	5 лет
Количество памяти	64 КБ
Вес	Стальная версия: около 210 г Титановая версия: около 140 г
Размеры	Диаметр 2,46 см; Длина 15 см; Монтажное отверстие 6,3 мм диаметром
Материалы, подверженные намоканию	Стальная версия: нержавеющая сталь 316, уплотнительные кольца из витона, колпачок, керамический датчик Титановая версия: титан, уплотнительные кольца из витона, колпачок, керамический сенсор
Интервал сканирования	Фиксированная скорость до 8 пользователей одновременно, в интервалах от 1 с до 18 ч
Режимы запуска	Немедленный старт или отложенный старт
Режимы разгрузки	Разгрузка во время логирования, остановка и разгрузка
Индикация батареи	Можно посмотреть на экране или в дата-файле
Степень защиты	IP68
Стоимость	Стальная версия: 600\$ Титановая версия: 740\$

Технической документацией предусмотрен ремонт регистратора только в специальных сервисных центрах. Рассмотрим этот случай: замена аккумулятора будет стоить 179\$, а настройка и выгрузка данных из памяти 235\$. Общая сумма при ремонте такого рода будет равняться 414\$, что довольно дорого, исходя из общей стоимости регистратора. В нашем случае более целесообразно будет произвести самостоятельный ремонт.

Перейдем к самостоятельному ремонту датчика глубины. Рассмотрим этапы ремонта, исходя из повреждений датчика (рис. 1).

Этапы самостоятельного ремонта регистратора:

1. Зажать в тиски регистратор.
2. Используя газовый ключ, приложить усилие и открутить крышку прибора.
3. Убедиться в целостности внутренних соединений микросхем и целостности шлейфов.
4. В нашем примере поврежден шлейф и разряжена батарейка (рис. 2).
5. Отпаять шлейф и батарейку.
6. Припаять провода к плате взамен старого шлейфа.
7. Припаять новую батарейку.
8. Вставить микросхему в корпус и промазать водонепроницаемым герметиком место соединений крышки и основного корпуса.
9. Закрыть крышку регистратора.



Рис. 1. Состояние датчика на момент первичной разборки

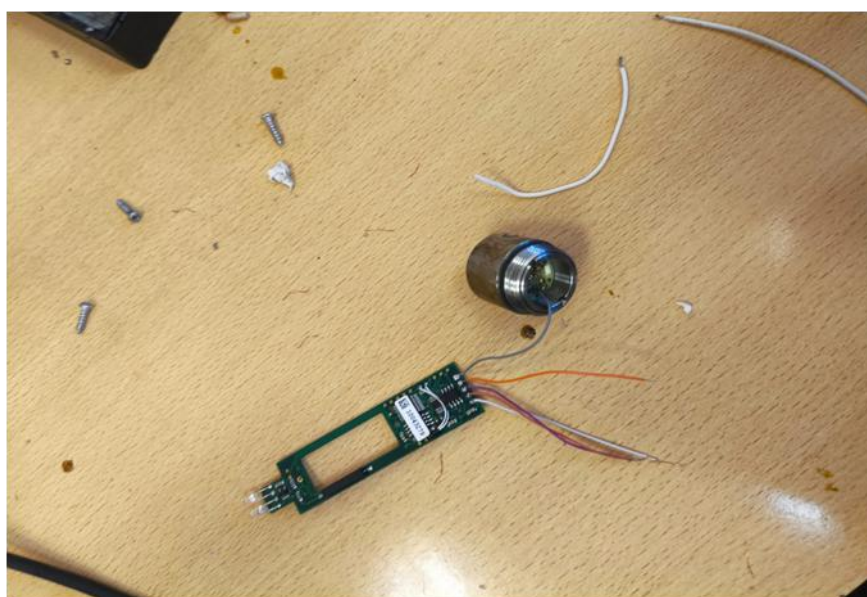


Рис. 2. Датчик с выпаянной старой батарейкой и с проводами, подключенными вместо шлейфа

Замена шлейфа связана с тем, что конструкция старого шлейфа не обеспечивала достаточной прочности внутренней конструкции устройства и платы при сборке.

Рассмотрим возможные методы улучшения технических свойств датчика путем замены старых комплектующих на новые, с лучшими характеристиками:

- возможно заменить батарейку на гелиевую, что продлит срок службы датчика и позволит использовать его при отрицательных температурах;
- при сборке использовать водонепроницаемый герметик, устойчивый к кислотной среде и другим активным средам, что позволит расширить возможные области применения данного датчика.

После ремонта регистратора необходимо провести эксплуатационные тесты и произвести замеры показаний. Это позволит убедиться в том, что ремонт произведен качественно и погрешности при измерениях не превышают допустимые значения [4, 5].

Для проверки точности измерений отремонтированного прибора U-20-001-04 № 0673 его установили вместе с рабочим прибором U-20-001-03 № 9130 в скважину Г-1 на глубину 35 м при статическом уровне воды в ней 33,1 м от поверхности земли. Запись абсолютного давления и температуры воды производилась с 04.09.2024 г. 11:20 по 06.09.2024 г. 11:00 с дискретностью 1 замер в 10 мин.

На рис. 3 и 4 показаны графики изменения абсолютного давления и температуры воды.

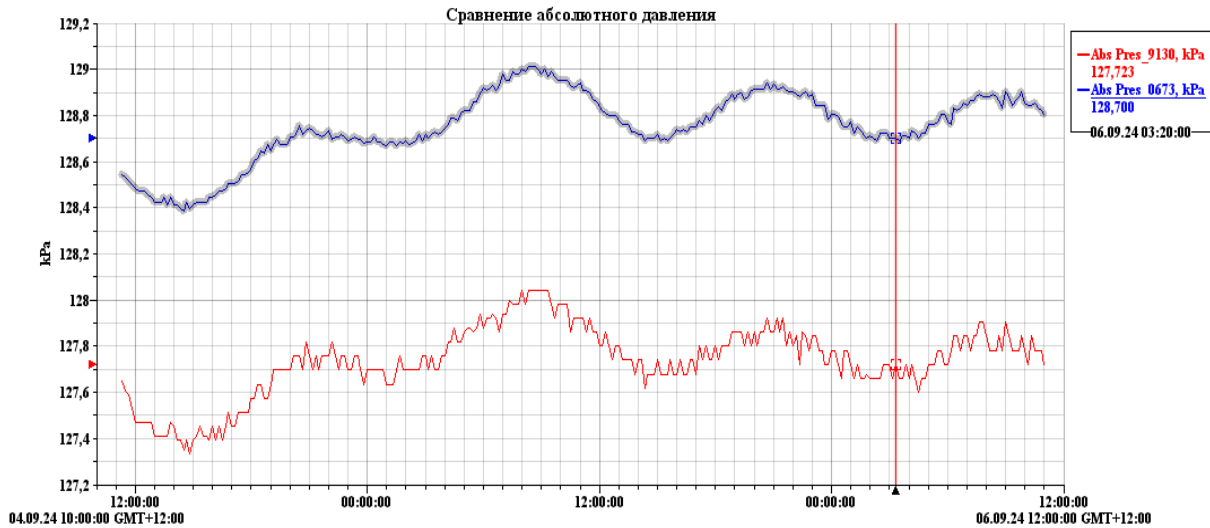


Рис. 3. График сравнения абсолютного давления

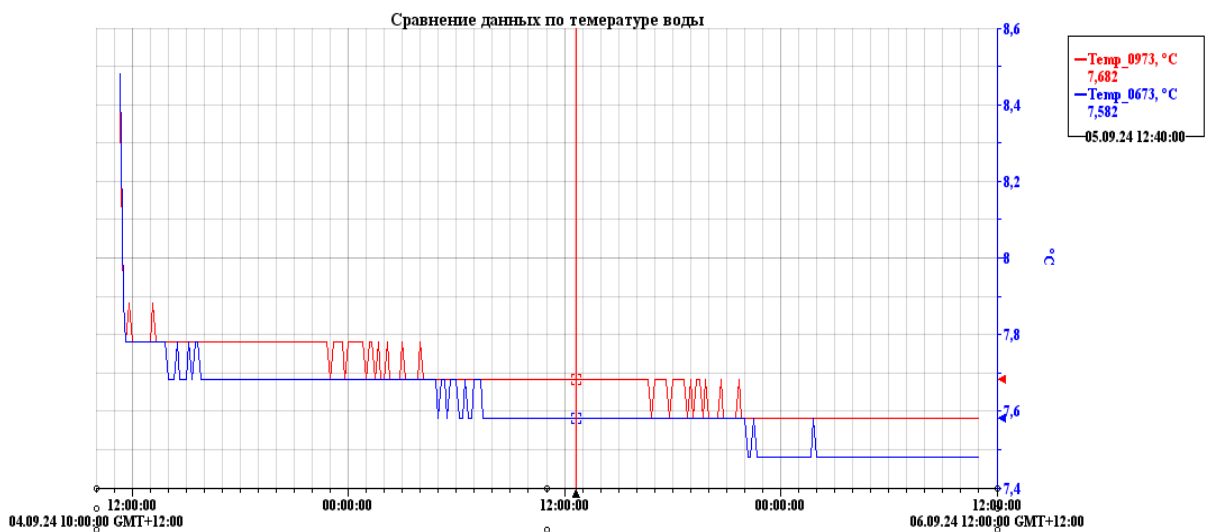


Рис. 4. График сравнения данных по температуре воды

Графики абсолютного давления по обоим приборам имеют одинаковую форму, по значениям разница составляет 0,96–0,97 кПа, 0,013–0,014 м. Разница в значениях температуры воды составляет 0,1 °C, что соответствует точности приборов.

Так как имеющиеся приборы разных моделей с разной типовой погрешностью по абсолютному давлению U-20-001-04 ( $\pm 0,3$  см), U-20-001-03 ( $\pm 3,8$  см), то сравнение их показаний не является корректным. Правильнее сравнивать показания приборов одинаковых моделей [6].

В данной статье были описаны датчики глубины и их возможный ремонт и доработки на основе регистратора НОВОУ20-001-04. В ходе описания были выявлены преимущества и недостатки данных логгеров, принцип их работы и области их применения.

Был выполнен ремонт регистратора, предложены возможные способы улучшения конструкции, и произведены тесты для выявления погрешностей. Кроме того информация, полученная в ходе исследований, показывает, что ремонт таких датчиков возможен не только в сервисных центрах, но и при самостоятельном ремонте.

### Литература

1. *Ковчин И.С.* Автономные океанографические средства измерений. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 45–57.
2. *Белов О.А.* Анализ современных диагностических средств в системах электроснабжения // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2013. – № 26. – С. 5–8.
3. «НОВОУ20-001-04» Датчик глубины. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.onsetcomp.com/resources/documentation/12315-u20-manual> (дата обращения: 20.10.2024).
4. *Белов О.А.* Интегрированные системы технической диагностики электроустановок // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2013. – № 25. – С. 5–8.
5. *Сабуров П.С.* Учебное пособие по дисциплине «Датчики и системы автоматики» / Владимирский гос. ун-т имени А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Владимир: ВлГУ, 2016. – С. 7–22.
6. *Белов О.А., Парфенкин А.И.* Обзор основных факторов снижения безопасности сложных технических систем // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2015. – № 35. – С. 11.

УДК 519.876.5:621.313.333

**А.О. Рогожников, А.М. Коноваленко, О.А. Белов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: aleksei17\_90@mail.ru*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK**

В данной статье рассматривается процесс моделирования и исследования трехфазной асинхронной машины с короткозамкнутым ротором с использованием программного обеспечения MatLab и его специализированного пакета Simulink. Асинхронные машины являются широко используемыми электрическими машинами благодаря своей надежности, простоте конструкции и низкой стоимости обслуживания. Одним из ключевых аспектов их анализа является создание математической модели, которая позволяет исследовать электрические и механические характеристики машины при различных режимах работы. В статье приводятся основные математические зависимости, описывающие их поведение, а также методы реализации этих зависимостей в среде MatLab/Simulink. Также рассматриваются подходы к моделированию пусковых режимов, нагрузочных характеристик и переходных процессов. Полученные результаты позволяют лучше понять поведение асинхронной машины и оптимизировать ее эксплуатационные параметры.

**Ключевые слова:** электродвигатель, асинхронный электродвигатель, рабочие характеристики, механическая характеристика, MatLab, MatLab Simulink.

**A.O. Rogozhnikov, A.M. Konovalenko, O.A. Belov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamcharsky, 683006  
e-mail: aleksei17\_90@mail.ru*

### **INVESTIGATION OF A THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MACHINE WITH A CLOSED-LOOP ROTOR IN THE MATLAB SIMULINK ENVIRONMENT**

The process of modeling and researching a three-phase asynchronous machine with a closed-loop rotor using MatLab software and its specialized Simulink package is presented. Asynchronous machines are widely used electric machines due to their reliability, simplicity of design and low maintenance cost. One of the key aspects of their analysis is the creation of a mathematical model that allows to study the electrical and mechanical characteristics of the machine under various operating modes. The main mathematical dependencies describing their behavior, as well as methods for implementing these dependencies in the MatLab/Simulink environment are enumerated. The approaches to modeling start-up modes, load characteristics and transients are also considered. The obtained results allow to understand the behavior of an asynchronous machine and optimize its operational parameters.

**Key words:** electric motor, asynchronous electric motor, performance characteristics, mechanical characteristics, MatLab, MatLab Simulink.

Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) являются одними из наиболее широко используемых электрических машин в промышленности благодаря их простоте конструкции, надежности, низким эксплуатационным затратам и относительно невысокой стоимости [1–3]. Они применяются в приводах различных механизмов, начиная от небольших бытовых приборов и заканчивая крупногабаритным промышленным оборудованием. Однако, несмотря на простоту конструкции, эффективное проектирование, управление и эксплуатация асинхронных двигателей требуют глубокого понимания их работы и анализа электромагнитных процессов, происходящих в машине.

Моделирование электрических машин позволяет исследовать их поведение при различных условиях работы, а также разрабатывать и оптимизировать системы управления приводами на их

основе. Одним из мощных инструментов для таких исследований является программная среда MatLab Simulink, которая предоставляет широкий набор средств для создания, анализа и визуализации сложных математических моделей.

Цель данной работы заключается в создании математической модели трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в среде MatLab Simulink, которая позволит исследовать динамические процессы в двигателе, оценить его характеристики и поведение при различных режимах работы. В рамках исследования будет проведен анализ структуры модели, рассмотрены основные принципы построения и настройки системы, а также представлены результаты моделирования различных эксплуатационных режимов двигателя.

Создание точной и адекватной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором предоставляет возможность не только более глубокого понимания физических процессов, но и открывает перспективы для разработки эффективных алгоритмов управления, что, в свою очередь, способствует повышению энергоэффективности и производительности электрических приводов.

Этапы выполнения работы:

1. По заданным параметрам асинхронной машины рассчитываются параметры для моделирования (табл. 1).

Таблица 1

Параметры асинхронной машины

Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos \phi$	$I_H$ , А	$k_1$	$m_{\Pi}$	$n_M$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
RA130S4	1,1	1420	77	0,8	2,6	5,0	2,3	2,6	0,0034

Расчетные выражения:

– скорость вращения магнитного поля статора

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}},$$

– номинальное скольжение

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,0533,$$

– номинальный момент

$$M_H = 9,55 \cdot \frac{P_H}{n_H} = 9,55 \cdot \frac{1100}{1420} = 7 \text{ Н·м},$$

– максимальный момент

$$M_{\max} = m_M \cdot M_H = 2,6 \cdot 7 = 18,21 \text{ Н·м},$$

– пусковой момент

$$M_{\Pi} = m_{\Pi} \cdot M_H = 2,3 \cdot 7 = 16,11 \text{ Н·м},$$

– критическое скольжение

$$s_K = s_H \cdot \left( m_M + \sqrt{m_M^2 - 1} \right) = 0,0533 \cdot \left( 2,6 + \sqrt{2,6^2 - 1} \right) = 0,2665,$$

- активное сопротивление обмотки статора

$$R_s = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_H \cdot \Pi_{\text{MEX}}}{I_H^2 \cdot \frac{1-s_H}{s_H}} = 3,0843 \text{ Ом},$$

- активное сопротивление обмотки ротора

$$R_r = \frac{U_H \cdot \eta \cdot \cos\varphi}{I_H} - C^2 \cdot R_s - \frac{\Pi_{\text{MEX}}}{3 \cdot I_H^2} = 11,911 \text{ Ом},$$

- индуктивности обмоток

$$L_{sr} = L_{sp} = \frac{U}{4\pi \cdot f \cdot (1+1,05^2) \cdot k_l \cdot I_H} = 0,0133 \text{ Гн},$$

$$L_s = \frac{U}{2\pi \cdot f \cdot I_H \cdot \sqrt{1-\cos^2\varphi} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2\pi \cdot f \cdot M_M \cdot s_H}{p \cdot U \cdot s_K}} = 0,4624 \text{ Гн},$$

$$L_m = L_s - L_{sp} = 0,4491 \text{ Гн}.$$

2. Собирается модель для исследования характеристик асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 1).

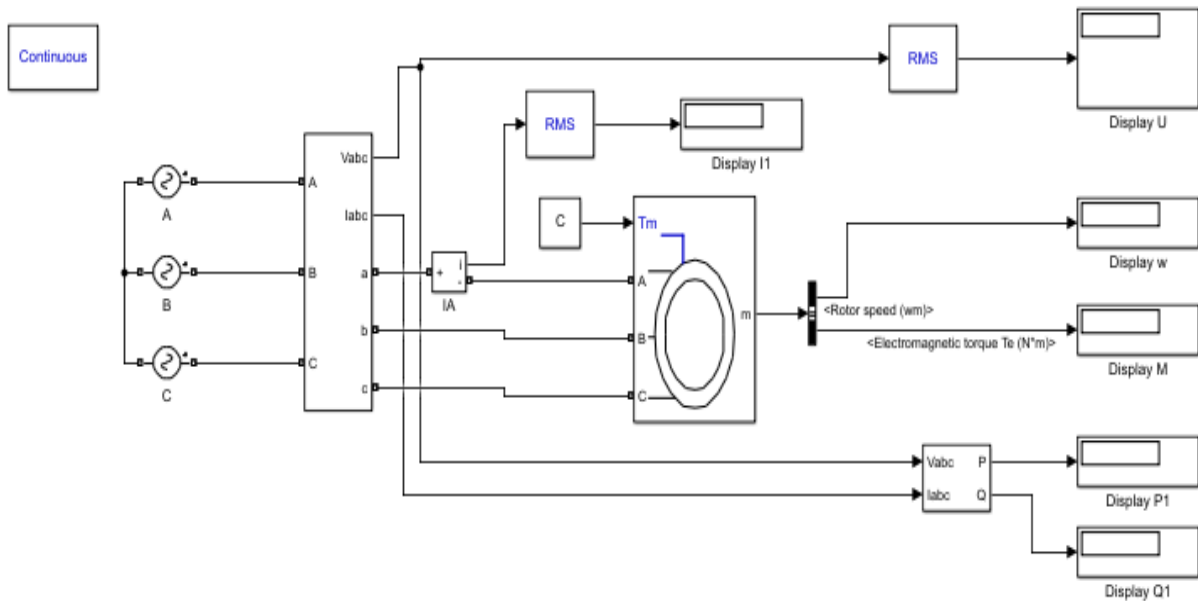


Рис. 1. Модель для исследования характеристик асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Настройка параметров электродвигателя представлена на рис. 2.

3. Производится снятие механической характеристики  $\omega = f(M)$  в двигательном и генераторном режимах работы при изменении нагрузки на валу двигателя в диапазоне  $-1,5 \text{ МН} \dots 1,5 \text{ МН}$ .

4. Производится снятие рабочих характеристик в двигательном и генераторном режимах работы при изменении нагрузки на валу двигателя в диапазоне  $-1,5 \text{ МН} \dots 1,5 \text{ МН}$ .

Результаты измерений заносятся в табл. 2.

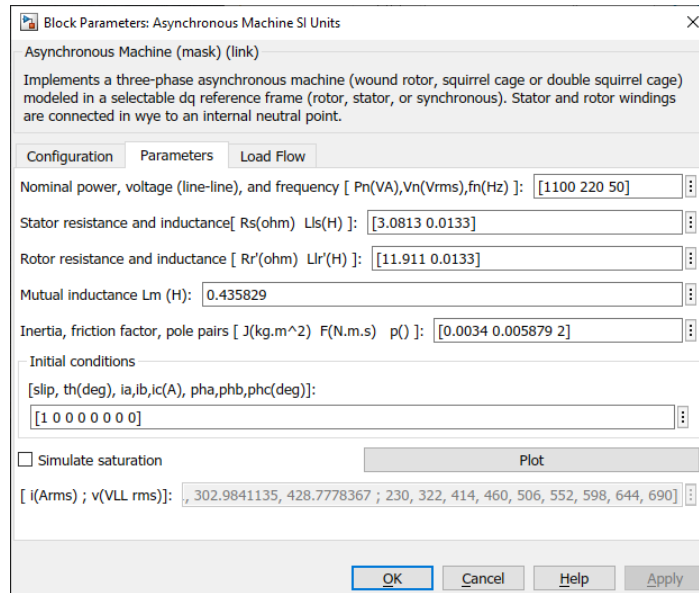


Рис. 2. Параметры настройки электродвигателя

Таблица 2

Результаты моделирования и расчета

$M$ , Н·м	$P_1$ , Вт	$Q_1$ , ВАр	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$\omega$ , рад/с	$\varphi$ , град	$\cos \varphi$	$P_2$ , Вт	$\eta$ , %	$s$ , о.е.
-10,5	-1818,45	1 066,68	222,9	3,19	236,16	-0,67	0,78	-2479,68	73	-0,5
-8,4	-1473,99	929,44	222,9	2,78	189,30	-0,74	0,74	-1590,12	93	-0,21
-7	-1238,27	850,14	222,9	2,54	184,20	-0,84	0,67	-1289,40	96	-0,17
-6,3	-1118,87	815,17	222,9	2,44	181,70	-0,93	0,60	-1144,71	98	-0,16
-2,1	-373,52	666,64	222,9	1,99	166,00	-0,63	0,81	-348,60	93	-0,06
0	13,16	528,14	222,9	1,57	157,00	-	-	0	0	0
2,1	733,69	631,81	222,9	1,91	154,60	1,30	0,27	324,66	44	0,02
4,2	836,20	663,29	222,9	1,98	152,80	1,08	0,47	641,76	77	0,03
6,3	1 268,05	737,91	222,9	2,21	150,40	0,67	0,79	947,52	75	0,04
7	1 408,60	766,22	222,9	2,29	148,92	0,61	0,82	1 042,44	74	0,05
8,4	1 718,98	852,81	222,9	2,13	139,20	0,54	0,86	1 169,28	68	0,11
10,5	2 147,85	1 004,97	222,9	2,51	124,56	0,51	0,87	1 307,88	61	0,21

5. Графики зависимостей строятся на основании полученных данных.

Увеличение момента нагрузки электродвигателя приводит к снижению угловой скорости вращения (рис. 3).

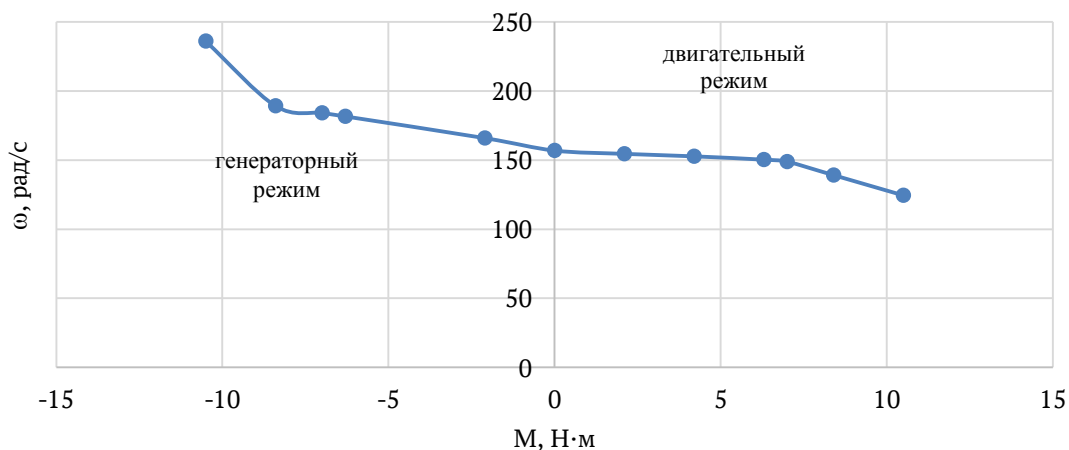


Рис. 3. Механическая характеристика двигателя



При холостом ходе полезная мощность равна нулю, далее она увеличивается с ростом нагрузки на валу двигателя (рис. 4).

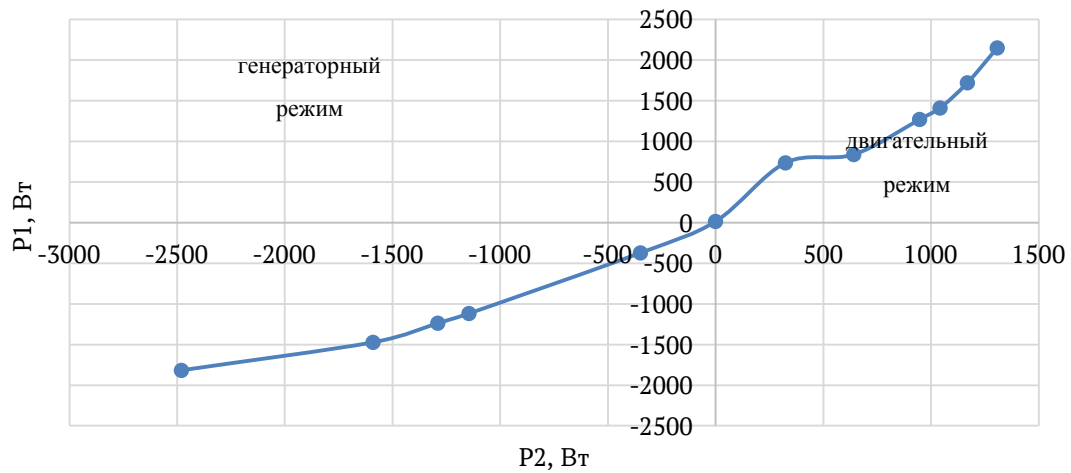


Рис. 4. Зависимость  $P_1 = f(P_2)$

Ток статора  $I_1$  возрастает с увеличением отдаваемой мощности, но при  $P_2 = 0$  имеется некоторый ток холостого хода  $I_0$ . КПД изменяется примерно так же, как и в трансформаторе, сохраняя достаточно большое значение в сравнительно широком диапазоне нагрузки (рис. 5).

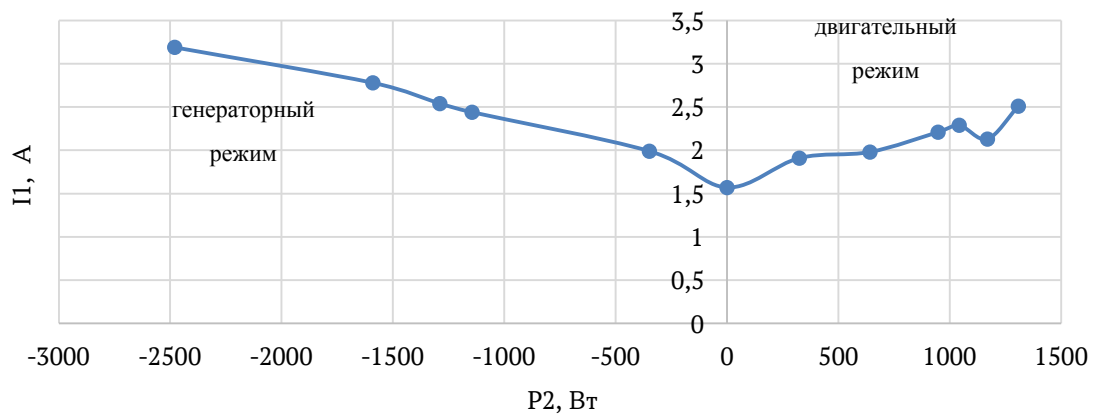


Рис. 5. Зависимость  $I_1 = f(P_2)$

При увеличении нагрузки частота вращения ротора уменьшается и увеличивается скольжение (рис. 6).

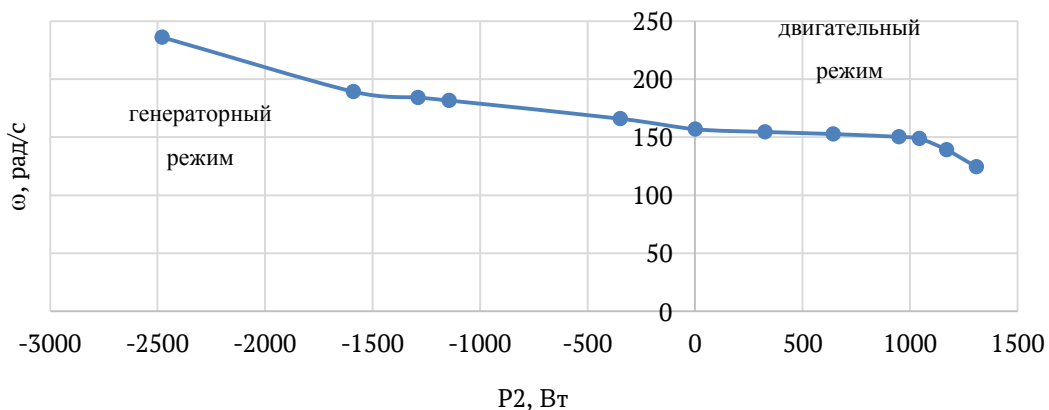


Рис. 6. Зависимость  $\omega = f(P_2)$

В связи с тем что ток статора асинхронного двигателя  $I_1$  имеет реактивную (индуктивную) составляющую, необходимую для создания магнитного поля в статоре, коэффициент мощности асинхронных двигателей меньше единицы. Наименьшее значение коэффициента мощности соответствует режиму холостого хода. Объясняется это тем, что ток холостого хода электродвигателя  $I_0$  при любой нагрузке остается практически неизменным. Увеличение нагрузки на валу двигателя сопровождается уменьшением, что объясняется возрастанием индуктивного сопротивления ротора за счет увеличения скольжения, а следовательно, и частоты тока в роторе (рис. 7).

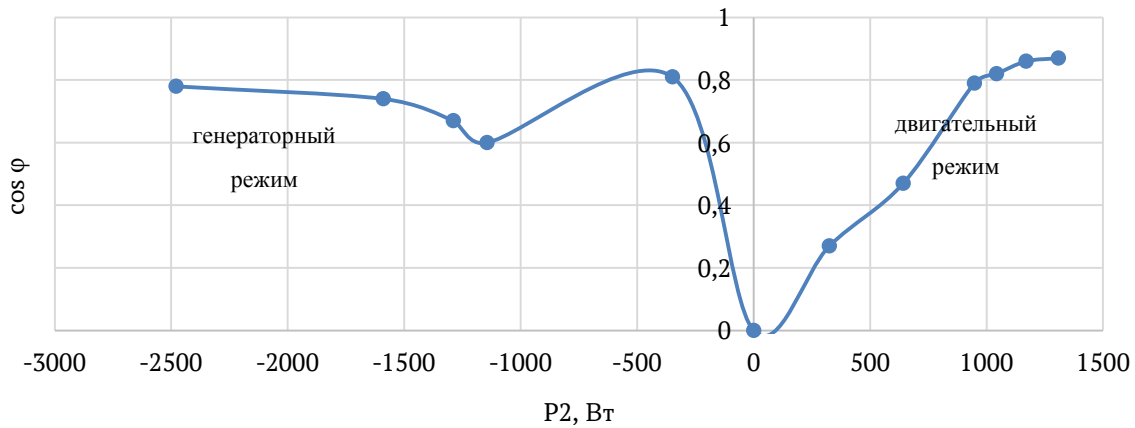


Рис. 7. Зависимость  $\cos \varphi = f(P_2)$

Коэффициент полезного действия  $\eta$  равен нулю при холостом ходе, так как равна нулю полезная мощность. С ростом нагрузки КПД увеличивается до оптимального значения, после чего КПД снижается (рис. 8).

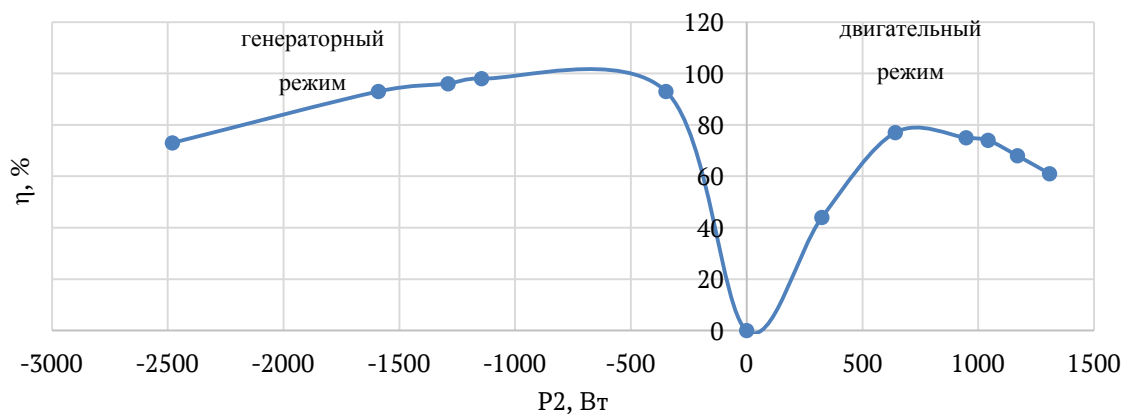


Рис. 8. Зависимость  $\eta = f(P_2)$

При увеличении нагрузки увеличивается скольжение (рис. 9).

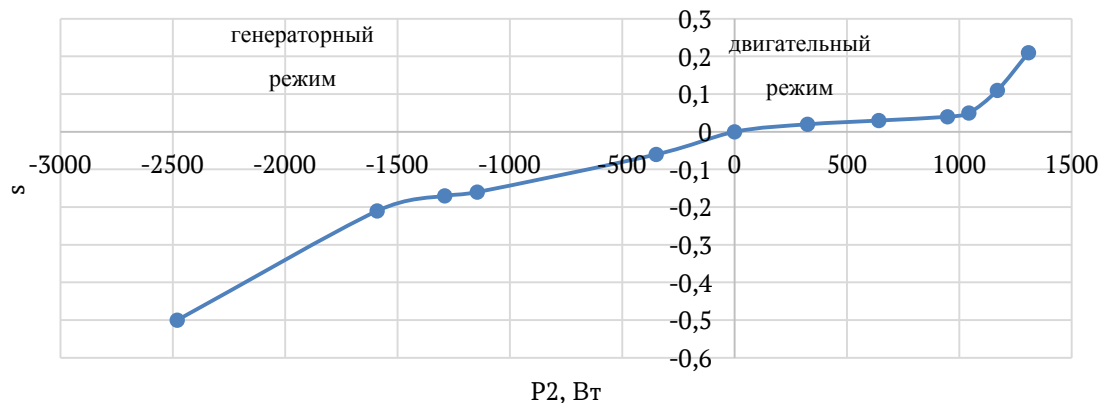


Рис. 9. Зависимость  $s = f(P_2)$

В ходе данной работы была разработана математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в среде MatLab Simulink, что позволило провести детальный анализ его работы и исследовать поведение машины при различных эксплуатационных режимах. Модель продемонстрировала возможность анализа электромагнитных и динамических процессов в двигателе, таких как пуск, работа под нагрузкой, изменения скорости вращения и другие переходные режимы [4, 5].

Проведенное моделирование подтвердило адекватность и достоверность созданной модели, что позволяет использовать ее для решения различных инженерных задач, связанных с оптимизацией и управлением асинхронными двигателями. Разработанная модель может служить инструментом для разработки и тестирования систем управления, что позволяет на практике оценить эффективность алгоритмов управления и их влияние на динамические характеристики двигателя без необходимости проведения дорогостоящих экспериментов на реальных установках.

Таким образом, результаты работы демонстрируют важность и эффективность использования программного моделирования в задачах проектирования и анализа электрических машин. Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование модели, включение более сложных механизмов управления, учет различных потерь, нелинейных эффектов и особенностей реальных установок, а также расширение модели для анализа многофазных или специализированных электрических машин.

### Литература

1. *Молочкова И.Д.* Тренажерная подготовка. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2006. – 26 с.
2. *Молочкова И.Д.* Автоматизация судовой электростанции. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2006. – 84 с.
3. *Белов О.А.* Аналитический обзор факторов эффективной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-техн. конф. (17–19 октября 2018 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2019. – Ч. 1. – С. 5–9.
4. *Сидоренко В.И.* Асинхронные машины: Теория и расчет. – М.: Высшая школа, 2009. – 512 с.
5. *Ogbonnaya E.A., Akintayo G.O.* Modeling and simulation of three-phase induction motor using MATLAB/Simulink // Journal of Electrical Engineering and Automation, 2019. – Vol. 7, № 2. – P. 45–53.

УДК 519.876.5:621.314

**А.О. Рогожников, А.А. Мхоян, Б.В. Баженов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: aleksei17\_90@mail.ru*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK**

В статье представлена имитационная модель, позволяющая рассчитать основные характеристики однофазного трансформатора, что позволяет значительно сократить расходы на закупку, установку и последующие натурные испытания. Кроме того, разработанная модель может быть использована в образовательном процессе для инженерных специальностей, связанных с распределением и эксплуатацией электрических сетей и подстанций, что в целом является важным критерием для повышения безопасности на производстве при эксплуатации электроустановок. Использование модели в исследовательской и проектной деятельности позволяет проводить расчеты, моделирование и испытания с использованием различных трансформаторов, мощность и габариты которых не соответствуют соображениям безопасности и экономической целесообразности в профильных учебных заведениях.

**Ключевые слова:** однофазный трансформатор, имитационное моделирование, MatLab Simulink, снятие характеристик, безопасность.

**A.O. Rogozhnikov, A.A. Mkhoyan, B.V. Bazhenov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006  
e-mail: aleksei17\_90@mail.ru*

## **A SINGLE-PHASE TRANSFORMER MODELING IN MATLAB SIMULINK ENVIRONMENT**

The simulation model that allows to calculate the main characteristics of a single-phase transformer, which leads to significant reduction of procurement, installation and subsequent field tests costs is presented. In addition, the application of this model can be used in the educational process for engineering specialties related to the distribution and operation of electrical networks and substations, which generally improves safety during the operation of electrical installations. The use of the model in research and design activities allows to calculate, model and test using various transformers, the power and dimensions of which do not correspond to safety considerations and economic feasibility in specialized educational institutions.

**Key words:** single-phase transformer, simulation, MatLab Simulink, characterization, safety.

В этой статье рассмотрено моделирование работы однофазного трансформатора. С каждым годом появляются все более продвинутое устройства данного типа, требующие для своей проектировки и эксплуатации высококвалифицированного персонала, что зачастую становится большой проблемой для различных учебных заведений ввиду их высокой стоимости и в некоторых случаях больших массогабаритных параметров. Это приводит к дефициту необходимой материально-технической базы для обучения будущих инженеров и, как следствие, к отсутствию необходимого опыта у них.

Во избежание данной проблемы предлагается использовать виртуальную модель работы однофазного трансформатора, выполненную, для примера, в среде MatLab, поскольку она гибко поддается настройке и изменению параметров, не имеет систематических погрешностей при расчете, а также отражает полную суть работы трансформатора вне зависимости от его фирмы и специфики.

Данная среда была выбрана неслучайно, поскольку именно ее зачастую используют инженеры для расчета и проектирования электрических систем, а также образовательные учреждения для обучения своих студентов, что позволит значительно снизить порог входа и беспрепятственно использовать программу для моделирования работы различных систем и устройств, в том числе однофазных трансформаторов.

Однофазные трансформаторы нашли широкое применение в магистральных трубопроводах для катодной защиты, в источниках питания бытовой техники, сварочных аппаратов, измерительных приборах и иных электрических устройствах различной направленности. Тем не менее основной сферой их применения остаются крупные производства, где они служат для обеспечения питания специализированного оборудования.

Сам однофазный трансформатор имеет довольно простую конструкцию и представляет из себя электрическое устройство, предназначенное для изменения величины однофазного напряжения. Он состоит из трех основных частей: первичной и вторичной обмоток, а также сердечника, представляющего из себя магнитопровод. Обе обмотки выполнены из медного провода и размещены на изолированных стрижнях. Магнитопровод состоит из листов электротехнической стали, каждый из которых изолирован лаком и имеет толщину от 0,35 до 0,5 мм.

Работа трансформатора устроена так: первичную обмотку подключают к питанию, вторичную к нагрузке. Протекающий ток создает магнитное поле, которое индуцируется во вторичной обмотке. Из-за того, что количество витков первичной и вторичной обмотки различается, разность потенциалов между концами обмоток может быть больше или меньше того, которое есть между концами первичной обмотки [1, 2].

Принцип работы трансформатора состоит в следующем: первичная обмотка подключается к источнику питания, а вторичная соединяется с нагрузкой. Протекающий ток создает магнитное поле, которое индуцируется во вторичной обмотке. Поскольку количество витков в первичной и вторичной обмотках отличается, разность потенциалов между концами обмоток может быть либо большей, либо меньшей по сравнению с разностью потенциалов в первичной обмотке, на основании чего происходит изменение выходного напряжения [3, 4].

Для создания полноценной рабочей модели однофазного трансформатора необходимо сначала задать правильные параметры в программе MatLab. Для этого необходимо прописать все блоки, эмулирующую электрическую цепь (табл. 1), нужную для работы трансформатора [5, 6].

Таблица 1

**Эмулирующие блоки виртуальной модели**

E1 (AC Voltage Source)	Источник переменного напряжения
I1, I2 (Current Measurement)	Измерители тока в цепях трансформатора
V1, V2 (Voltage Measurement)	Измерители напряжения в обмотках трансформатора
Powergui	Имитатор моделей
Linear transformer	Исследуемый однофазный трансформатор
R (sense RLC Branch)	Резисторы
P1, Q1 и P2, Q2	Измерители активной и реактивной мощностей в первичной и вторичной цепях трансформатора
Display 1...4	Окно количественного представления измерительных мощностей
Scope	Окно наблюдения формы кривых тока и напряжения во вторичной цепи

Исходные параметры блока трансформатора представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Параметры блока трансформатора**

Вар.	$U_1$ , В	$S_n$ , кВА	$U_2$ , В	$U_k$ , %	$P_k$ , Вт	$P_{10}$ , Вт	$I_{10}$ , %
11	660	100	400	3,8	1 450	390	2,7

Для дальнейшей работы схемы следует только указать параметры однофазного трансформатора, моделирование работы которого необходимо произвести (табл. 3).

Параметры трансформатора

$F, \text{Гц}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$S_H, \text{кВа}$	$U_k, \%$	$P_k, \text{Вт}$	$P_{10}, \text{Вт}$	$I_{10}, \%$
50	660	400	105	3,8	1450	390	2,7

В результате получаем следующую структурную схему, на основании которой можно проводить расчеты (рис. 1).

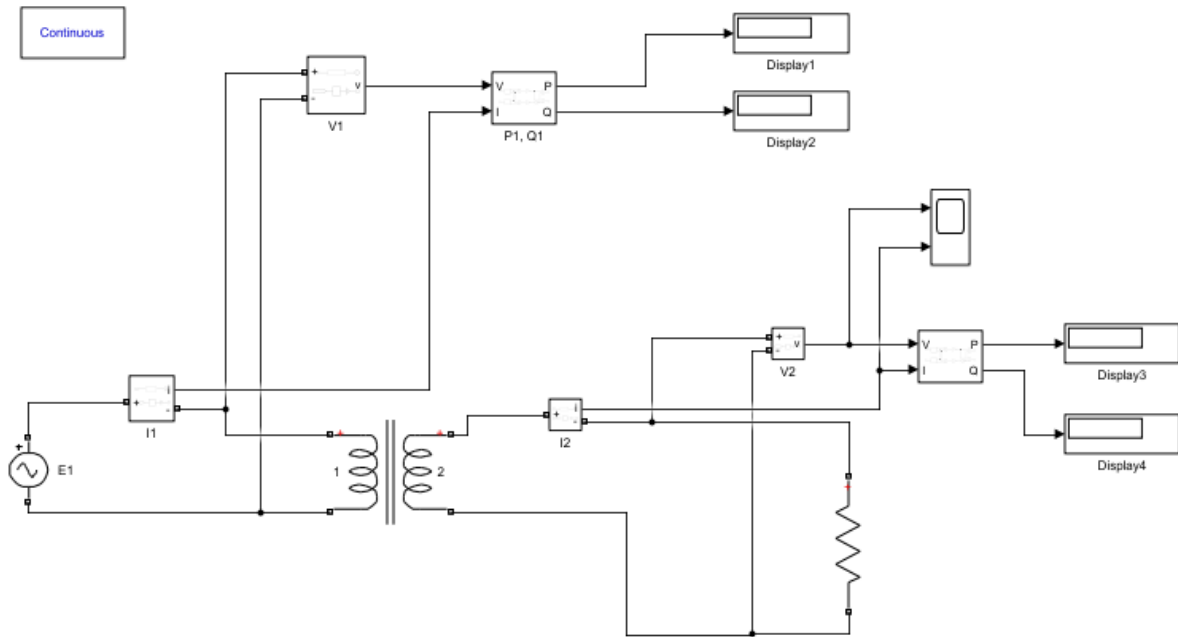


Рис. 1. Структурная схема

Производим необходимые вычисления для первичной и вторичной обмотки. Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Вычисления значений для обмоток

Первичная обмотка	Вторичная обмотка
$I_H = \frac{S_H}{U_1} = 151,5152 \text{ A}$	$I_{H2} = \frac{S_n}{U_2} = 250 \text{ A}$
$I_{10} = i_{10} \cdot I_H = 4,0909 \text{ A}$	$I_{10} = 6,75 \text{ A}$
$\cos \varphi_0 = \frac{S_H}{U_1 \cdot I_{10}} = 0,1445$	$\cos \varphi_2 = \frac{P_{10}}{U_2 \cdot I_{10}} = 0,1852$
$\varphi_0 = (61,6917)^{\sin} = 0,995$	$\varphi_2 = 79,3272$
$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k \cdot I_H} = 0,3616$	$\cos \varphi_{k2} = \frac{P_{k2}}{U_{k2} \cdot I_{H2}} = 0,3816$
$\varphi_k = 67,5672^\circ$	$\varphi_{K2} = 67,5684^\circ$
$\sin \varphi_k = 0,9245^\circ$	$\sin \varphi_{K2} = 0,9243^\circ$
$R_1 = \frac{S_H \cdot U_k \cdot \cos \varphi_k}{2 \cdot U_i^2 \cdot I_H} = 0,0027 \text{ Ом}$	$R_2 = \frac{S_n \cdot U_{k2} \cdot \cos \varphi_{k2}}{2 \cdot U_2^2 \cdot I_{H2}} = 0,0072 \text{ Ом}$
$L_{p1} = \frac{S_H \cdot U_k \cdot \sin \varphi_k}{2 \cdot U_i \cdot I_H} = 0,0188$	$L_{p2} = \frac{S_n \cdot U_{k2} \cdot \sin \varphi_{k2}}{2 \cdot U_2^2 \cdot I_{H2}} = 0,0176$

Вычисляем оставшиеся значения, согласно формулам (1–3):

$$L_m = \frac{S_H}{U_1 \cdot I_H \cdot \sin \varphi_0} = 374301, \quad (1)$$

$$U_{K2} = U_2 * U_K = 15,2B, \quad (2)$$

$$\sin \varphi_2 = 0,9827. \quad (3)$$

После получения всех необходимых значений (1–3) можно провести исследование работы трансформатора в различных режимах, в которых ему нередко приходится работать на производстве.

Для проведения опыта при работе трансформатора в режиме холостого хода необходимы следующие действия: отключить нагрузку ( $R = inf$ ), трансформатор запитать напряжением  $U_1$  (660 В), после этого следует включить моделирование (Run). Результаты проведенного опыта отобразятся в параметрах блока (powergui).

Для проведения опыта короткого замыкания требуется: установить напряжение источника питания равным напряжению короткого замыкания ( $E_1 = 25,08$  В), закоротить сопротивление, включить моделирование. Результаты отобразятся в блоке powergui.

Для начала определяем номинальное сопротивление нагрузки, в итоге получаем значение  $R_{ном} = \frac{U_1^2}{S} = 4,356$  Ом. После этого необходимо снять характеристики устройства при изменении сопротивления в пределах от 0,2 до 1,2 от  $R_{ном}$ . Полученные результаты экспериментов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты опытов

∞	395,3	2 652	660	4,09	0	0	0	0	81,7	0,1474	0	2 681,299
0	500,9	1 845	660	152,67	0	0	0	251,78	74,8	0,2620	0	1 911,786

После получения всех необходимых значений и проведения опытов следует снять характеристики работы однофазного трансформатора.

Таблица 6

Результаты опыта короткого замыкания

R	P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	U <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	φ	cos φ	η	S
0,87	8 890	7220	660	273,32	88140	0,0000000047	391,81	449,74	4,6	0,9967	0,9913	89202,67
1,74	4 560	2853	660	138,45	45000	0,0000000010	395,97	227,26	3,58	0,9980	0,9868	45689,16
1,61	3 050	2022	660	92,85	30200	0,0000000051	397,29	152,01	3,79	0,9978	0,9879	30636,8
3,48	2 300	1735	660	69,95	22750	0,0000000324	397,93	114,19	4,3	0,9972	0,9878	23095,26
4,36	1 840	1598	660	56,18	18230	0,0000000009	398,31	91,44	4,93	0,9963	0,9865	18548,96
5,23	1 540	1521	660	47	15200	0,0000000074	398,56	76,25	5,62	0,9952	0,9838	15524,69

На основании полученных данных построены графики зависимости основных параметров. Получен график зависимости напряжения на вторичной обмотке трансформатора от тока нагрузки, имеющий динамику снижения параметра напряжения при увеличении нагрузки (рис. 2, а). График зависимости КПД от тока имеет тенденцию к увеличению с ростом нагрузки (рис. 2, б). График зависимости тока первичной обмотки от тока нагрузки демонстрирует рост, достигает максимума и далее снижается при достижении номинальной нагрузки (рис. 2, в). График зависимости коэффициента мощности от тока нагрузить также достигает максимума при значениях  $0,8I_{2н}$  (рис. 2, г).

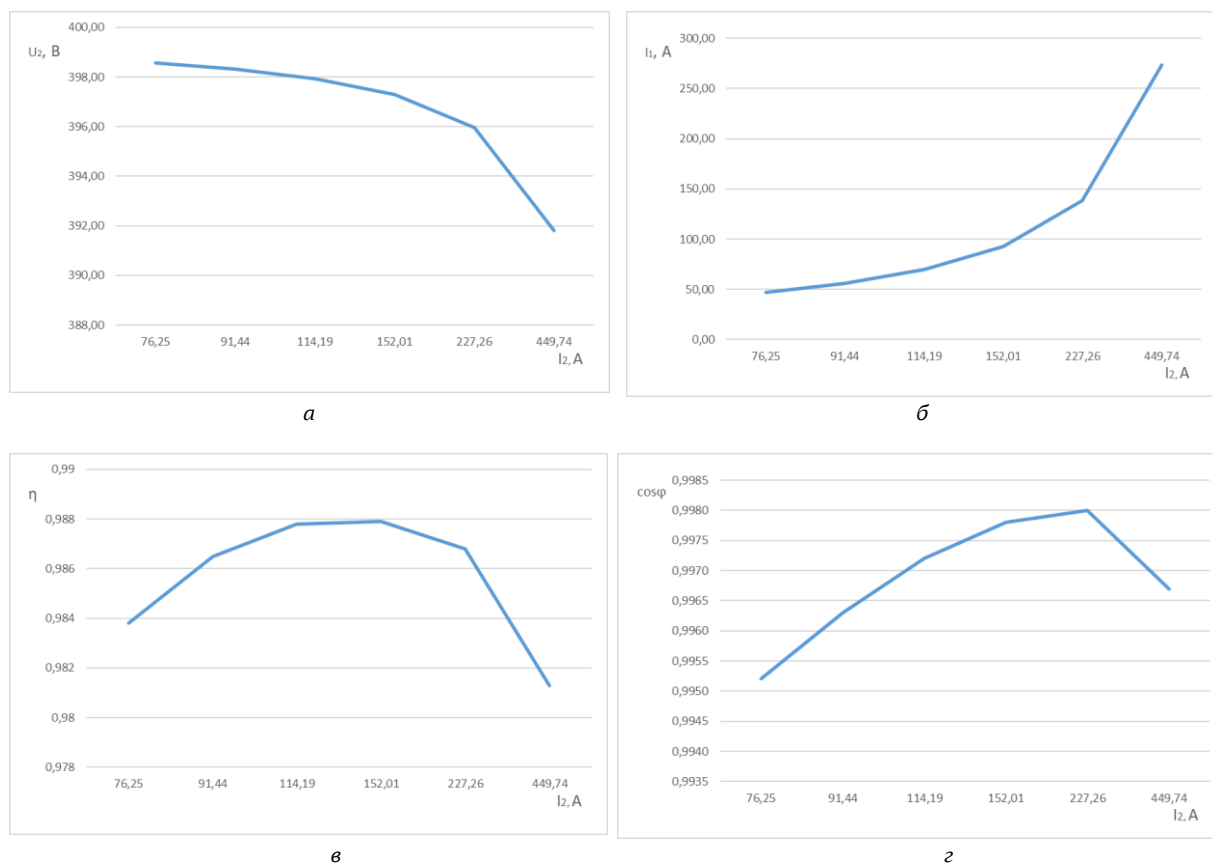


Рис. 2. Графики зависимостей: а – график зависимости  $U_2(I_2)$ ; б – график зависимости  $\eta(I_2)$ ; в – график зависимости  $I_1(I_2)$ ; г – график зависимости  $\cos \varphi_1(I_2)$

В данной статье было проведено моделирование однофазного трансформатора в среде MatLab. При моделировании была создана структурная схема исследуемой модели и проведены необходимые для этого расчеты, а также показан пример эмулирования разных режимов работы трансформатора [7, 8].

В результате опытов и вычислений была получена полноценная модель работы однофазного трансформатора, что позволяет использовать ее в инженерной деятельности для проектирования и расчета электрических систем как малых, так и крупных предприятий. Кроме того, данную модель можно использовать в учебной и научной деятельности, что позволяет значительно снизить экономические затраты на покупку, транспортировку и установку настоящего однофазного трансформатора.

### Литература

1. Кислицын А.Л. Трансформаторы: Учеб. пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – С. 3–10.
2. Пантина А.И., Белов О.А. Перспективы методики инфракрасной диагностики силовых трансформаторов // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Восьмой всерос. науч.-практ. конф. (23–25 мая 2017 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2017. – С. 102–104.
3. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы: Учеб. пособие. – М.: МГАУ, 2002. – С. 4–12.
4. Мясников Г.С., Белов О.А. Общая оценка эффективности электроснабжения в Усть-Камчатском изолированном энергоузле // Материалы Всерос. междисциплин. науч. конф. «Наука и практика – 2022». – Астрахань, 2022. – С. 258–262.
5. Дьяконов В.П. MatLab: Учебный курс. – СПб., 2001.
6. Белов О.А. Оценка динамики электропотребления и перспективы развития генерации в Ключевском изолированном энергоузле Камчатского края // Электронный сборник материалов



I Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики». – Новополюк, 2023. – С. 251–260.

7. *Мэтьюз Джон Г., Финк Куртис Д.* Численные методы. Использование MatLab. – М., СПб., Киев: Вильямс, 2001 г. – 713 с.

8. *Белов О.А.* Анализ структуры генерирующей мощности и динамики электропотребления Соболевского изолированного энергоузла Камчатского края // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 1 (21). – С. 118–138.

УДК 620.19:629.5.023

**Д.П. Ястребов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: restart1101@mail.ru*

### **К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ЛАБОРАТОРНОГО УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОТЕКТОРНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ СЭУ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ КОРПУСА СУДНА \***

Статья посвящена теме диагностирования работоспособности протекторной защиты, которая используется на морских судах. В протекторной защите применяются судовые протекторы, которые широко распространены на судах, в том числе в элементах судовой энергетической установки (СЭУ), к примеру, в теплообменных аппаратах, кингстонных решетках, где осуществляется забор морской воды для охлаждения СЭУ, танков для защиты от коррозии. Однако среди защитных морских протекторов нередко встречаются случаи брака. В случае использования таких протекторов возникает преждевременный коррозионный износ металлоконструкции, который способен вызвать дополнительные затраты при проведении и без того дорогостоящего ремонта. Существующие устройства и методики по оценке работоспособности судовых протекторов достаточно трудоемки и поэтому не применяются экипажами судов. В работе рассмотрен вопрос о создании простого эффективного устройства диагностирования судовых корпусных протекторов и протекторов элементов СЭУ.

**Ключевые слова:** судовой протектор, коррозионная защита, измерение потенциала, эффективность коррозионной защиты элементов СЭУ, защитный потенциал, разница потенциалов.

**D.P. Yastrebov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: restart1101@mail.ru*

### **ON THE ISSUE OF CREATING A LABORATORY DEVICE FOR DIAGNOSING PROTECTION OF POWER PLANT ELEMENTS AND ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF SHIP'S HULL**

The topic of diagnosing the performance of sacrificial protection used on sea vessels is discussed. In sacrificial protection, marine protectors are used, which are widely used on ships, including in elements of the marine power plant (MPP), for example, in heat exchangers, sea-cock grates, where sea water is taken in to cool the MPP, tanks for corrosion protection. However, among protective marine protectors, there are often cases of defects. In the case of using such protectors, premature corrosion wear of the metal structure occurs, which can cause additional costs during the already expensive repair. Existing devices and methods for assessing the performance of marine protectors are quite labor-intensive and therefore are not used by ship crews. The paper considers the issue of creating a simple effective device for diagnosing marine hull protectors and protectors of MPP elements.

**Key words:** ship protector, corrosion protection, potential measurement, efficiency of corrosion protection of power plant elements, protective potential, potential difference.

На рыбопромысловых судах в основном используется протекторная защита. Наиболее распространена так называемая пассивная защита, в которой применяются судовые протекторы, которые широко распространены на судах, в том числе в элементах судовой энергетической установки (СЭУ), к примеру, в теплообменных аппаратах, кингстонных решетках, где осуществляется забор морской воды для охлаждения СЭУ, танков. Однако среди защитных морских протек-

---

\* Данная статья заняла первое место в конкурсе на лучшую научную статью студентов, курсантов, молодых ученых КамчатГТУ в номинации «Лучшая неопубликованная научная статья молодых ученых» (октябрь 2024 г.).

торов нередко встречаются случаи брака. В случае использования таких протекторов возникает преждевременный коррозионный износ металлоконструкции, который способен вызвать дополнительные затраты при проведении и без того дорогостоящего ремонта.

Цель статьи – разработать простое устройство диагностирования для оценки работоспособности судовых корпусных протекторов и протекторов для элементов СЭУ для экипажей судов и кораблей.

### Анализ существующих методик и устройств технического диагностирования протекторов морских судов

Развитие технических средств и методов защиты от коррозии элементов коррозионной защиты металлических частей судна представляется актуальной задачей. Решение данной проблемы будет способствовать повышению безопасности мореплавания, надежности в целом и элементной базы, снижению затрат на ремонт металлических частей корпуса и их элементов.

Рассмотрим ключевые (основные) результаты исследований в области разработок и испытаний усовершенствованных хлорсеребряных электродов (ХСЭ). Российские изобретатели разработали конструкцию электрода сравнения длительного действия (рис. 1).

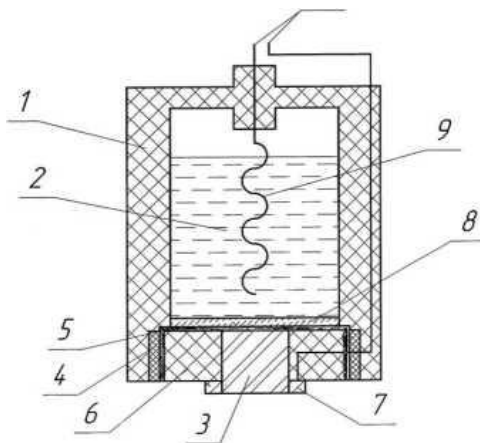


Рис. 1. Электрод сравнения длительного действия

Данный электрод сравнения применяется для диагностики свойств катодным методом трубопроводов. Рассматриваемое устройство нецелесообразно и трудоемко применять на морском флоте. Кроме того в результате исследования пришли к выводу, что данный тип электродов имеет высокую цену. Эти недостатки не позволяют использовать данные устройства на морских судах. Целесообразнее использовать их в трубопроводах. Конструкции модернизированных альтернативных электродов рассмотрены на рис. 2.

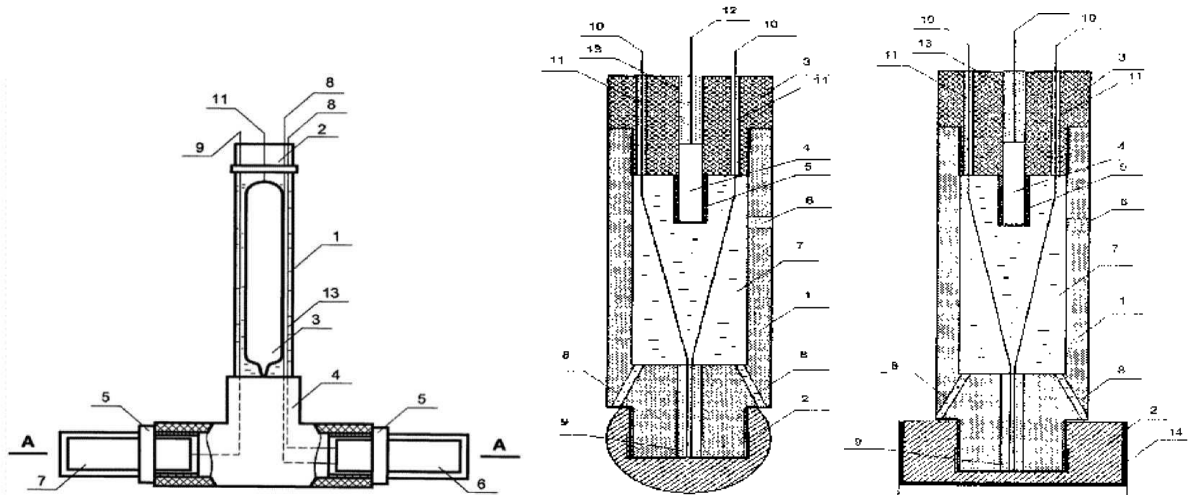


Рис. 2. Схема улучшенного ХСЭ

Электроды сравнения, представленные на рис. 1, являются модернизированным вариантом применяемых ХСЭ, в конструкции которых был применен новый тип корпусов из диэлектрика. Но описанные электроды невозможно продолжительно эксплуатировать экипажами судов из-за трудности в хранении. Из-за недостатков ХСЭ необходимо рассмотреть электрод новой конструкции.

Известна методика, позволяющая оценить работоспособность протекторной защиты методом, приведенном в НД [1]. Предлагается использовать устройство (ДВ-3) [2-4]. На рис. 3 приведена электроизмерительная схема. Но существует необходимость оценки рабочих параметров новых протекторов или демонтированных. Данное устройство не может справиться с требуемой задачей.

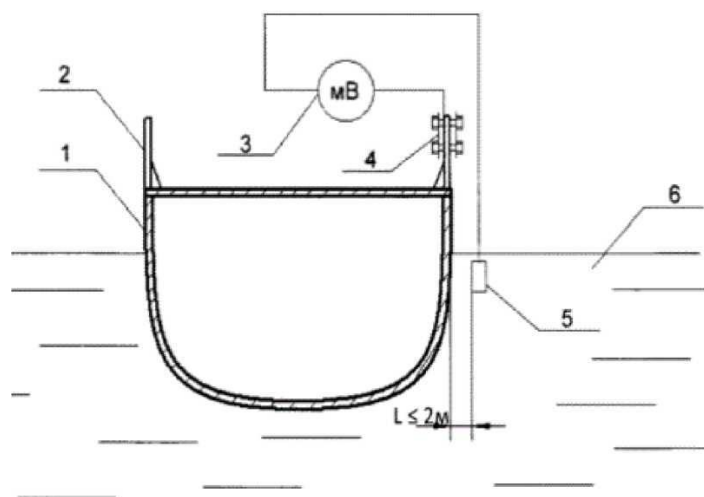


Рис. 3. Устройство для измерения защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов (ДВ-3)

Можем сделать вывод, что для устройств диагностики электрохимической защиты на судах Камчатского края необходимо внедрение более простых в эксплуатации электродов сравнения и измерительных устройств, которые являются главным элементом в их конструкции. Более удобные в эксплуатации устройства диагностики электрохимической защиты судов существенно снизят трудоемкость диагностики и прежде всего хранения. Поэтому в области разработки как электродов сравнения, так и измерительных устройств возникает острая нехватка исследования нестандартных электродов сравнения.

#### Создание лабораторного образца устройства технического диагностирования судовых протекторов с внедрением ручного и автоматизированного методов контроля

Для сборки образца устройства, а также дальнейших исследований были закуплены следующие устройства и материалы, которые представлены в таблице.

Список приобретенных устройств для сборки лабораторного образца устройства

Наименование	Стоимость, руб.	Количество, шт.	Общая стоимость, руб.
UT50A UNI-T Мультиметр цифровой	4 000	1	4 000
Мультиметр MY62 MASTECH	4 000	1	4 000
Тепловизор FLIR ONE PRO	41 900	1	41 900
Экран LCD12864 HDMI (3.3V Blue Backlight)	6 200	2	12 400
Программируемый портативный мини-смарт-паяльник Pine64	6 400	2	12 800
3D-принтер FLASHFORCE	60 000	1	60 000
Электроды сравнения (ХСЭ)	16 150	2	32 300
Термопринтер TTL QR205	3 140	1	3 140
Филамент для трехмерной печати	29 000	1	29 000
<i>Итого</i>			<i>199 540</i>

Также для изготовления комплектующих устройства необходима была 3D-печать, поэтому был приобретен 3D-принтер FLASHFORCE, представленный на рис. 4.

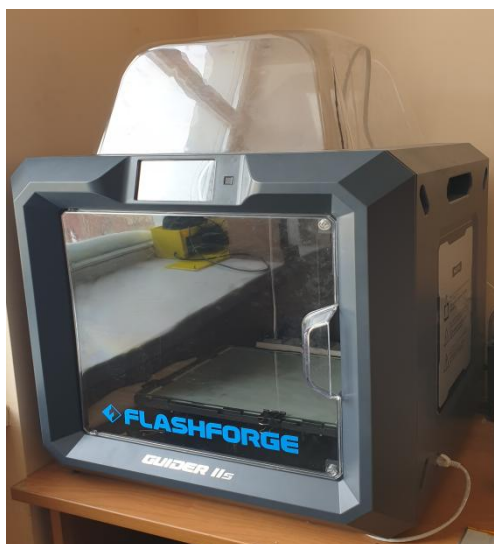


Рис. 4. 3D-принтер FLASHFORCE

Корпус лабораторного образца представляет собой контейнер, выполненный из диэлектрического материала, он наполнен натуральной или искусственной морской водой, в центре контейнера размещен перфорированный диэлектрический контейнер, выполненный с возможностью установки в нем испытательного образца, выполненного в виде сменного стандартного протектора.

Во время диагностирования морских протекторов ручным методом контроля используется мультиметр. Одну из клемм мультиметра подключают к морскому протектору, зафиксированному в воде, вторую клемму подключают к электроду сравнения. Сам же мультиметр настраивают на измерение постоянного напряжения (рис. 5). После снятия показаний устанавливают соответствие результатов измерений с нормативной документацией [1].

Лабораторный образец обладает следующими техническими характеристиками: возможность эксплуатации при температуре от  $-5$  до  $65^{\circ}\text{C}$ ; раствором выступает морская вода; электрическое сопротивление устройства составляет не более  $1\text{ кОм}$ ; потенциал, относительно хлорсеребряного электрода около  $970\text{ мВ}$ ; плотность тока на аноде от  $0,4$  до  $4,0\text{ мА/см}^2$  в течение  $(24 \pm 1)$  ч.



Рис. 5. Лабораторная установка для исследования характеристик

Созданный на опыте и результатах в области коррозионной защиты [5–15] лабораторный образец соответствует требованиям в области диагностирования коррозионной защиты [1], что позволяет проводить дальнейшие исследования по диагностированию судовых протекторов [1]. Это подтверждается результатами эксперимента по оценке поверки электродов сравнения на разработанном устройстве с применением автоматизированного метода диагностирования. Динамика изменений результатов потенциала электродов сравнения проиллюстрированы на рис. 6.

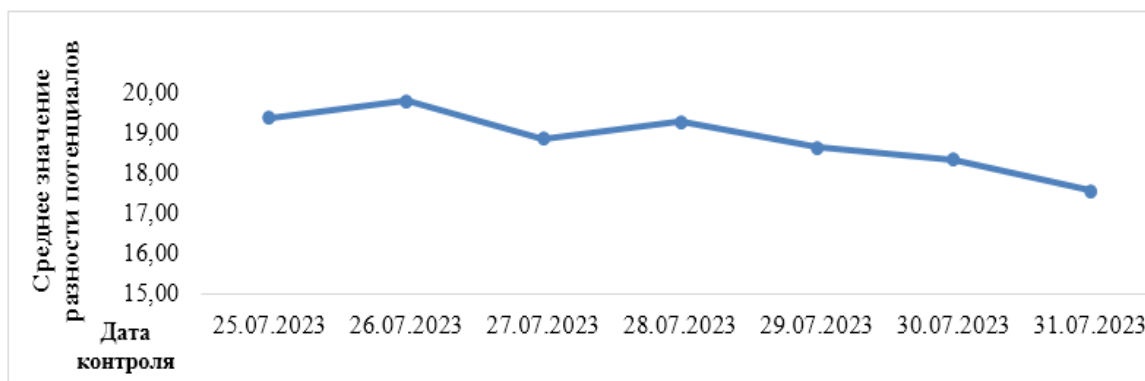


Рис. 6. Динамика изменений результатов измерений потенциала электродов сравнения

1. Разработанное устройство диагностирования может быть использовано экипажами судов и кораблей для более точной оценки работоспособности судовых корпусных протекторов и протекторов для элементов СЭУ.

2. Разработать устройство диагностирования позволит упростить процесс оценки работоспособности судовых корпусных протекторов и протекторов для элементов СЭУ для экипажей судов и кораблей.

### Литература

1. ГОСТ 26501-85. Корпуса морских судов. Общие требования к электрохимической защите. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 7 с.

2. Белов О.А., Швецов В.А., Ястребов Д.П. Обоснование оптимальной периодичности контроля работы протекторной защиты стальных корпусов судов // Эксплуатация морского транспорта. – Новороссийск, 2017. – № 1(82). – С. 41–48.

3. Внедрение усовершенствованного способа контроля систем протекторной защиты стальных корпусов судов камчатского флота / О.А. Белов, В.А. Швецов, Д.П. Ястребов, О.А. Белавина, Д.В. Шунькин // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2017. – Вып. 39. – С. 6–11.

4. Обоснование возможности исключения внешнего осмотра систем протекторной защиты стальных корпусов судов / В.А. Швецов, О.А. Белов, О.А. Белавина, Д.П. Ястребов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2017. – Вып. 1. – С. 29–38.

5. О выборе электродов для контроля систем протекторной защиты стальных судов и кораблей / Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, О.А. Белавина // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2019. – Вып. 4. – С. 39–45.

6. О целесообразности использования хлорсеребряных электродов для контроля систем протекторной защиты стального корпуса судна / Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.П. Ушакевич, Г.В. Кузнецов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-техн. конф. (23–25 октября 2019 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2020. – С. 121–124.

7. К вопросу использования цинковых электродов для контроля протекторной защиты судов и кораблей / Д.П. Ястребов, Д.В. Шунькин, А.О. Рогожников, Г.В. Кузнецов // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2021. – Вып. 2. – С. 16–23.

8. Ястребов Д.П., Белов О.А., Швецов В.А., Белавина О.А., Зайцев С.А. К вопросу использования стальных пластин для контроля протекторной защиты корпусов судов и кораблей // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-техн. конф. (23–25 октября 2019 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2020. – С. 125–129.

9. К вопросу использования электродов из судокорпусной стали для контроля защищенности от коррозии корпусов судов и кораблей / Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, Б.В. Тарабанов, С.А. Зайцев // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2020. – С. 15–21.

10. К вопросу использования алюминиевых электродов для контроля защищенности от коррозии стальных корпусов судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.П. Ушакевич, Г.В. Кузнецов, Б.В. Тарабанов* // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2021. – Вып. 3. – С. 23–32.

11. *Ястребов Д.П.* К вопросу использования медных электродов для контроля защищенности от коррозии стальных корпусов судов и кораблей // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2021. – Вып. 4. – С. 43–51.

12. *Ястребов Д.П.* К вопросу изготовления цинковых электродов сравнения для морских судов и кораблей // Вестник Астраханского государственного технического университета Сер.: Морская техника и технология. – 2022. – № 4. – С. 38–46.

13. *Shunkin D.V., Yastrebov D.P., Belov O.A. et al.* On the issue of using control electrodes for the marine vessel protectors technical diagnostics // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. – 2023. – № 4. – С. 17–24.

14. К вопросу развития стандартных электродов сравнения и перспективы их использования для контроля протекторной защиты морских судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, В.А. Швецов, Ю.В. Крутько, П.Г. Калинин* // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (9–10 ноября 2023 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2024. – С. 28–33.

15. *Ястребов Д.П., Белов О.А.* Обоснование возможности использования нестандартных электродов сравнения при оценке антикоррозионной защиты морских инженерных сооружений // Материалы VI Нац. научн.-техн. конф. – Владивосток: Дальневосточный гос. техн. рыбохоз. ун-т, 2023. – С. 381–387.

УДК 620.19:629.5.023

**Д.П. Ястребов, С.П. Лысянский, О.А. Белов, В.А. Швецов, В.С. Волков**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: dhhkg8@gmail.com*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ  
ЛАБОРАТОРНОГО УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
ПРОТЕКТОРНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ СЭУ  
И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ КОРПУСА СУДНА**

Безопасность эксплуатации судна в значительной степени зависит от надежности корпуса, и особенно его подводной части. С целью повышения эффективности противодействия коррозии корпусов судов, постоянно разрабатываются и совершенствуются комплексные способы защиты, включающие в себя лакокрасочные покрытия и системы электрохимической защиты (ЭХЗ). Наиболее распространенной системой ЭХЗ является система протекторной защиты, которая согласно нормативным документам (НД) должна включать следующие основные элементы: подвесные протекторы; переносные хлорсеребряные электроды сравнения (ХСЭ); переносной милливольтметр для измерения потенциала корпуса защищаемого объекта. Однако среди защитных морских протекторов нередко встречаются случаи брака. В случае использования таких протекторов возникает преждевременный коррозионный износ металлоконструкции, который способен вызвать дополнительные затраты при проведении и без того дорогостоящего ремонта. Существующие методики по оценке работоспособности протекторов достаточно трудоемки, а технические средства для контроля отсутствуют на судах из-за дороговизны и сложности хранения. Поэтому для решения этой проблемы было разработано лабораторное устройство диагностирования судовых протекторов для корпусов судов и элементов СЭУ. Статья посвящена вопросу оценки работоспособности лабораторной установки диагностирования судовых протекторов для корпусов судов и элементов СЭУ. Для оценки ее работоспособности были проведены экспериментальные исследования, которые представлены в данной работе.

**Ключевые слова:** судовой протектор, коррозионная защита, измерение потенциала, эффективность, коррозионная защита элементов СЭУ, защитный потенциал, разница потенциалов.

**D.P. Yastrebov, S.P. Lysyansky, O.A. Belov, V.A. Shvetsov, V.S. Volkov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: dhhkg8@gmail.com*

**EXPERIMENTAL STUDIES OF LABORATORY DEVICE OPERATION  
FOR DIAGNOSING PROTECTION OF SPP ELEMENTS  
AND SHIP HULL ELECTROCHEMICAL PROTECTION**

The safe operation of a ship depends to a large extent on the reliability of the hull and, in particular, its underwater section. In order to increase the effectiveness of corrosion protection of ship hulls, complex protection methods, including paints and electrochemical protection systems (ECP), are constantly being developed and improved. The most widespread system of ECP is the protection system, which, according to ND, should include the following main elements: suspended protectors; portable chlorosilver reference electrodes (CSE); portable millivoltmeter for measuring the hull potential of the protected object. However, it is not uncommon for marine protectors to fail. When such protectors are used, premature corrosion deterioration of the metal structure occurs, which can cause additional costs in the course of already expensive repairs. Existing methods of assessing protector performance are labour-intensive, and technical means of inspection are not available on ships due to the cost and complexity of storage. Therefore, in order to solve this problem, a laboratory device for the diagnosis of ship protectors for hulls and elements of EMS has been developed. The article is devoted to the issue of evaluating the operability of the laboratory device for diagnosing ship protectors for ship hulls and elements of EEU. In order to assess its operability, experimental studies which are presented in this paper were carried out.

**Key words:** ship protector, corrosion protection, potential measurement, efficiency, corrosion protection of power plant elements, protective potential, potential difference.



Коррозия – одна из главных причин износа судов, снижения их прочности и безопасности. Борьба с коррозией на флоте является приоритетной государственной задачей. Современные морские суда и корабли в своем большинстве целиком построены из стали и металлических сплавов, имеют на своем борту металлические механизмы и элементы, подверженные коррозии.

Коррозия наносит непоправимый вред обшивке бортов, надстройкам, леерным ограждениям, трубопроводам, цистернам, топливным и балластными танками, элементам энергетических установок и другим конструкциям судна. Основным элементом, подвергающимся коррозии и отвечающим за живучесть судна и безопасность экипажа на борту, является корпус. Безопасность эксплуатации судна в значительной степени зависит от надежности корпуса, и особенно его подводной части. С целью повышения эффективности противодействия коррозии корпусов судов, постоянно разрабатываются и совершенствуются комплексные способы защиты, включающие в себя лакокрасочные покрытия и системы электрохимической защиты (ЭХЗ).

Наиболее распространенной системой ЭХЗ является система протекторной защиты, которая согласно НД [1, 2] должна включать следующие основные элементы: подвесные протекторы; переносные хлорсеребряные электроды сравнения (ХСЭ); переносной милливольтметр для измерения потенциала корпуса защищаемого объекта. Однако среди защитных морских протекторов нередко встречаются случаи брака. В случае использования таких протекторов возникает преждевременный коррозионный износ металлоконструкции, который способен вызвать дополнительные затраты при проведении и без того дорогостоящего ремонта. Существующие методики [1, 2] по оценки работоспособности протекторов достаточно трудоемки, а технические средства для контроля отсутствуют на судах из-за дороговизны и сложности хранения. Поэтому для решения этой проблемы было разработано лабораторное устройство диагностирования судовых протекторов для корпусов судов и элементов СЭУ. Для оценки его работоспособности были проведены следующие экспериментальные исследования.

Цель статьи – оценить работоспособность лабораторной установки диагностирования судовых протекторов для корпусов судов и элементов СЭУ.

Сконструировали установку на основании результатов авторов [1–4] в области диагностирования ЭХЗ на судах. В эксперименте участие принимали алюминиевые, магниевые и цинковые протекторы. А именно:

- 1) 2 протектора из сплава алюминия серии: 1А и 5-АП;
- 2) 2 протектора из сплава магния серии: 3-МП1 и 6-МП1;
- 3) 2 протектора из сплава цинка серии 3-ЦП1 и 5-ЦП-1.

Эксплуатация устройства происходит следующим образом:

– непокрытый стальной контейнер наполняют натуральной или искусственной морской водой до установленной отметки;

– контролируемый протектор размещают в перфорированном диэлектрическом контейнере в вертикальном положении и фиксируют его положение с помощью диэлектрического поплавка;

– к стальной арматуре протектора присоединяют с помощью самозажимного контакта измерительный кабель, снабженный кабельным наконечником;

– через 15 минут после размещения контролируемого протектора в морской воде измеряют разность потенциалов ( $\Delta U$ ) между протектором и электродом сравнения с помощью электроизмерительного устройства;

– результаты контроля качества протектора считают удовлетворительными, если выполняется условие:

- а) для сплавов марки АП:  $\Delta U = |95 \div 130|$  мВ;
- б) для сплавов марки ЦП:  $\Delta U = |70 \div 85|$  мВ;
- в) для сплавов марки МП:  $\Delta U = |400 \div 460|$  мВ;

– после измерения разности потенциалов между контролируемым протектором и электродом сравнения измеряют с помощью амперметра силу тока в измерительной электрической цепи, образованной контролируемым протектором, амперметром, стальным контейнером, морской водой;

– результаты контроля считают удовлетворительными, если выполняется условие:

- а) для сплавов марки АП:  $I \geq 42$  мА;
- б) для сплавов марки ЦП:  $I \geq 40$  мА;
- в) для сплавов марки МП:  $I \geq 145$  мА.

Данное устройство целесообразно использовать экипажами судов.

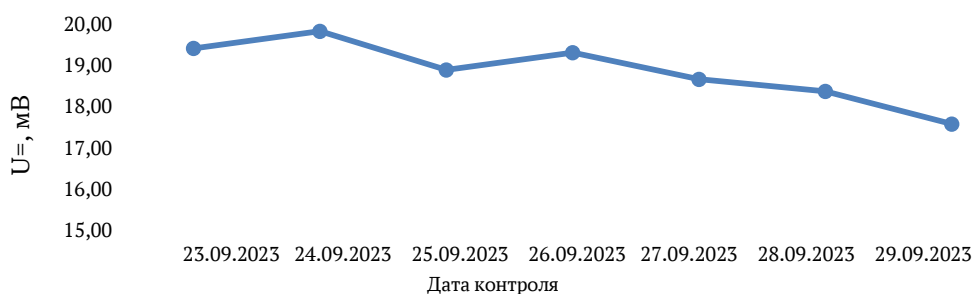
В таблице приведена зависимость показателя разности потенциалов от времени, в течение которого протектор находился в установке.

**Зависимость разности потенциалов между протекторами и электродом сравнения от времени, проведенного протекторами в воде**

Время	Разница потенциалов					
	1-А	5-АП	3-МП1	6-МП1	3-ЦП1	5-ЦП
0,5 мин	366	315	976	790	250	154
1 мин	371	335	965	791	268	166
1,5 мин	388	339	960	794	281	171
2 мин	389	340	954	797	291	173
2,5 мин	387	340	950	802	301	175
3 мин	386	340	946	806	310	175
4 мин	383	340	941	814	326	175
5 мин	383	340	935	822	340	175
6 мин	383	340	930	830	352	175
7 мин	383	340	926	837	354	175
8 мин	383	340	922	843	375	175
9 мин	383	340	920	850	387	175
10 мин	383	340	920	856	398	175
11 мин	383	340	920	861	409	175
12 мин	383	340	920	866	418	175
13 мин	383	340	920	870	426	175
14 мин	383	340	920	874	432	175
15 мин	383	340	920	878	437	175
16 мин	383	340	920	881	440	175
17 мин	383	340	920	883	443	175
18 мин	383	340	920	885	446	175
19 мин	383	340	920	885	448	175
20 мин	383	340	920	885	447	175

Полученные результаты позволяют нам прогнозировать время работоспособности образцов в лабораторных условиях [3, 4]. Комплексные испытания лабораторного устройства и сама сборка лабораторного образца заняли период с марта по июнь 2023 г. Таким образом, на основании испытаний, проводимых с сентября по ноябрь 2023 г., можно сделать вывод, что собранный лабораторный образец устройства работоспособен на основании проведенных ранее исследований [5–8], так как результаты диагностики исследуемых протекторов соответствуют требованиям [1, 2].

В течение периода с 23 по 29 сентября 2023 г. проводилось исследование основных показателей работы установки и испытания при работе с электродами сравнения [9–17]. Были произведены измерения разности потенциалов для поверки электрода сравнения [18–20]. Использовали 2 хлорсеребряных электрода сравнения. Один выступил в роле эталонного, а второй в роли рабочего. Обработанные результаты исследования представлены на рисунке. Из полученных результатов мы сделали обоснование о стабильности и соразмерности измерений электродов сравнения на созданной установке. Исходя из того, что коэффициент вариации во всех случаях меньше 30%, обработанные данные можно использовать, и доверительный ряд считается положительным.



Динамика результатов испытаний электродов в период времени 23.09.2023–29.09.2023

Полученные результаты (рис.) находятся в доверительном интервале, т. к. разность потенциалов менее 20 мВ, что соответствует требованиям документов [2].

Из результатов проведенных исследований мы можем сделать заключение об эффективности работы лабораторного устройства для диагностирования протекторной защиты элементов СЭУ и электрохимической защиты корпуса судна. Полученные результаты диагностирования различных эталонных протекторов из сплавов: алюминия, магния и цинка соответствуют требованиям стандартов [1, 2], что свидетельствует о надежности устройства. Методика диагностирования разности потенциалов и номинала защитного тока демонстрируют стабильные и точные данные, при этом полученные результаты можно отнести к категории точных, т. к. коэффициент вариации испытуемых электродов сравнения менее 30%, что указывает на высокую точность измерений. Учитывая полученные результаты, установку рекомендуется использовать экипажам судов и кораблей для обеспечения надежного контроля и своевременной диагностики протекторной защиты судовых элементов, что способствует поддержанию долговечности и безопасности эксплуатации судна. Использование разработанного устройства экипажами судов целесообразно, т. к. не вызывает трудностей при эксплуатации устройства, а также за счет нетребовательности к условиям хранения.

### Литература

1. ГОСТ 9.056-75. Стальные корпуса кораблей и судов. Общие требования к электрохимической защите. Введ. 1976-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 20 с.
2. РЗК-НК-01. Руководство по защите корпусов наводных кораблей ВМФ от коррозии и обрастания. – М.: Военное изд-во, 2001. – 258 с.
3. Пат. 2685459 Установка для испытаний электродов сравнения в морских условиях: Российская Федерация, МПК G01N 17/02, C23F 13/16 / А.Ю. Копысов, В.Ю. Корзинин, А.В. Гончаров, А.В. Валюшок, А.В. Замятин; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Транснефть» (ПАО «Транснефть») (RU); Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть») (RU). – № 2017136074; заяв. 11.10.20217; опубл. 18.04.2018.
4. Пат. 169581 Устройство для контроля протекторной защиты стальных корпусов кораблей и судов: Российская Федерация, МПК G01N 17/02 / В.А. Швецов, О.А. Белов, Д.В. Шунькин, О.А. Белавина, С.П. Лысянский, В.В. Адельшина; заявитель и патентообладатели: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Камчатский государственный технический университет; RU 169581 U1; заяв. 04.10.2016; опубл. 23.03.2017.
5. Белов О.А., Швецов В.А., Ястребов Д.П. Обоснование оптимальной периодичности контроля работы протекторной защиты стальных корпусов судов // Эксплуатация морского транспорта. – Новороссийск, 2017. – № 1(82). – С. 41–48.
6. Внедрение усовершенствованного способа контроля систем протекторной защиты стальных корпусов судов камчатского флота / О.А. Белов, В.А. Швецов, Д.П. Ястребов, О.А. Белавина, Д.В. Шунькин // Вестник Камчатского государственного технического университета. Петропавловск-Камчатский, 2017. – Вып. 39. – С. 6–11.
7. Обоснование возможности исключения внешнего осмотра систем протекторной защиты стальных корпусов судов / В.А. Швецов, О.А. Белов, О.А. Белавина, Д.П. Ястребов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – Астрахань, 2017. – Вып. 1. – С. 29–38.
8. Ястребов Д.П., Швецов В.А., Рогожников А.О. К вопросу оптимизации контроля работы протекторной защиты стальных корпусов морских судов // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы XIII Нац. (всерос.) науч.-практ. конф. (29–30 марта 2022 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 159–163.
9. К вопросу использования цинковых электродов для контроля протекторной защиты судов и кораблей / Д.П. Ястребов, Д.В. Шунькин, А.О. Рогожников, Г.В. Кузнецов // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2021. – Вып. 2. – С. 16–23.
10. К вопросу использования стальных пластин для контроля протекторной защиты корпусов судов и кораблей / Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, О.А. Белавина, С.А. Зайцев //

Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития Материалы Второй междунар. науч.-практ. конф. (23–25 октября 2019 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2020. – С. 125–129.

11. К вопросу использования электродов из судокорпусной стали для контроля защищенности от коррозии корпусов судов и кораблей / Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, Б.В. Тарабанов, С.А. Зайцев // Вестник Астраханского государственного технического университета. – № 2. – 2020. – С. 15–21.

12. К вопросу использования алюминиевых электродов для контроля защищенности от коррозии стальных корпусов судов и кораблей / Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.П. Ушакевич, Г.В. Кузнецов, Б.В. Тарабанов // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2021. – Вып. 3. – С. 23–32.

13. Ястребов Д.П. К вопросу использования медных электродов для контроля защищенности от коррозии стальных корпусов судов и кораблей // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2021. – Вып. 4. – С. 43–51.

14. Ястребов Д.П. К вопросу изготовления цинковых электродов сравнения для морских судов и кораблей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. – 2022. – № 4. – С. 38–46.

15. Shunkin D.V., Yastrebov D.P., Belov O.A. et al. On the issue of using control electrodes for the marine vessel protectors technical diagnostics // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. – 2023. – № 4. – С. 17–24.

16. К вопросу развития стандартных электродов сравнения и перспективы их использования для контроля протекторной защиты морских судов и кораблей / Д.П. Ястребов, В.А. Швецов, Ю.В. Крутень, П.Г. Калинин // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (9–10 ноября 2023 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2024. – С. 28–33.

17. Ястребов Д.П., Белов О.А. Обоснование возможности использования нестандартных электродов сравнения при оценке антикоррозионной защиты морских инженерных сооружений // Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации: Материалы VI Нац. науч.-техн. конф. – Владивосток: Дальневосточный гос. техн. рыбохоз. ун-т, 2023. – С. 381–387.

18. О выборе электродов для контроля систем протекторной защиты стальных судов и кораблей / Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, О.А. Белавина // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2019. – Вып. 4. – С. 39–45.

19. О целесообразности использования хлорсеребряных электродов для контроля систем протекторной защиты стального корпуса судна / Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.П. Ушакевич, Г.В. Кузнецов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Второй междунар. науч.-практ. конф. (23–25 октября 2019 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2020. – С. 121–124.

20. К вопросу проверки потенциала судовых хлорсеребряных электродов сравнения / О.А. Белов, Д.П. Ястребов, В.А. Швецов, Б.В. Рыбалка // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Шестой нац. (всерос.) науч.-техн. конф. (9–10 ноября 2023 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2024. – С. 4–8.

УДК 621.914.3

**Д.П. Ястребов, П.Б. Терновский**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: petnarik.ruboy@gmail.com*

**К ВОПРОСУ МОДЕРНИЗАЦИИ УСТАРЕВШЕГО  
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ПОД СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ**

Современные производственные процессы требуют эффективного использования ресурсов и рационального подхода к управлению оборудованием. Для металлообработки на промышленных предприятиях используется обширный парк станков различных типов. Многие из них являются устаревшими и требуют современной технологической переработки. В рамках данного исследования рассмотрены преимущества модернизации старого металлообрабатывающего оборудования внедрением числового программного управления. Результаты исследования могут стать практически полезными для предприятий, занимающихся металлообработкой, которые могут использовать эти знания для повышения эффективности использования оборудования и оптимизации производственных процессов.

**Ключевые слова:** модернизация, числовое программное управление, металлообрабатывающее оборудование, промышленность.

**D.P. Yastrebov, P.B. Ternovsky**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: petnarik.ruboy@gmail.com*

**ON THE ISSUE OF MODERNIZING OBSOLETE METAL-WORKING EQUIPMENT  
TO MODERN TECHNOLOGICAL TASKS**

Modern manufacturing processes require efficient use of resources and rational approach to equipment management. Industrial enterprises use a large fleet of different types of machines for metalworking. Many of them are outdated and require modern technological processing. This study examines the advantages of upgrading old metalworking equipment by implementing numerical control. The results of the study can be of practical use to metalworking enterprises, which can use this knowledge to improve the efficiency of equipment use and optimize production processes.

**Key words:** modernization, numerical control, metalworking equipment, industry.

На сегодняшний день средний возраст металлообрабатывающего оборудования в Камчатском крае составляет более 25 лет. Очевидно, что такое оборудование во многом уступает современному. Выходом для предприятий может послужить замена старого оборудования на новое, но высока вероятность того, что новое оборудование будет долго окупаться и не позволит существенно увеличить прибыль. Данный проект в первую очередь заключается в предоставлении экономически выгодной альтернативы покупке нового дорогостоящего оборудования [1–3].

Целью данного исследования является рассмотрение использования модернизации устаревшего металлообрабатывающего оборудования под современные технологические задачи как одного из экономически обоснованных решений, альтернативных покупке нового дорогостоящего оборудования.

### Исследование потенциала модернизации станков без ЧПУ

В последние годы наблюдается массовое внедрение систем управления ЧПУ в металлообрабатывающей промышленности [4]. Это связано с необходимостью повышения производительности и точности обработки, а также с возможностью автоматизации процесса производства. Однако многие производственные предприятия все еще используют старое оборудование без системы ЧПУ [5].

Ситуация с модернизацией старого металлообрабатывающего оборудования с внедрением ЧПУ в России является крайне актуальной. Согласно статистическим данным, предоставленным на портале машиностроения, только 15–20% предприятий металлообрабатывающей промышленности в России используют станки с системой ЧПУ [4].

Однако потенциал модернизации старого оборудования в России высок. Старое оборудование на предприятиях металлообработки находится в эксплуатации долгое время и не всегда может быть заменено на новое. При этом старое оборудование имеет определенные преимущества, такие как большая жесткость и точность. Установка системы ЧПУ на старые станки позволяет сохранить эти преимущества и увеличить производительность на 30–40% [5].

Наибольший потенциал для модернизации старого оборудования с внедрением ЧПУ имеют малые и средние предприятия металлообрабатывающей промышленности в России. Такие предприятия зачастую не могут позволить себе приобретение нового оборудования.

Исследование потенциала модернизации металлообрабатывающего оборудования без ЧПУ показало, что модернизация позволяет значительно повысить эффективность и точность обработки, снизить затраты и увеличить гибкость производства [6]. Был произведен анализ рынка существующего оборудования, показавший, что чаще всего менее затратная модернизация является более оптимальным решением, чем замена старых агрегатов новыми. Расчет экономического эффекта приведен на рисунке.

- **Экономический эффект от участия в проекте будет составлять от 2,5 млн. при модернизации станка типа 6P10 по сравнению с покупкой нового станка.**

Наименование	Стоимость, руб.
Закупка оборудования	275 000
Монтаж	29 000
Отладка	26 000
Доставка	20 000
<b>Итого</b>	<b>350 000</b>

Наименование	Стоимость, руб.
Покупка станка	От 2 700 000
Монтаж	15 000
Доставка	200 000
<b>Итого</b>	<b>От 2 865 000</b>

Модернизация вертикально-фрезерного станка 6P10, 6P12 или аналогичного с внедрением числового программного управления.

Закупка нового вертикально-фрезерного станка с внедренным числовым программным управлением.

Расчет экономического эффекта от модернизации ЧПУ

Вопрос модернизации устаревшего металлообрабатывающего оборудования под современные технологические задачи является перспективным направлением, а разработанный алгоритм модернизации ЧПУ под устаревшее металлообрабатывающее оборудование будет являться экономически обоснованным решением [7, 8], так как замена на новые металлообрабатывающие станки вызовет большие финансовые расходы. Результаты исследования могут стать практически полезными для предприятий, занимающихся металлообработкой, которые могут использовать эти знания для повышения эффективности использования оборудования и оптимизации производственных процессов.

### Литература

1. Белов О.А., Парфенкин А.И. Обзор основных факторов снижения безопасности сложных технических систем // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2015. – № 35. – С. 11.
2. Белов О.А. Анализ современных диагностических средств в системах электроснабжения // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2013. – № 26. – С. 5–8.
3. Белов О.А. Интегрированные системы технической диагностики электроустановок // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2013. – № 25. – С. 5– 8.
4. Станкостроение в России: состояние, тенденции, перспективы // Портал машиностроения [Электронный ресурс]. – URL: [https://mashportal.ru/analytics/machinery\\_russia-15488.aspx](https://mashportal.ru/analytics/machinery_russia-15488.aspx) (дата обращения: 30.09.2024).
5. Платонов В.В., Майзель И.Г. Модернизация металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – С. 285– 295.
6. Сергеев Д.Н. Модернизация металлообрабатывающих станков для повышения их эффективности // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Технические науки и технологии». – 2016. – 87 с.
7. Ещенко Д.В., Белов О.А., Никитин А.Т. Практическое применение методов тепловизионного анализа и контроля // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2020. – № 54. – С. 6– 19.
8. Пантина А.И., Белов О.А. Перспективы методики инфракрасной диагностики силовых трансформаторов // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Восьмой всерос. науч.-практ. конф. (23–25 мая 2017 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2017. – С. 102–104.

УДК 621.914.3

**Д.П. Ястребов, П.Б. Терновский, С.П. Лысянский**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: petnarik.ruboy@gmail.com*

**К ВОПРОСУ СБОРКИ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ  
И АДАПТАЦИИ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ  
ПОД ВОЗМОЖНОСТИ ПЛАТЫ УПРАВЛЕНИЯ,  
ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В УСТРОЙСТВЕ ЧПУ СТАНКА**

Современные стандарты производства устанавливают высокие требования к точности и эффективности обработки материалов, что делает актуальным вопрос модернизации устаревшего металлообрабатывающего оборудования. Внедрение систем числового программного управления в строение старого металлообрабатывающего оборудования является наиболее эффективным и экономичным способом увеличения производственных мощностей и качества выпускаемой продукции на предприятиях, имеющих в эксплуатации устаревшее металлообрабатывающее оборудование. В данной статье рассмотрен процесс разработки структурной схемы модернизации, особое внимание было уделено вопросу адаптации структурной схемы под возможности платы управления StepMaster ver 2.5. В ходе исследования была подтверждена работоспособность разработанной структурной схемы управления на основе платы управления StepMaster ver 2.5, что позволяет в будущем внедрить новые компоненты в структурную схему и оптимизировать их работу. Правильная настройка программного обеспечения и аппаратной части необходима для достижения максимально возможной точности обработки и надежности работы оборудования.

**Ключевые слова:** модернизация, числовое программное управление, металлообрабатывающее оборудование, промышленность, плата управления.

**D.P. Yastrebov, P.B. Ternovsky, S.P. Lysyansky**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: petnarik.ruboy@gmail.com*

**ON THE ISSUE OF HARDWARE ASSEMBLY  
AND STRUCTURAL DIAGRAM ADAPTATION TO CONTROL BOARD CAPABILITIES  
USED IN THE CNC MACHINE DEVICE**

Modern production standards set high requirements for the accuracy and efficiency of material processing, which makes the issue of upgrading obsolete metalworking equipment relevant. The introduction of numerical control systems into the structure of old metalworking equipment is the most effective and cost-effective way to increase production capacity and the quality of manufactured products at enterprises operating obsolete metalworking equipment. This article discusses the process of developing a structural diagram of modernization, with special attention paid to the issue of adapting the structural diagram to the capabilities of the StepMaster ver 2.5 control board. The study confirmed the operability of the developed structural control diagram based on the StepMaster ver 2.5 control board, which allows in the future to introduce new components into the structural diagram and optimize their operation. Correct configuration of software and hardware is necessary to achieve the highest possible processing accuracy and reliability of equipment operation.

**Key words:** modernization, numerical control, metalworking equipment, industry, control board.

Тема модернизации металлообрабатывающего оборудования с внедрением ЧПУ (числового программного управления) представляет собой перспективное направление в современной металлообрабатывающей промышленности. С развитием технологий, повышением требований к качеству и производительности оборудования, а также увеличением конкуренции необходи-



мость обновления устаревшего металлообрабатывающего оборудования становится все более актуальной. В данной статье рассмотрен процесс разработки структурной схемы модернизации устаревшего металлообрабатывающего оборудования с внедрением числового программного управления и дальнейшей ее адаптацией под возможности платы управления, которая будет использоваться в устройстве числового программного управления станка

### Разработка структурной схемы модернизации металлообрабатывающего оборудования с внедрением числового программного управления

Важно при разработке структурной схемы модернизации, приведенной на рис. 1, учитывать все конструкционные особенности станка и возможность внедрения новой системой управления.

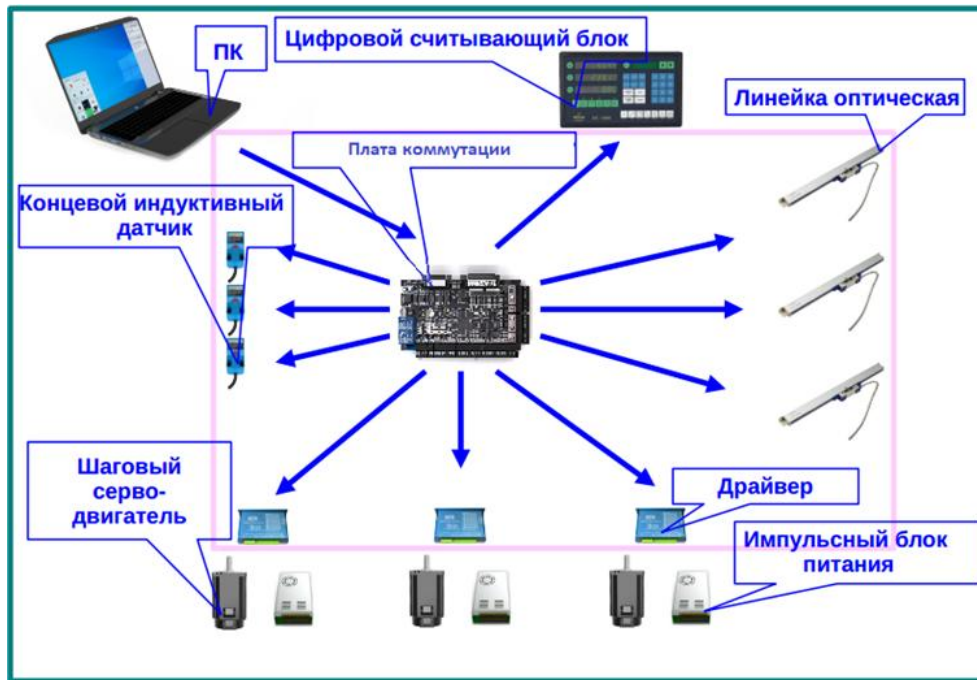


Рис. 1. Структурная схема модернизации металлообрабатывающего станка

На рис. 1 приведена структурная схема модернизации металлообрабатывающего оборудования. ПК является основным компонентом для создания удобного интерфейса между оператором станка и системой управления. С помощью специального программного обеспечения, установленного на ПК, оператор способен писать и редактировать программы управления для станка. После создания программы на ПК ее нужно загрузить в систему управления станком. В основном это делается через USB-накопители или с помощью сети. ПК позволяет регулировать процесс обработки, отображая значения параметров в реальном времени, такие как скорость, координаты точек, глубина реза и т. д. Оператор также способен мониторить и анализировать данные обработки. Корректировка параметров станка может производиться посредством специального ПО на ПК. Оператор может манипулировать скоростью и силой резки, корректировать параметры оборудования. ПК также может применяться для диагностики и настройки системы управления, поиска и устранения потенциальных проблем и ошибок, а также может обеспечить сбор данных об использовании станка, его производительности и КПД, которые после могут быть обработаны и использованы для оптимизации производственных процессов [1].

Коммутационная плата (также интерфейсная плата, плата управления) – главный компонент системы числового программного управления металлообрабатывающего оборудования, выполняющий функцию синхронизации взаимодействий между различными компонентами системы: датчиками, шаговыми двигателями, контроллерами и т. д. Коммутационная плата осуществляет роль «посредника» между различными типами сигналов, которые генерируются разнообразными компонентами управляющей системы. Например, она может принимать от датчиков положения аналоговые сигналы и конвертировать их в числовые значения, которые могут быть прочитаны и обработаны контроллером [1].

Устройство цифровой индикации (УЦИ) в системах числового программного управления металлообрабатывающего оборудования применяется, чтобы измерить координаты и переместить рабочий стол станка по заданной программе. УЦИ позволяет сократить время на ручные измерения и перемещения, минимизирует человеческий фактор и обеспечивает точность и надежность обработки деталей. УЦИ может быть использовано как независимая система измерения или как часть системы числового программного управления [1]. Общая функция оптических линеек в системах ЧПУ металлообрабатывающего оборудования – обеспечить максимальную корректность и КПД алгоритма обработки металла.

Концевые индуктивные датчики в системах ЧПУ применяются, чтобы определить крайние положения рабочего стола или шпинделя станка.

Шаговые серводвигатели в системах ЧПУ металлообрабатывающего оборудования используются для точного перемещения фрезерного станка в необходимое положение по конкретной траектории, заданной в программах станка [1].

Драйверы дают возможность управлять процессом изменения положения шаговых двигателей, контролируя скорость, момент и направление вращения.

Они обеспечивают правильный сигнал напряжения и тока, необходимый для работы моторов, и обеспечивают соответствующую мощность для работы серводвигателей [1].

Импульсные блоки питания в системах числового программного управления металлообрабатывающего оборудования служат для обеспечения энергией всех компонентов системы, включая шаговые серводвигатели и драйверы.

Необходимые компоненты для разработанной схемы модернизации в широком ассортименте доступны на рынке и приобретаются через специализированные интернет-магазины, дистрибьюторов и производителей.

#### **Адаптация структурной схемы под возможности платы управления, используемой в устройстве ЧПУ станка**

Плата управления в станках с ЧПУ является одним из наиболее важных компонентов, так как она представляет собой «мозг» станка [2]. Она отвечает за обработку и выполнение программ, разработанных для управления работой станка.

В качестве платы управления была выбрана плата StepMaster ver 2.5, которая представлена на рис. 2. Она обеспечивает точную и плавную координатную подачу обрабатываемой детали по заданным параметрам и возможность программного управления скоростью вращения шпинделя. Главными причинами использования этой платы управления в нашей системе ЧПУ являются: высокая стабильность работы станка за счет коррекции исходного сигнала управления, простота использования, широкий диапазон поддерживаемых скоростей, доступность, поддержка ПО NC studio, наличие цифрового фильтра, полностью устраняющего проблемы с потерями шагов и со смещениями координат.



*Рис. 2. Плата управления StepMaster ver 2.5*

Плата StepMaster ver 2.5, приведенная на рис. 2, обрабатывает последовательность поступающих импульсов STEP для каждой из осей по особому алгоритму и регенерирует их на выход, сглаживая изменение частоты сигнала. Также в зависимости от выбранных настроек на каждый полученный на вход 1 импульс шага фильтр может генерировать на выходе от 1 до 16 импульсов. Графики работы фильтров сигналов показаны на рис. 3.



Рис. 3. Графики работы фильтров

Для адаптации структурной схемы модернизации под возможности платы управления StepMaster ver 2.5 следует выполнить ряд действий:

1. Подключить шаговые двигатели к плате управления.
2. Установить и настроить программное обеспечение. Программное обеспечение (ПО) для ЧПУ станков – это основа автоматизации производственных процессов. Оно предназначено для управления станком, управления движением осей, обработки материалов и выполнения других функций [3]. Для работы с ЧПУ необходимо установить и настроить ПО NC Studio на ПК.
3. Настроить параметры работы двигателей на плате управления, чтобы обеспечить высокую точность и качество обработки деталей.
4. После выполнения всех настроек и подключений следует провести тестирование системы, чтобы убедиться в ее корректной работе в соответствии с заданными параметрами.
5. При необходимости выполнить дополнительную настройку параметров работы системы управления под свои потребности.

Модернизация устаревшего металлообрабатывающего оборудования с внедрением числового программного управления является перспективным направлением в промышленности, так как предлагает экономически выгодную альтернативу покупке нового дорогостоящего оборудования на предприятиях, позволяющую автоматизировать процесс обработки, увеличить качество и количество выпускаемой продукции в рамках ограниченного бюджета. Приведенное в статье исследование подтвердило работоспособность разработанной структурной схемы на основе платы управления StepMaster ver 2.5, которая в состоянии обеспечить наиболее оптимальное взаимодействие всех компонентов системы.

Также мы убедились, что правильная настройка программного обеспечения и аппаратной части существенно увеличивает точность и надежность оборудования, что в свою очередь снизит количество бракованных изделий и поспособствует увеличению прибыли.

### Литература

1. Кличков В.А., Панферов А.Э. Модернизация оборудования с ЧПУ: современные подходы и технологии. Станочные технологии и современное оборудование. – 2019. – С. 36–39.
2. Платонов В.В., Майзель И.Г. Модернизация металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – С. 285–295.
3. Сергеев Д.Н. Модернизация металлообрабатывающих станков для повышения их эффективности // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Технические науки и технологии». – 2016. – 87 с.

## СЕКЦИЯ 2. ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ, ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ И ГУМАНИТАРНЫХ НАУК

УДК 004.94:62-251

**П.А. Андриюхина, А.В. Морковин, О.С. Портнова**

*Дальневосточный федеральный университет,  
Владивосток, 690922  
e-mail: andriukhina.pa@dvfu.ru*

### ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ПРОВЕРКИ АЛГОРИТМА БАЛАНСИРОВКИ ПО МЕТОДУ ДКВ

В статье представлены результаты эксперимента, проведенного на лабораторном стенде, моделирующего двухопорный ротор. С помощью цифровой модели стенда произведена проверка метода балансировки по динамическим коэффициентам влияния.

**Ключевые слова:** балансировка, ротор, динамический коэффициент влияния, цифровой двойник.

**P.A. Andryukhina, A.V. Morkovin, O.S. Portnova**

*Far Eastern Federal University,  
Vladivostok, 690922  
e-mail: andriukhina.pa@dvfu.ru*

### DIGITAL TWIN APPLICATION TO CHECK BALANCING ALGORITHM ACCORDING TO DIC METHOD

The results of experiment conducted on a laboratory bench simulating a two-support rotor are presented. A digital model of the stand to verify the balancing method based on dynamic influence coefficients was used.

**Key words:** balancing, rotor, dynamic influence coefficient, digital twin.

Балансировка роторного оборудования является одним из методов наладки, позволяющим снизить повышенную вибрацию машин, возникающую из-за механических повреждений в период эксплуатации роторов [1].

Существующие методы классической балансировки дают возможность привести роторную машину в равновесное положение минимум за три ее пуска [2]. Однако основная цель исследования заключается в разработке метода, способного снизить количество пусков до наименьшего значения.

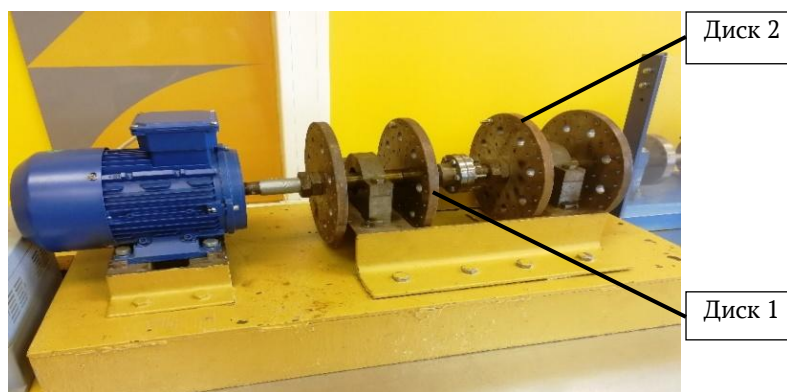
В данной работе производится проверка балансировки цифрового двойника двухопорного ротора (рисунок) с применением динамического коэффициента влияния (ДКВ) – коэффициента пропорциональности между вектором влияния и пробной массой.

Цифровой двойник – виртуальный прототип реального объекта, учитывающий все его характеристики. Применение двойника позволяет произвести эксперимент в цифровой среде без использования самой установки и ее многочисленных пусков [3].

Методика цифрового эксперимента предполагает три основных этапа:

1. Моделирование:
  - создание трехмерной модели идеальной геометрии;
  - задание граничных условий;
  - вывод результатов.

2. Эксперимент:
  - проведение физического эксперимента для получения цифровой модели адекватной реальной установке;
  - правка цифровой модели по результатам физического эксперимента.
3. Прогнозирование:
  - расчет с подстановкой пробных масс;
  - оптимизация по методу ДКВ;
  - балансировка.



Лабораторный стенд

Прогнозирование результатов осуществляется с помощью программы расчета, основанной на математической модели, представленной в [4].

Экспериментальная часть исследования проводилась с известными дисбалансами массой 20 г и 30 г, установленными на угол 0 град и 45 град соответственно на первый и второй диски.

В качестве пробного груза на первый диск устанавливалась масса 10 г на угол 90 град, на второй диск – 15 г на угол 45 град.

С помощью программы расчета определяем значения ДКВ и по полученным данным проводим оптимизацию параметров.

Результаты эксперимента представлены в таблице.

Результаты эксперимента

№ пуска	Положение грузов				Вибрация			
	ДИСК 1		ДИСК 2		Опора 1		Опора 2	
	$m_1$ г	угол1 °	$m_2$ г	угол2 °	A1 мкм	$\varphi_1$ °	A2 мкм	$\varphi_2$ °
1	-	-	-	-	67,07	117,6	79,83	118,8
2	10	90			74,69	127,3	88,49	127,8
3			15	30	88,98	118,2	107,0	119,1
4	19,27	129,1	44,69	229,6	<b>1,57</b>	<b>175,1</b>	<b>1,57</b>	<b>301</b>

*Примечание:*  $m_1$  – масса установки груза на первый диск, г;  $m_2$  – масса установки груза на второй диск, г; угол1 – угол установки груза на первый диск, град; угол2 – угол установки груза на второй диск, град; A1 – амплитуда вибрации на первой опоре, мкм; A2 – амплитуда вибрации на второй опоре, мкм;  $\varphi_1$  – фаза вибрации на первой опоре, град;  $\varphi_2$  – фаза вибрации на второй опоре, град.

Измерения амплитуды и фазы вибрации проводились в горизонтальном направлении, поскольку в этом направлении значения амплитуды вибрации наибольшие.

В результате оптимизации программа показала, что для приведения установки в положение равновесия необходимо установить грузы массой  $m_1 = 19,27$  г на угол1 = 129,1 град на первый диск и  $m_2 = 44,69$  г на угол2 = 229,6 град на второй диск.

Полученные итоговые значения вибрации после цифровой балансировки по методу ДКВ свидетельствуют о корректности результатов, а соответствие физическому эксперименту доказывает точность проведенной балансировки.



Применение цифрового двойника в балансировочных расчетах позволяет сократить количество пробных пусков реального объекта до минимума, снизить затраты на его ремонт и обслуживание, а также спрогнозировать поведение машины при наличии различных дефектов и дать качественное заключение о ее техническом состоянии.

#### Литература

1. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (председатель). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова, 1981. – 456 с.
2. *Шепетильников А.В.* Балансировка машин и приборов. – М.: Машиностроение, 1979. – 294 с.
3. *Барков А.В., Баркова Н.А.* Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: Учеб. пособие. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2004. – 152 с.
4. *Гольдин А.С.* Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.

УДК 004

**В.Р. Архипов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: vlad05slava03@gmail.com*

## **СРАВНЕНИЕ ПОПУЛЯРНЫХ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ API**

Данная статья посвящена сравнению популярных API, которые используются при создании геоинформационных систем. В статье представлены основные функции интерфейсов программирования приложений и их примерные тарифы.

**Ключевые слова:** геоинформационная система, ГИС, Google Maps API, Mapbox API, OpenStreetMap API, API Яндекс.Карты.

**V.R. Arkhipov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: vlad05slava03@gmail.com*

## **COMPARISON OF POPULAR MAPPING API**

The comparison of popular APIs that are used in the creation of geographic information systems is analyzed. The main functions of software application interfaces and their approximate prices are presented.

**Key words:** geoinformation system, GIS, Google Maps API, Mapbox API, OpenStreetMap API, API Яндекс.Карты.

При выборе API для создания своей геоинформационной системы приходится сталкиваться с многообразием выбора доступных вариантов реализации. Для упрощения выбора и систематизации информации было решено провести сравнение популярных решений в данной области и выделить основные преимущества и недостатки существующих API.

### **Google Maps API [1]**

*Функционал:*

– Отображение карт: поддержка различных слоев карт (спутниковые, рельефные, гибридные и др.).

– Геокодирование: получение координат по адресу и наоборот.

– Маршрутизация: расчет маршрутов с учетом трафика.

– Панорамы: доступ к панорамным снимкам улиц.

– Информация о местах: информация о ресторанах, отелях, магазинах и других объектах.

– API для мобильных приложений: Поддержка Android и IOS.

*Стоимость:*

– Бесплатный тариф: услуги стоимостью до \$200 в месяц (примерно 28 000 запросов к карте или 40 000 запросов на геокодирование).

– Платные тарифы: после превышения лимита услуги предоставляются по специальным тарифам. Например, \$7 за 1 000 запросов к карте или \$5 за 1 000 запросов на геокодирование.

### **Mapbox API [2]**

*Функционал:*

– Кастомизация карт: возможность создавать собственные стили отображения карт с помощью Mapbox Studio.

– 3D-карты: поддержка трехмерных моделей зданий и рельефа.

– Геокодирование и маршрутизация: аналогичные функции, как у Google Maps, но с возможностью настройки параметров маршрута.

– Интерактивные карты: поддержка различных взаимодействий с картами (например, выделение объектов).

– API для мобильных приложений: поддержка Android и IOS.

*Стоимость:*

– Бесплатный тариф: до 25 000 запросов в месяц для мобильных приложений и до 50 000 запросов для Web на загрузку карты.

– Платные тарифы: после превышения лимита стоимость начинается от \$5 за 1 000 запросов (в зависимости от количества предоставляются скидки).

### **OpenStreetMap API [3]**

*Функционал:*

– Свободное распространение: доступ к данным карт без ограничений. Пользователи могут использовать данные для создания собственных карт.

– Кастомизация: возможность создавать карты с использованием данных OSM на собственных серверах или через сторонние сервисы.

– Сообщество: активное сообщество разработчиков, которое постоянно обновляет и улучшает данные.

*Стоимость:*

– Бесплатный доступ: нет тарифных ограничений на использование данных OSM.

Однако при их использовании необходимо ссылаться на OSM и его участников.

### **API Яндекс.Карты [4]**

*Функционал:*

– Подробные карты СНГ: высокое качество данных и детализация карт в этих регионах.

– Геокодирование и маршрутизация: аналогичные функции, как у Google Maps.

– Панорамы: доступ к панорамным снимкам улиц.

– Информация о местах: информация о ресторанах, отелях, магазинах и других объектах.

– API для мобильных приложений: поддержка Android и IOS.

*Стоимость:*

– Бесплатный тариф: до 25 000 запросов к карте в сутки (включая 1 000 запросов на геокодирование). Превышение ограничений за дополнительную плату не предусмотрено.

– Платные тарифы: предоставляет широкий выбор тарифов, начиная от 150 000 рублей в год за 1000 запросов в сутки.

Сравнительные характеристики рассмотренных API представлены в таблице.

**Сравнительные характеристики**

Параметр	Google Maps API	Mapbox API	OpenStreetMap API	Yandex Maps API
Отображение карт	Детализированные карты	Настраиваемые карты с возможностью изменения стиля	Открытые векторные карты, которые можно настраивать	Детализированные карты
Геокодирование	Полная поддержка геокодирования	Полная поддержка геокодирования	Геокодирование через сторонние решения	Полная поддержка геокодирования
Маршрутизация	Оптимизация маршрутов с учетом трафика	Оптимизация маршрутов с учетом трафика	Маршрутизация через сторонние решения	Оптимизация маршрутов с учетом трафика
Кастомизация	Ограниченные возможности кастомизации стилей карт	Широкие возможности кастомизации внешнего вида карт	Кастомизация возможна через использование собственных стилей	Ограниченные возможности кастомизации стилей карт
Спутниковые карты	Доступны спутниковые изображения высокого разрешения	Спутниковые изображения доступны, но могут быть менее детализированными	Доступны через сторонние решения	Доступны спутниковые изображения высокого разрешения
Панорамы	Доступны	Доступны через сторонние решения	Отсутствуют	Доступны



Параметр	Google Maps API	Mapbox API	OpenStreetMap API	Yandex Maps API
Бесплатный тариф	\$200 в месяц на использование (28 000 запросов в месяц)	50 000 запросов в месяц (Web)	Нет ограничений	25 000 запросов в сутки
Платный тариф	Плата за превышение лимитов (\$7 за 1 000 запросов)	Платные тарифы зависят от объема использования и начинаются от \$5 за 1 000 запросов	Отсутствует	Широкий выбор тарифов (от 150 000 руб. в год за 1 000 запросов в сутки)

Выбор API для картографии зависит от потребностей конкретного проекта:

- Google Maps API подходит для международных решений с высоким уровнем детализации и интеграции с другими сервисами Google.
- Mapbox API лучше всего подойдет для проектов, где важна быстрая и простая кастомизация карт.
- OpenStreetMap API – вариант для бесплатного решения без ограничений на использование данных.
- Яндекс.Карты API подходит для проектов, ориентированных преимущественно на Россию и страны СНГ из-за детализированных карт данных регионов.

Каждый из представленных сервисов имеет свои преимущества, которые и определяют выбор конкретного API для решения поставленных задач.

#### Литература

1. Google Maps Platform. – URL: <https://mapsplatform.google.com/intl/ru/> (дата обращения: 17.09.2024).
2. Mapbox. – URL: <https://www.mapbox.com/> (дата обращения: 17.09.2024).
3. OpenStreetMapWiki. – URL: [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main\\_Page](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page) (дата обращения: 17.09.2024).
4. API Яндекс Карты. – URL: <https://yandex.ru/maps-api/> (дата обращения: 17.09.2024).

УДК 629.584

**А.А. Бурденков<sup>1</sup>, П.А. Замятин<sup>2</sup>, Е.В. Поганов<sup>1</sup>, Е.Е. Тимошенко<sup>1</sup>, А.А. Юдов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Национальный-исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, 115409;*

<sup>2</sup> *ООО «Научно-производственный центр беспилотных  
авиационных систем и робототехнических комплексов»,  
Ковров, 601910  
e-mail: po.egor.07@mail.ru*

### **ПРОЕКТ СОЗДАНИЯ ПОДВОДНОГО ДРОНА**

Рассмотрены вопросы создания подводного дрона в рамках работы студенческого научного общества НИЯУ МИФИ. Показаны основные технические решения, использованные при реализации описываемого проекта.

**Ключевые слова:** подводный дрон, AUV, UUV, ROV.

**A.A. Burdenkov<sup>1</sup>, P.A. Zamyatin<sup>2</sup>, E.V. Poganov<sup>1</sup>, E.E. Timoshenko<sup>1</sup>, A.A. Yudov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, 115409;*

<sup>2</sup> *Research and Production Center for Unmanned Aircraft Systems and Robotic Complexes Ltd,  
Kovrov, 601910  
e-mail: po.egor.07@mail.ru*

### **THE PROJECT OF CREATING AN UNDERWATER DRONE**

The issues of creating an underwater drone within the framework of the work of the student scientific society of the National Research University MEPHI are considered. The main technical solutions used in the implementation of the described project are shown.

**Key words:** underwater drone, AUV, UUV, ROV.

В последнее время в мире все более развивается направление робототехнических комплексов, в том числе подводных дронов.

Основные принятые международные обозначения для подводных дронов:

- AUV – Autonomous Underwater Vehicle;
- UUV – Unmanned Underwater Vehicles;
- ROV – Remotely Operated Vehicle.

По данным аналитиков из агентства Market.US (рис. 1), состояние и перспективы рынка характеризуются следующим образом:

- в 2022 г. объем мирового рынка подводных дронов оценивался в \$3,9 млрд;
- в 2026 г. объем рынка по прогнозу достигнет \$6,4 млрд;
- к 2032 г. ожидается увеличение объема рынка до \$12,2 млрд;
- среднегодовой темп роста на этом рынке составляет 12,4 %.

Аналитики считают, что рост спроса на подводные беспилотники будет наблюдаться, прежде всего, со стороны нефтегазовых компаний, которые используют их для поисково-разведочных работ на глубоководных скважинах. Еще одним востребованным направлением являются работы по картографированию морского дна. Востребованы и научные исследования, а также оборонные цели.

Больше всего на рынке представлены подводные дроны тяжелого промышленного класса – 38%, и чаще всего это аппараты имеют дистанционное управление. Очевидно, что в обозримом будущем будет расти сегмент автономных подводных дронов.

Следует отметить, что, если на рынке беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) доминируют азиатские компании (прежде всего – китайские), то на рынке подводных дронов первенство принадлежит Северной Америке. В этом сегменте главенствуют европейские и американские компании: Blueye Robotics, Deep Ocean Engineering Inc, Kongsberg Gruppen ASA, Lockheed Martin Corporation, Oceaneering International Inc, Saab Seaeye Limited, Teledyne Marine, The Boeing Company.

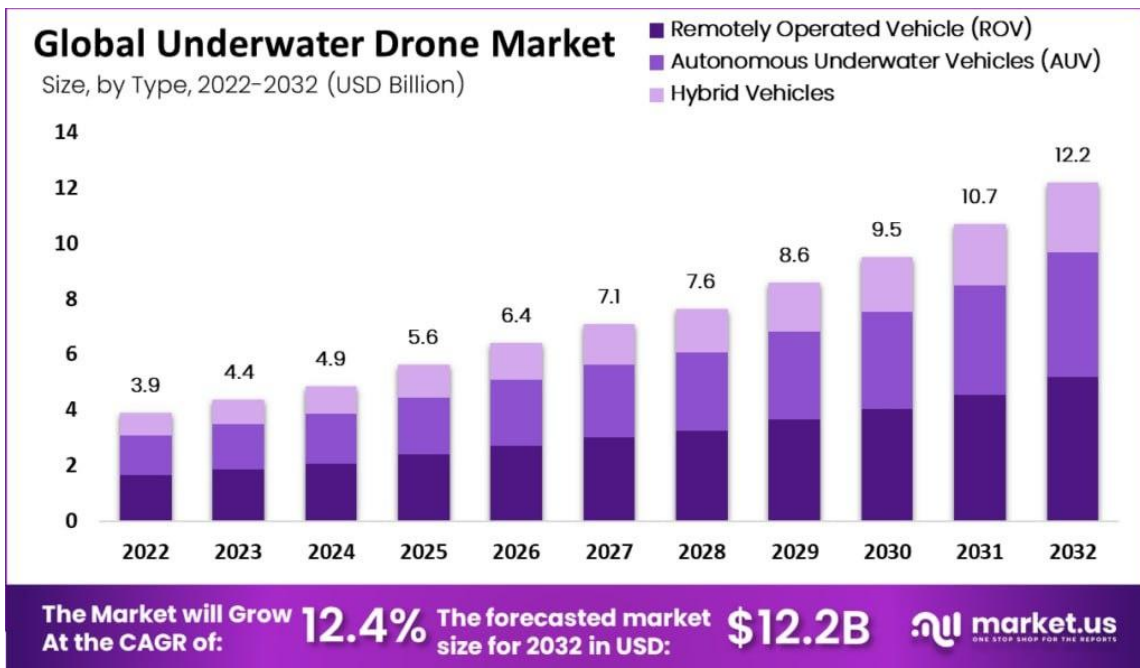


Рис. 1. Прогноз рынка подводных дронов

### Существующие решения

В настоящее время на мировом рынке представлено значительное число подводных дронов различной функциональности [1–3]. При анализе существующих решений основное внимание было сосредоточено на аппаратах, имеющих неподвижные двигательные установки. Среди моделей начального уровня были выделены широко распространенные и прекрасно зарекомендовавшие себя изделия QYSEA Fifish V6 (рис. 2) и Chasing M2 (рис. 3).



Рис. 2. Каплевидный дрон QYSEA Fifish V6



Рис. 3. Внешний вид подводного дрона Chasing M2

### Цель и задачи проекта

Целью проекта является создание беспилотного аппарата, способного перемещаться в воде и погружаться под воду. Аппарат должен обладать камерой и управляться дистанционно.

Для достижения цели предполагается решить следующие основные задачи:

- патентный поиск;
- анализ существующих решений и доступных комплектующих;
- определение компоновочной схемы дрона;
- выбор конструкционных материалов;
- поиск вариантов теплоотведения для тепловыделяющих компонентов (регуляторы оборотов, бортовой вычислитель и пр.);
- формирование перечня основных составных частей дрона и подготовка схемы деления;
- подготовка сметы проекта;
- формирование начальной комплектации;
- создание силовой установки;
- создание системы управления;
- создание системы передачи данных от дрона к пункту управления;
- создание системы видеонаблюдения;
- разработка 3D-модели;
- изготовление основных деталей;
- сборка дрона;
- тестирование дрона;
- устранение замечаний (недоработок), выявленных на этапе тестирования;
- демонстрация возможностей дрона.

Отдельно рассматриваются вопросы кибербезопасности жизненного цикла [4].

### Предполагаемые к реализации в рамках проекта основные технологические решения

В качестве базовой компоновки создаваемого подводного дрона выбрана схема с шестью двигателями, обеспечивающая шесть степеней свободы (рис. 4).

Внешний вид и размеры используемых бесколлекторных двигателей показаны на рис. 5. Двигатели доступны к поставке на всех торговых площадках.

Для управления подводным дроном используются одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pi и бортовой контроллер Pixhawk (рис. 6 и 7).

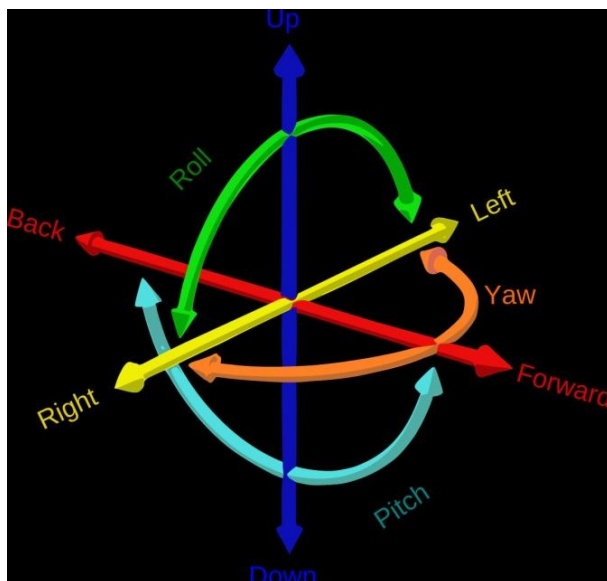


Рис. 4. Иллюстрация шести степеней свободы

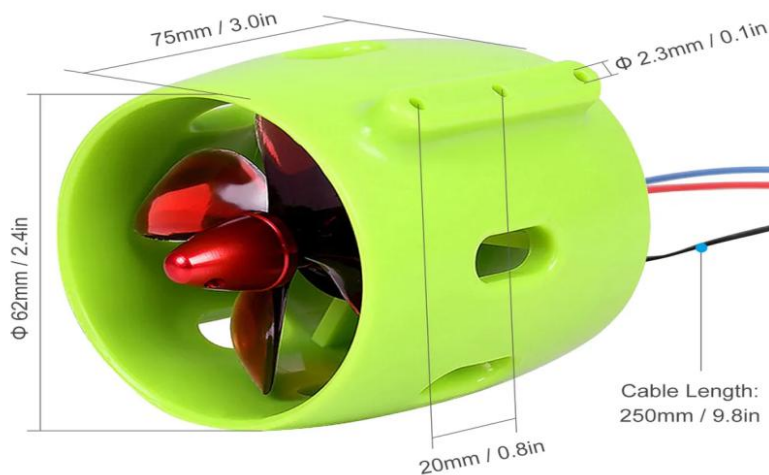


Рис. 5. Внешний вид и размеры двигателя для начальных экспериментов



Рис. 6. Микрокомпьютер для системы управления



Рис. 7. Бортовой контроллер для управления двигателями и получения информации от датчиков

При выполнении работ учитывается опыт ранее выполняемых в этом направлении исследований, в том числе работы специалистов Камчатского государственного технического университета [5–9].

Проект имеет значительный потенциал последующего развития. На стадии проектирования изначально закладываются широкие возможности по масштабированию решений и использованию вновь появляющихся перспективных технологий в области робототехники, информационных технологий и кибербезопасности.

После получения начальных результатов материалы будут использованы, в том числе в качестве научно-технического задела при участии в конкурсах на получение тематических грантов.

### Литература

1. ROBO-ROV 45 KG CLASS. Beijing: BoyaGongdao (Beijing) Robot Technology Co., Ltd, 2023. – 2 p.
2. Enterprise and Industrial-grade ROV Platform. Carry Out Deep-diving and Advanced Subsea Operations. – Shenzhen: Shenzhen QYSEA Tech Co. Ltd., 2022. – 6 p.
3. Chasing M2. Руководство пользователя. V 1.0. – 8 с.
4. Кибербезопасность жизненного цикла подводного дрона МИФИ [Электронный ресурс] // Кибербезопасность Z: Telegram-канал. – 23 октября 2024. – URL: [https://t.me/z\\_cybersec/1009](https://t.me/z_cybersec/1009) (дата обращения: 24.10.2024).
5. Змеев А.Д. Разработка подводного дрона с модульной конструкцией // Молодёжь. Наука. Инновации. – 2022. – Т. 1. – С. 427–432.
6. Змеев А.Д. Модификация подводного дрона модульной конструкции // Молодёжь. Наука. Инновации. – 2023. – Т. 1. – С. 622–626.
7. Змеев А.Д. Разработка пульта управления подводного дрона модульной конструкции // Молодёжь. Наука. Инновации. – 2024. – Т. 1. – С. 502–506.
8. Разработка и организация испытаний подводного дрона модульной конструкции / А.Д. Змеев, А.О. Рогожников, Д.П. Ястребов // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование: Материалы XIII Нац. (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 97–101.
9. Змеев А.Д., Рогожников А.О. Натурные испытания по подбору мощности освещения для подводного дрона модульной конструкции // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф. (18–21 октября 2022 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 66–69.



УДК 629.584

А.А. Бурденков<sup>1</sup>, П.А. Замятин<sup>2</sup>, Е.В. Поганов<sup>1</sup>, Е.Е. Тимошенко<sup>1</sup>, А.А. Юдов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, 115409;*

<sup>2</sup> *ООО «Научно-производственный центр беспилотных  
авиационных систем и робототехнических комплексов»,  
Ковров, 601910  
e-mail: po.egor.07@mail.ru*

## ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА ПО СОЗДАНИЮ ПОДВОДНОГО ДРОНА

Описан состав проведенных исследований и экспериментов. Рассмотрены ключевые составные части подводного дрона (силовая установка, станция управления, подсистема передачи данных, система управления). Описаны перспективы развития проекта.

**Ключевые слова:** подводный дрон, силовая установка, станция управления, подсистема передачи данных, система управления.

A.A. Burdenkov<sup>1</sup>, P.A. Zamyatin<sup>2</sup>, E.V. Poganov<sup>1</sup>, E.E. Timoshenko<sup>1</sup>, A.A. Yudov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, 115409;*

<sup>2</sup> *Research and Production Center for Unmanned Aircraft Systems and Robotic Complexes Ltd,  
Kovrov, 601910  
e-mail: po.egor.07@mail.ru*

## CONDUCTING RESEARCH WITHIN THE FRAMEWORK OF THE PROJECT TO CREATE AN UNDERWATER DRONE

The composition of the conducted research and experiments is described. The key components of an underwater drone (power plant, control station, data transmission subsystem, control system) are considered. The prospects for the development of the project are described.

**Key words:** underwater drone, power plant, control station, data transmission subsystem, control system.

Реализация проекта создания подводного дрона в рамках работы студенческого научного общества (СНО) НИЯУ МИФИ потребовала от авторов проведения ряда исследований и испытаний для проверки правильности выбранных решений.

В качестве примера при организации работ использованы данные из публикации специалистов Камчатского государственного технического университета [1–3].

### Проведенные исследования и эксперименты

**Подсистемы, для которых выполнялись исследования.** Для отработки основных технических решений выполняется макетирование подсистем.

Первоочередное внимание уделяется следующим составным частям:

- силовая установка;
- станция управления;
- подсистема передачи данных;
- система управления.

**Силовая установка.** На рис. 1 представлен макет фрагмента силовой установки.

Команды управления для регулятора оборотов ESC (Electronic Speed Controller) формируются с использованием четырехканального комплекта радиоуправления FlySky FS-i4X (рис. 2).

Для присоединения ESC используется стандартный третий канал приемника. Питание на приемник подается через преобразователь напряжения BEC (Battery Elimination Circuit) ESC.

Перед проведением испытаний тяги двигательной установки выполняется начальная калибровка ESC.



Рис. 1. Иллюстрация схемы включения при проведении испытаний силовой установки



Рис. 2. Комплект радиоуправления для испытаний силовой установки

Использованный на начальном этапе регулятор оборотов Hobbywing PLATINUM-60A с BEC является избыточным как по мощности, так и по функциональности. В связи с этим далее будут проведены исследования с использованием менее мощных регуляторов оборотов (рис. 3):

- HobbyWing FLYFUN-40A (с BEC);
- Cyclone 45A BLHeli\_S ESC 2-6S45 A (без BEC);



- 35A BLHeli\_S ESC 2-6S Lipo (без BEC);
- Favorite FVT LittleBee 30A-S (без BEC).

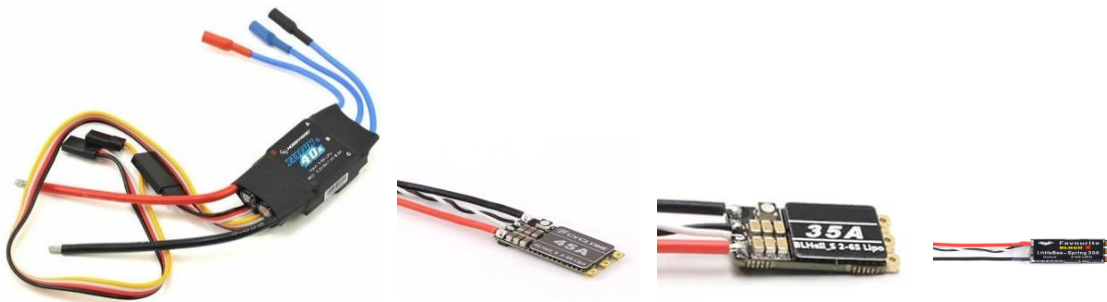


Рис. 3. Регуляторы оборотов для дальнейших исследований

**Станция управления.** Станция управления обеспечивает взаимодействие с подводным дроном и выполняет:

- передачу команд управления дрону;
- прием от дрона телеметрической информации;
- отображение принятой от дрона телеметрической информации;
- визуализацию информации от оптоэлектронной камеры дрона.

Рассматриваются три основных варианта реализации станции управления:

- на базе ноутбука с подключенным к нему джойстиком;
- на базе ноутбука и отдельного пульта управления (например, RadioMaster TX12);
- с использованием отдельного пульта управления и видеоскрена для отображения сигнала от оптоэлектронной камеры дрона.

**Подсистема передачи данных.** Подсистема передачи данных обеспечивает связь между подводным дроном и станцией управления.

Рассматриваются несколько вариантов реализации с использованием медного витопарного кабеля UTP 8:

- Ethernet с совместной передачей трафика управления/мониторинга и видео;
- Ethernet с совместной передачей трафика управления/мониторинга и видео; при этом трафик управления/мониторинга передается по технологии USB-over-Ethernet;
- четыре жилы UTP-8 для Ethernet с трафиком видео и две жилы UTP-8 с трафиком управления/мониторинга, передаваемым по технологии, разработанной ООО «ДЮСО-Системс».

Одним из наиболее известных на рынке решений для виртуализации USB-портов являются концентраторы семейства Digi AnywhereUSB. На рис. 4 показано двухпортовое изделие Digi AnywhereUSB 2 Plus, с помощью которого к станции управления по интерфейсу Ethernet могут быть виртуально подключены бортовой контроллер и USB-камера дрона.



Рис. 4. Двухпортовый коммутатор Digi AnywhereUSB 2 Plus (обеспечивает виртуализацию двух портов USB)

**Система управления.** Система управления подводного дрона основана на совместном использовании бортового контроллера и бортового компьютера.

Для бортового контроллера используется специализированная прошивка ArduSub, загружаемая с использованием инструментального программного обеспечения ArduPilot MissionPlanner.

На рис. 5 представлены стандартные конфигурации библиотеки ArduSub (<https://www.ardubot.com/introduction/features.html>). Зеленым цветом помечены двигатели с направлением вращения против часовой стрелки, синим – по часовой стрелке либо имеющие реверс.

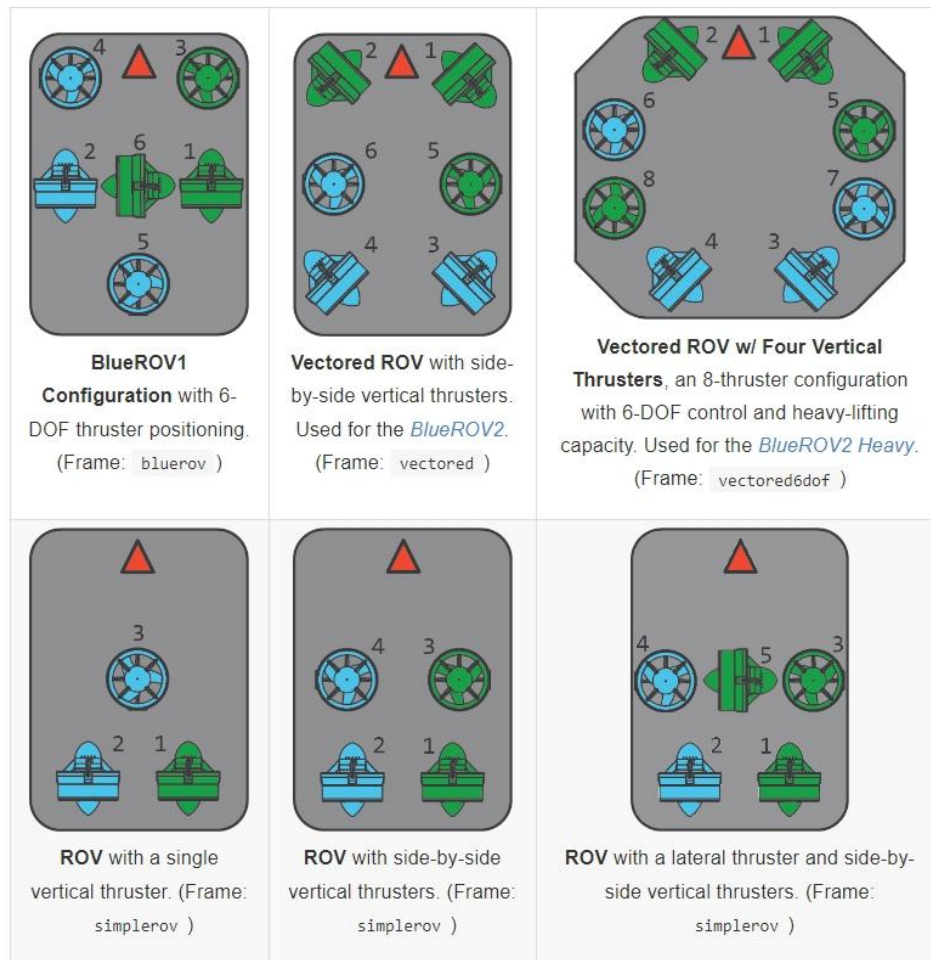


Рис. 5. Стандартные конфигурационные фреймы библиотеки ArduSub

Одним из важнейших дополнений к коду ArduSub является библиотека, обеспечивающая шесть степеней свободы (Roll – крен, Pitch – тангаж, Yaw – рыскание, Throttle – газ, Forward – вперед, Lateral – в сторону), которая позволяет легко настраивать широкий спектр конфигураций двигателей дрона. Библиотеки двигателей для каждой конфигурации основаны на наборе классов двигателей более высокого уровня, представленного на рис. 6.

```

AP_Motors
|---- AP_MotorsMulticopter
      |---- AP_MotorsMatrix
            |---- AP_Motors6DOF
    
```

Рис. 6. Набор классов двигателей библиотеки ArduSub

В таблице показан пример конфигурационных параметров для стандартного варианта BlueROV1 (вверху слева на рис. 5).

Пример конфигурационных параметров для BlueROV1

Motor #	Roll Factor	Pitch Factor	Yaw Factor	Throttle Factor	Forward Factor	Lateral Factor
1	0	0	-1.0	0	1.0	0
2	0	0	1.0	0	1.0	0
3	-0.5	0.5	0	0.45	0	0
4	0.5	0.5	0	0.45	0	0
5	0	-1.0	0	1.0	0	0
6	-0.25	0	0	0	0	1.0

### Перспективы развития проекта

Для рассматриваемого проекта немаловажное значение имеет потенциал его развития.

В качестве перспективных направлений развития проекта выделены следующие:

- включение в состав системы управления и принятия решений технологий искусственного интеллекта;
- расширение числа технологий связи с пунктом управления (включая, прежде всего беспроводные);
- увеличение числа интерфейсных модулей (манипулятор и т.п.);
- реализация возможности запуска беспилотных летательных аппаратов, включая дроны-перехватчики (как из подводного, так и из надводного положений);
- обеспечение групповой/роевой работы подводных дронов;
- обслуживание подводных дронов с использованием беспилотных носителей;
- реализация функционала подводных дронов-перехватчиков для борьбы с несанкционированным использованием различных подводных и надводных средств.

Также следует отметить такие потенциально интересные направления использования, как оценка технического состояния антикоррозийной защиты судна [4] и обеспечение безопасности систем морских коммуникаций [5].

Полученные при проведении исследований и испытаний результаты позволили натурно отработать основные технические решения и снизить число потенциально возможных ошибок при проектировании подводного дрона.

На текущем этапе выполнялись локальные испытания для отдельных составных частей. Далее будут проведены уже комплексные испытания для составных частей в их взаимодействии.

Предполагается распространение исследований и на смежные области знаний, в том числе на кибербезопасность жизненного цикла.

### Литература

1. Змеев А.Д. Разработка подводного дрона с модульной конструкцией // Молодёжь. Наука. Инновации. – 2022. – Т. 1. – С. 427–432.
2. Змеев А.Д. Модификация подводного дрона модульной конструкции // Молодёжь. Наука. Инновации. – 2023. – Т. 1. – С. 622–626.
3. Змеев А.Д. Разработка пульта управления подводного дрона модульной конструкции // Молодёжь. Наука. Инновации. – 2024. – Т. 1. – С. 502–506.
4. Змеев А.Д., Рогожников А.О. Перспектива использования подводных дронов для оценки технического состояния антикоррозийной защиты судна // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Четвертой междунар. науч.-техн. конф. (25–26 ноября 2021 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 109–112.
5. Змеев А.Д., Рак А.Н. Роль подводных дронов в обеспечении безопасности систем морских коммуникаций // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: Сборник научных трудов XXIV междунар. науч.-техн. конф. аспирантов и студентов. – Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2024. – С. 46–47.

УДК 004

**А.Н. Бурнаев**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: kv4drokopter@gmail.com*

### **API СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ В ИС «КАФЕДРА»**

В статье предлагается реализация API для системы компьютерного тестирования (КТест), которая является подсистемой информационной системы кафедры. Будут описаны основные функции API, а именно чтение тестов, запись и чтение результатов тестирования, взаимодействие с серверной частью через прямые запросы, а также возможность и удобство интеграции API с различными клиентскими приложениями без необходимости переработки существующей серверной части. Дано обоснование выбора реализованного подхода, а также приведены примеры запросов и описаны ключевые параметры взаимодействия с основными функциями системы.

**Ключевые слова:** API, сервер БД, запросы, тестирование, вопросы и варианты ответов.

**A.N. Burnaev**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: kv4drokopter@gmail.com*

### **API OF THE COMPUTER TESTING SYSTEM IN INFORMATION SYSTEM "KAFEDRA"**

The implementation of an API for the KTest computer-based testing system, which is a component of the department's information system is suggested. The primary functions of the API, including include reading tests, writing and reading test results, and interacting with the server via direct requests are described. Particular emphasis is placed on the ease of integrating the API with various client applications without the need for modifying the existing server-side architecture. The rationale for the selected implementation approach is provided. Examples of requests and a description of key parameters for interaction with the system's main functions are presented.

**Key words:** API, database server, requests, testing, questions and answer options.

Веб-приложение **КТест**, являющееся подсистемой информационной системы кафедры (ИСК), разрабатываемой на кафедре информационных систем КамчатГТУ, представляет собой полноценный инструмент для проведения качественного тестирования знаний и обучения студентов [1]. Приложение эффективно функционирует уже продолжительное время.

Тем не менее КТест предназначен для прохождения тестов исключительно на персональных компьютерах, хотя для многих пользователей привычнее использовать именно мобильные устройства, особенно в контексте тестирования. Смартфон позволяет пользователю не быть привязанным к определенному месту и проходить тесты в любом удобном для него месте.

Для удобства пользователей возможно создание набора мобильных приложений КТест, к реализации которых, однако, нет необходимости заново разрабатывать серверную часть приложения и базу данных. Наиболее простой и эффективный подход заключается в написании только клиентской части, то есть пользовательского интерфейса, посредством которого пользователь будет взаимодействовать с уже реализованной серверной частью веб-приложения и с уже имеющейся базой данных.

Таким образом, **API КТест** (Application Programming Interface – программный интерфейс приложения) предоставляет доступ к совокупности функций на стороне сервера для проведения полноценного тестирования, реализованных на PHP, которые позволяют клиентскому приложению взаимодействовать с базой данных КТест через стандартизированные запросы. Данное API основано на архитектуре клиент – сервер.

Для организации взаимодействия между клиентом и сервером существуют несколько архитектурных решений, включая одно из самых распространенных RESTful API, а также использование различных фреймворков и библиотек. Классический RESTful подход заключается в использовании стандартных HTTP-методов, таких как GET, POST, PUT, DELETE, для выполнения операций над ресурсами, представленных в виде URL-адресов, что упрощает поддержку и расширение функционала благодаря четкой структуре и стандартам, а также обеспечивает совместимость с различными клиентскими платформами [2]. Однако в случае **КТест** было принято решение отказаться от данного подхода по ряду причин.

Во-первых, приложение **КТест** не обладает ни высокой масштабируемостью, ни сложной архитектурой, характерной для крупных систем. Следовательно, внедрение RESTful API или дополнительных библиотек могло бы усложнить текущую структуру приложения без значительных преимуществ, что нежелательно для проекта, не требующих сложных решений – простота и эффективность разработки являются приоритетными.

Во-вторых, существующая серверная часть уже реализована на PHP с процедурным подходом и организована вокруг файла `index.php`, а конкретнее все функции, отвечающие непосредственно за тестирование, содержатся в одном файле. Потребовалось бы значительных усилий и времени, чтобы переписать эту часть под RESTful архитектуру, что не соответствует текущим целям проекта. Кроме того, уже настроенное взаимодействие между клиентом и сервером проверено и стабильно работает, что снижает необходимость внедрения новых технологий.

Отличие выбранного подхода от RESTful заключается в том, что вместо стандартизированных маршрутов и методов взаимодействия с сервером запросы направляются напрямую к конкретным функциям с использованием конкретных параметров, которые определяют действие и данные. Сервер обрабатывает запрос, вызывает соответствующую функцию и возвращает данные в формате JSON.

Рассмотрим на примере метода GET – это HTTP-метод, который обозначает получение данных. Реализованный подход:

`GET https://ktestexample.ru/index.php?function=readTest&id_question=123`

Здесь:

– `function= readTest` – параметр, который указывает серверу, какую функцию вызвать (в данном случае функцию для получения информации о тесте).

– `id_test=123` – идентификатор вопроса, по которому сервер должен найти данные.

– `index.php` – файл, к которому идет обращение.

RESTful: `GET https://ktestexample.ru/tests/123`

Здесь `/tests/123` – маршрут, где `/test` указывает на ресурс "тесты", а 123 – это идентификатор конкретного теста, данные которого нужно получить.

Как можно заметить, в данном случае файл не указывается, потому что сервер при реализации RESTful настроен на использование маршрутизации, он сопоставляет маршрут `/tests/123` с нужным контроллером или функцией, скрывая от пользователя детали о том, какой файл вызывается.

В случае **КТест** прямые запросы к функциям оказываются более практичным решением, они могут быть более специфичными, поскольку непосредственно обращаются к нужной функции без необходимости следования заранее определенным маршрутам.

### Основные функции API КТест

Основные сущности системы включают: вопросы, тесты, назначенные тесты, результаты тестирования.

Поскольку основные функции, работающие с базой данных, связаны с чтением и записью данных, можно выделить следующие функции системы:

- чтение и запись тестовых заданий (вопросов);
- чтение и запись тестов (набора вопросов);
- чтение и запись назначений (назначенных конкретной учебной группе тестов с конкретными параметрами);
- чтение и запись результатов тестирования.

Однако API **КТест** предоставляет доступ только к чтению тестов и назначений, а также к записи и чтению результатов тестирования. Мобильный и другие клиентские интерфейсы по большей части ориентированы на студентов. Студентам не нужно создавать тесты, их задача –

проходить их. Для преподавателей, которым нужно создавать и редактировать тесты, вопросы и назначения, предусмотрена веб-версия системы.

Далее будет рассмотрено, как именно обращаться к конкретным функциям для получения или записи необходимых данных.

#### **Авторизация и идентификация пользователя**

Для доступа к функциям API пользователь должен пройти авторизацию. При успешной авторизации сервер создает сессию, которая используется для идентификации пользователя при последующих запросах. Таким образом, параметры, такие как `$id_user` (идентификатор пользователя) и `$access` (права доступа), определяются на стороне сервера и не передаются напрямую в каждом запросе.

#### **Чтение списка записей по контексту**

Для поиска тестов по заданному контексту используются следующие функции:

**`searchTest()`** – функция, отвечающая за чтение списка тестов по заданному контексту.

При обращении к данной функции и в запросе необходимо указывать сам контекст, то есть введенный в окно поиска текст, по которому должен быть произведен поиск. Содержание контекста обязательно должно быть определено в переменной `s`.

По тому же принципу осуществляется поиск группы, студента и преподавателя, идентификаторы которых необходимы для чтения результатов и назначенных тестов.

Пример запроса: `GEThttps://ktestexample.ru/index.php?function=searchTest&s=текст_поиска`

#### **Чтение тестов**

Функция: **`readTest($id_user)`** – функция, отвечающая за чтение тестов.

Обращаясь к данной функции, в запросе указывается идентификатор теста, который должен содержаться в переменной `id_test`.

В функции чтения тестов определяются идентификаторы конкретных вопросов, принадлежащих данному тесту. После чего происходит вызов функции чтения вопросов для каждого `id_question`. Таким образом, идентификатор пользователя является параметром функции `readTest`, так как он необходим для определения авторства пользователя для каждого вопроса в функции `readQuestion`. Только в случае, если пользователь является автором вопроса, ему доступны правильные варианты ответа, иначе пользователь получает лишь список вариантов ответов без информации об их правильности. Такой подход реализован по причине того, что отправлять запрос на получение теста могут не только студенты, которым нужно пройти назначенный тест, но и преподаватель-автор, которому нужно просмотреть или отредактировать тест в полной веб-версии приложения.

Сама функция чтения вопроса не рассматривается в рамках данной статьи, так как студенту нет необходимости получать данные какого-то одного конкретного вопроса.

Пример запроса:

`GEThttps://ktestexample.ru/index.php?function=readTest&id_test=идентификатор_теста`

#### **Чтение назначенных тестов**

Функция: **`readAssigns($p,$id_user)`** – отвечает за чтение назначений, то есть за получение данных назначенного теста. Каждое назначение не содержит сам список вопросов, а содержит лишь параметры теста для конкретной группы, такие уровень сложности, количество вопросов, время прохождения, количество попыток и другие настройки.

Параметр `$p` отвечает за то, из какой секции происходит обращение к данной функции. Всего в веб-приложении КТест существует шесть основных секций: `ques/test` – секция для создания и редактирования тестовых заданий/тестов, `assigns` – секция для назначения тестов, `exam_h` – секция, содержащая список назначенных тестов, то есть тестов, доступных для прохождения, `exam` – секция для прохождения тестов, `results` – секция для просмотра результатов тестирования.

Соответственно, параметр `$p` содержит либо значение `exam_h`, либо `assigns`.

Значение `$p = exam_h` – запрос на получение списка назначенных тестов отправляет тестируемый, а следовательно, назначения отбираются по группе, к которой принадлежит студент.

Значение `$p = assigns` – запрос на получение списка назначенных тестов отправляет преподаватель, отсюда следует, что отбираются все назначенные данным преподавателем тесты.

Так как в статье рассматривается реализация функционала исключительно для студентов, при использовании функции `readAssigns` следует указывать значение `$p` как `exam_h`.

Пример запроса: `GEThttps://ktestexample.ru/index.php?function=readAssigns&p=exam_h`

**Чтение и запись результатов тестирования**

Функция: **readResults(\$id\_user)** – функция, отвечающая за чтение результатов пройденных тестов.

Обращаясь к данной функции, в запросе необходимо передавать массив xP, содержащий идентификатор преподавателя – *id\_teacher*, студента – *id\_student*, группы – *id\_grup*, а также описанный выше массив *T*, содержащий идентификатор теста – *id\_test*. Это требуется для реализации комбинированной выборки результатов тестирования.

По параметру *\$id\_user* определяется, является ли обращающийся к функции студентом или преподавателем. Если запрос отправляет студент, то происходит чтение только его результатов пройденных тестов. Если преподаватель, то в зависимости от значений описанных ранее идентификаторов происходит поиск конкретных результатов.

Пример запроса: `POSThttps://ktestexample.ru/index.php?function=readResults`

`Content-Type: application/json`

Тело запроса (JSON): `{ "xP": { "id_teacher": 1, "id_student": 2, "id_grup": 1, "T": { "id_test": 1 } } }`

Функция: **writeResult(\$id\_user)** – функция, отвечающая за запись результатов пройденного теста в БД.

Необходимо уточнить, что производить запись данных в целом могут только преподаватели, однако функция записи результатов тестирования является исключением. Обращение к данной функции должно происходить автоматически после завершения студентом тестирования. При обращении в запросе передается ассоциативный массив *E* следующего вида:

- *id\_assign* – идентификатор назначенного теста,
- *time\_start* – дата-время начала тестирования,
- *time\_end* – дата-время окончания тестирования,
- *Q* – массив вопросов, каждый элемент которого является ассоциативным массивом следующего вида:

- *id\_question* – идентификатор вопроса (целое число),
- *question* – текст вопроса (строка),
- *type* – тип вопроса (строка),
- *difficulty* – экспертная сложность вопроса (целое число от 0 до 100),
- *difficulty\_s* – статистическая сложность вопроса (целое число от 0 до 100),
- *a* – массив ответов следующего вида:
- *id\_answer* – идентификатор ответа (целое число),
- *answer* – текст ответа (строка),
- *correct* – правильность ответа (строка вида *true* или *false*),
- *res* – выбранный пользователем ответ (0 или 1),
- *s* – массив дисциплин (к которым принадлежит вопрос) следующего вида:
- *id\_subject* – идентификатор дисциплины (целое число),
- *subject* – название дисциплины (строка),
- *t* – массив тестов (в которых содержится вопрос) следующего вида:
- *id\_test* – идентификатор теста (целое число),
- *test* – название теста (строка).

Практически идентичный массив необходимо передавать в запросе при обращении к функции *writeQuestion*, которая в рамках данной статьи не рассматривается. Отличие заключается лишь в наличии ключа "res" в массиве ответов "a", значение которого указывает на выбранный пользователем ответ при прохождении теста, где значение равно единице, если ответ выбран и нулю, если ответ не выбран.

Пример запроса: `POSThttps://ktestexample.ru/index.php?function=writeResult`

`Content-Type: application/json`

Тело запроса (JSON): `{`

`"E": { "id_assign": 1, "time_start": "2024-09-27 10:00:00", "time_end": "2024-09-27 10:30:00",`

`"Q": [ { "id_question": 1, "question": "Текст вопроса", "type": "Тип вопроса", "difficulty": 50, "difficulty_s": 30,`

`"a": [ { "id_answer": 1, "answer": "Текст ответа", "correct": "true", "res": 1 } // дополнительные ответы],`

`"s": [ { "id_subject": 1, "subject": "Название дисциплины" } // дополнительные дисциплины],`

`"t": [ { "id_test": 1, "test": "Название теста" } // дополнительные тесты] } }`

**Вычисление результата ответа на тестовое задание**

В API КТест также существует немаловажная, однако не предназначенная ни для записи, ни для чтения данных функция.

Функция: **calcResults()** – отвечает за вычисления результата ответа на конкретный экзаменационный вопрос теста в процентах.

Для КТест предусмотрено два режима прохождения тестов: *обучающий* и контрольный. Особенность обучающего режима заключается в возможности анализа студентом своих ответов, так как при переходе к следующему вопросу доступен результат предыдущего вопроса, а вернуться к нему и просмотреть содержание уже не представляется возможным.

Таким образом, как было описано ранее, студент не имеет доступа к правильным вариантам ответа на вопрос – при обращении к функции чтения теста он получает массив вариантов ответов для каждого вопроса, однако в обучающем режиме студенту все-таки необходимо получать результат ответа на вопрос. Следовательно, обработку вопроса и вычисление результата целесообразнее проводить не на клиентской части, а на стороне сервера.

Обработав вопрос, функция возвращает результат со значением от 0 до 100.

Следовательно, обращаясь к функции *calcResults*, в запросе необходимо передавать массив Q с ключом *res* в массиве ответов "a".

Пример запроса: *POST*<https://ktestexample.ru/index.php?function=calcResults>

*Content-Type: application/json*

Тело запроса (JSON): {

"Q": {"id\_question": 1, "question": "Текст вопроса", "type": "Тип вопроса", "difficulty": 50, "difficulty\_s": 30,

"a": [{"id\_answer": 1, "answer": "Текст ответа", "correct": "true", "res": 1} // дополнительные ответы],

"s": [{"id\_subject": 1, "subject": "Название дисциплины"} // дополнительные дисциплины],

"t": [{"id\_test": 1, "test": "Название теста"} // дополнительные тесты]]}

API КТест позволяет эффективно обеспечить взаимодействие между клиентской и серверной частями системы, исключая при этом необходимость в полной переработке существующей инфраструктуры. Отказ от RESTful архитектуры в пользу прямых вызовов функций оправдан спецификой проекта – поддержкой текущей серверной логики на PHP, а также простотой реализации. В основной функционал API входит работа с тестами, назначениями и результатами тестирования, контроль доступа при этом обеспечивается через авторизацию пользователей. Благодаря описанной структуре запросов операции чтения и записи данных выполняются эффективно, позволяя системе сохранять производительность и стабильность. Данный подход способствует удобной интеграции не только с мобильными приложениями, но и с другими клиентскими интерфейсами, расширяя тем самым возможности использования КТест для различных платформ. В результате API КТест предоставляет доступ к основным функциям гибкого и эффективного инструмента для проведения тестирования и обучения, отвечающего требованиям кафедры информационных систем КамчатГТУ.

**Литература**

1. Бурнаев А.Н. Автоматизированная информационная система компьютерного тестирования КТест // E-POSTULAT.RU: Электрон. науч. журнал. – 2023. – URL: <https://www.e-postulat.ru/index.php/Postulat/article/view/5119>.

2. REST // Википедия. [2024]. Дата обновления: 25.09.2024. – URL: <https://ru.wikipedia.org/?curid=1628507&oldid=136037874> (дата обращения: 07.02.2024).



УДК 004.94:621.644.2 662.76

**Н.В. Грунтович<sup>1</sup>, А.А. Капанский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Государственный институт повышения квалификации и переподготовки кадров  
в области газоснабжения «ГАЗ-ИНСТИТУТ»,*

*Минск, Беларусь, 220037*

*e-mail: gruntovich@tut.by;*

<sup>2</sup> *Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,*

*Гомель, Беларусь, 246029*

*e-mail: kapanski@mail.ru*

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА В РЕГИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ**

В условиях современной Беларуси, где газификация достигла высокого уровня, важнейшим фактором, влияющим на потребление природного газа, остаются сезонные колебания температуры. Настоящее исследование посвящено анализу взаимосвязи между температурой наружного воздуха и потреблением газа в региональных системах газоснабжения на примере Гомельской области. Используя данные за период с 2012 по 2023 г., проведен корреляционный анализ по различным секторам экономики, включая энергетический, промышленный, жилищный и сельскохозяйственный секторы. Результаты демонстрируют значительную отрицательную корреляцию между снижением температуры и ростом потребления газа, особенно в отопительный период. Исследование подчеркивает важность учета климатических изменений при планировании поставок и разработке стратегий оптимизации использования газа. Полученные данные могут служить основой для формирования долгосрочных прогнозов потребления газа, что в свою очередь способствует повышению эффективности работы региональных систем газоснабжения и энергетической устойчивости страны.

**Ключевые слова:** региональные системы газоснабжения, потребление природного газа, температура наружного воздуха, корреляционный анализ.

**N.V. Gruntovich<sup>1</sup>, A.A. Kapansky<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *State Institute for Advanced Training and Retraining of Personnel in the Field of Gas Supply  
“GAS-INSTITUTE”,*

*Minsk, Belarus, 220037*

*e-mail: gruntovich@tut.by;*

<sup>2</sup> *Sukhoi State Technical University of Gomel,*

*Gomel, Belarus, 246029*

*e-mail: kapanski@mail.ru*

### **ANALYSIS OF TEMPERATURE FLUCTUATIONS IMPACT ON NATURAL GAS CONSUMPTION IN REGIONAL GAS SUPPLY SYSTEMS**

In modern Belarus, where the gasification system has reached a high level, seasonal temperature fluctuations remain a key factor influencing natural gas consumption. This study focuses on analyzing the relationship between outside air temperature and gas consumption in regional gas supply systems, using the Gomel region as a case study. Based on data from 2012 to 2023, a correlation analysis across various economic sectors, including the energy, industrial, residential, and agricultural sectors was conducted. The results show a significant negative correlation between falling temperatures and increased gas consumption, particularly during the heating season. The study highlights the importance of accounting for climate changes when planning gas supplies and developing strategies to optimize gas usage. The data obtained can serve as the foundation for long-term gas consumption forecasts, contributing to the increased efficiency of regional gas supply systems and the country's energy sustainability.

**Key words:** regional gas supply systems, natural gas consumption, outside air temperature, correlation analysis.

В последние годы вопросы повышения энергетической эффективности и обеспечения устойчивости систем газоснабжения приобрели глобальное значение. Для Беларуси, где уровень газификации достиг значительных высот, одной из приоритетных задач становится точное про-

гнозирование потребления энергоресурсов в условиях изменяющегося климата и экономических трансформаций. Одним из ключевых факторов, влияющих на объемы потребления природного газа, выступает температура наружного воздуха, особенно ее динамика в период отопительного сезона. Региональные системы газоснабжения (РСГС) Беларуси, которые обеспечивают энергией широкий спектр потребителей – от энергетических и промышленных предприятий до бытовых и коммунальных служб, сталкиваются с новыми вызовами, требующими адаптации к изменениям климата. Глубокий анализ взаимосвязи между температурными колебаниями и потреблением газа позволяет получать важные данные для оптимизации работы газовых систем и формирования стратегий повышения энергетической эффективности [1–3].

Цель данного исследования заключается в изучении воздействия сезонных колебаний температуры на динамику потребления природного газа в рамках Гомельской региональной системы газоснабжения (РСГС). Основное внимание уделено корреляционному анализу, который позволяет определить степень влияния температурных изменений на потребление газа в различных секторах экономики. Следует отметить, что в данной публикации представлены промежуточные результаты исследования, тогда как конечной целью является выявление ключевых закономерностей и тенденций, способных служить основой для разработки эффективной стратегии управления газоснабжением и планирования поставок природного газа на уровне всей страны.

Научные исследования в области газоснабжения основываются на детальном анализе суточной статистики потребления природного газа за период с 2012 по 2023 год. Для упрощения анализа и планирования потребители газа в рамках региональной системы газоснабжения сгруппированы в укрупненные балансовые группы (УБГ), которые отражают основные сектора потребления. К ним относятся: энергетический сектор, где газ выступает важнейшим источником для выработки электро- и теплоэнергии; промышленность, охватывающая как крупные, так и мелкие предприятия с различными уровнями потребления газа; жилищный сектор, использующий газ для отопления домов и бытовых нужд; сельское хозяйство, где газ необходим для технических операций, таких как обогрев помещений и сушка урожая; коммунальные и жилищно-коммунальные хозяйства, задействующие газ в своей повседневной деятельности. Детализация потребления по этим группам позволяет глубже понять структуру газового баланса и выработать эффективные стратегии по оптимизации использования газовых ресурсов [4–6]. Структура укрупненной балансовой группы региональной системы газоснабжения представлена на рис. 1.

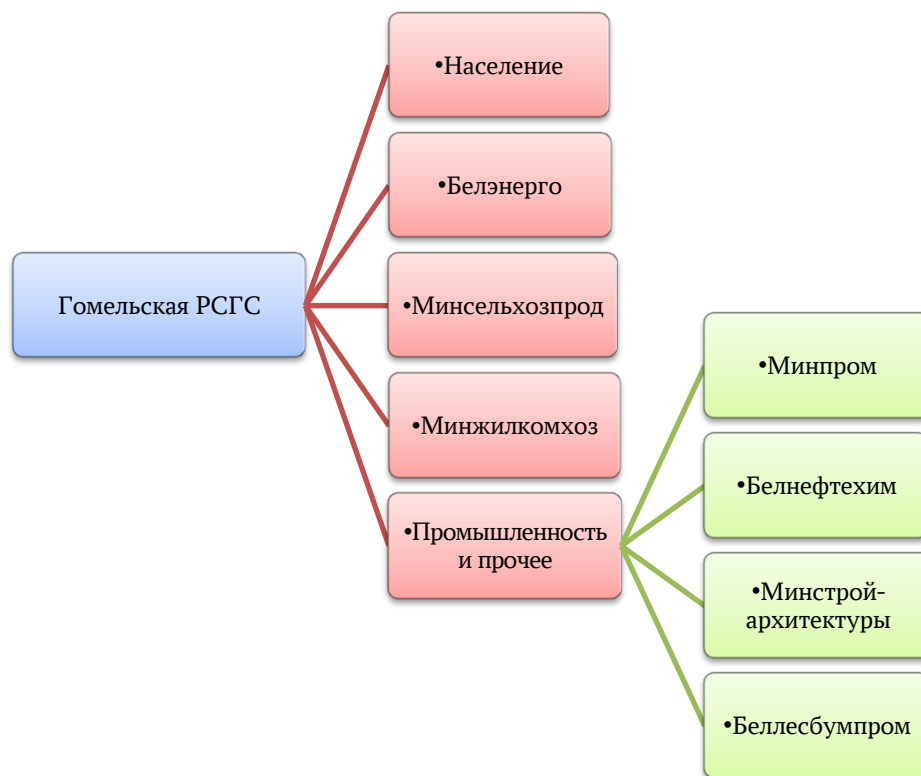


Рис. 1. Структура укрупненной балансовой группы региональной системы газоснабжения

Исследования изменчивости потребления природного газа балансовой структуры и оценка силы связи с температурой наружного воздуха выступают ключевыми аспектом комплексного анализа в контексте разработки модели прогнозирования. В Гомельской области, как и во многих других регионах, отопительный период варьируется в зависимости от погодных условий, насчитывая в сумме порядка 188 дней. Этот факт подчеркивает важность понимания силы связи между температурой наружного воздуха и потреблением газа в отопительном и межотопительном периодах. В таблице приведены результаты корреляционного анализа по различным секторам экономики за период с 2012 по 2023 г.

**Сила связи потребления природного газа и температуры наружного воздуха (по годовым данным)**

Год	Население	Белэнерго	Минпром	Белнефтехим	Минсельхозпрод	Минстройархитектуры	Минжилкомхоз	Беллесбумпром	Прочая промышленность
2012	-0,97	-0,87	-0,76	-0,60	-0,91	-0,86	-0,96	-0,94	-0,92
2013	-0,98	-0,84	-0,77	-0,20	-0,82	-0,18	-0,95	-0,84	-0,90
2014	-0,96	-0,93	-0,64	-0,03	-0,82	-0,58	-0,93	-0,75	-0,87
2015	-0,95	-0,91	-0,41	-0,17	-0,85	-0,74	-0,93	-0,65	-0,76
2016	-0,96	-0,92	-0,59	-0,32	-0,86	-0,51	-0,93	-0,59	-0,71
2017	-0,96	-0,91	-0,67	0,04	-0,79	-0,53	-0,93	-0,39	-0,88
2018	-0,97	-0,94	-0,63	-0,35	-0,80	-0,65	-0,96	-0,28	-0,87
2019	-0,95	-0,92	-0,71	-0,13	-0,80	-0,23	-0,93	-0,39	-0,41
2020	-0,95	-0,88	-0,65	-0,32	-0,86	-0,59	-0,92	-0,48	-0,71
2021	-0,96	-0,92	-0,66	-0,41	-0,87	-0,74	-0,94	-0,15	-0,83
2022	-0,96	-0,90	-0,80	-0,59	-0,82	-0,44	-0,93	-0,34	-0,74
2023	-0,95	-0,67	-0,70	-0,07	-0,84	-0,57	-0,93	-0,70	-0,77

Корреляционная карта газопотребления и температуры воздуха по укрупненным балансным группам Гомельской РСГС приведена на рис. 2.

Тепловая карта корреляций потребления газа по отраслям и температурой воздуха по годам



Рис. 2. Тепловая карта корреляции газопотребления и температуры воздуха по укрупненным балансным группам Гомельской РСГС

Полученные результаты позволяют сделать несколько ключевых выводов. Во-первых, в большинстве секторов и за большинство лет наблюдается очень сильная отрицательная корреляция (от  $-0,90$  до  $-1,00$ ), подчеркивающая тесную связь между снижением температуры и ростом потребления газа. Это явно демонстрирует, что температурные условия играют ключевую роль в определении потребления газа во всех секторах. Во-вторых, вариативность корреляции между разными секторами и годами указывает на различную чувствительность к изменениям температуры, что может отражать специфику потребления газа в каждом из них. К примеру, сектор «Население» выделяется очень высокой и стабильной отрицательной корреляцией во все годы, указывая на значительное влияние температуры наружного воздуха на бытовое потребление газа. Сектора «Белэнерго» и «Минстройархитектуры» также показывают значительное влияние температуры на потребление газа, в то время как сектор «Белнефтехим» демонстрирует наименьшую силу связи, что может свидетельствовать о более сложных факторах, влияющих на его потребление газа, особенно в 2017 г. Наконец, временные тренды в корреляции могут отражать изменения потребительских свойств, эффективности использования энергии, воздействие климатических изменений или структурные изменения в потреблении газа. Эти наблюдения подчеркивают важность взаимосвязи между температурой и потреблением природного газа, требующей дальнейшего глубокого изучения.

Основываясь на данных по статистике потребления газа различными секторами экономики, для поиска значимых отличий в потреблении проведена оценка вариативности. Для этого выполнено построение диаграммы размаха [7]. На представленной диаграмме рис. 3 каждый «ящик» отображает распределение потребления природного газа для различных групп потребителей. Ящик включает в себя медиану (линия в середине ящика), первый (нижний край ящика) и третий (верхний край ящика) квартили, отражающие 25-й и 75-й проценти соответственно, а «усы» указывают на минимальные и максимальные значения в пределах 1,5 межквартильных размахов от квартилей. Точки за пределами «усов» представляют выбросы, которые могут указывать на аномально высокое или низкое потребление в определенной группе.

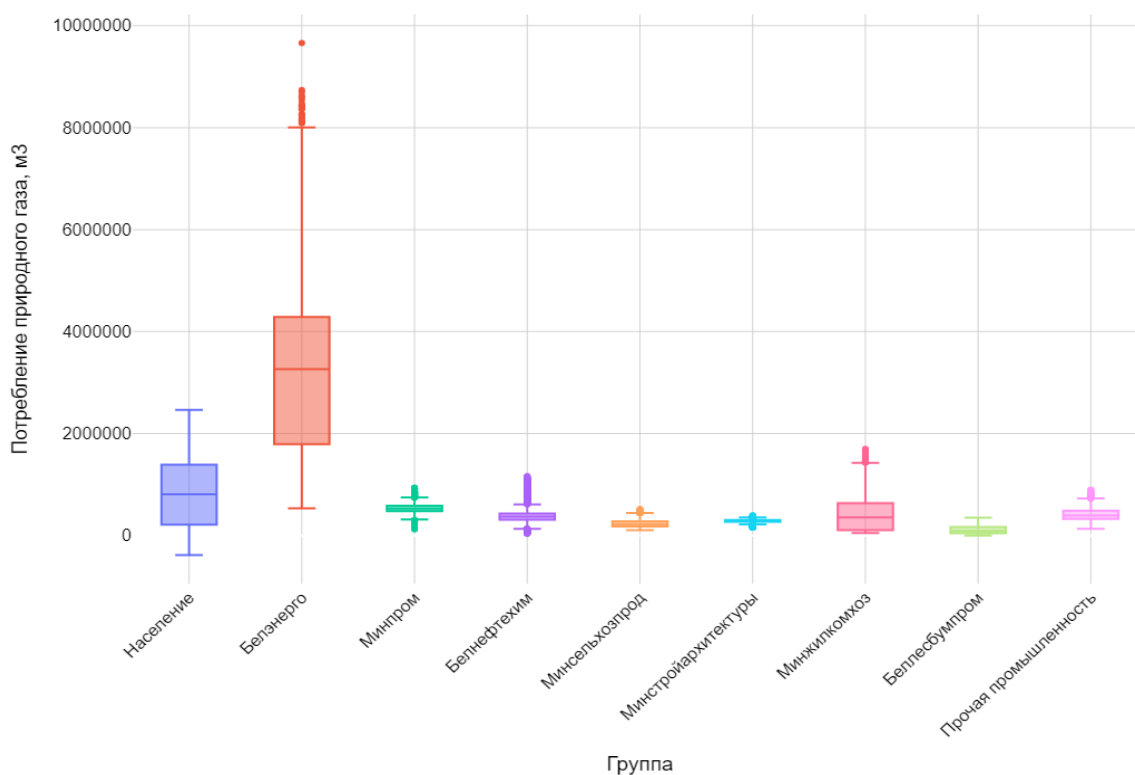


Рис. 3. Диаграмма «ящика с усами» для различных групп потребителей природного газа

На представленной диаграмме группа «Энергетика» заметно выделяется среди остальных групп. Это можно увидеть по значительно большему разбросу значений потребления газа, что отражается в размере ящика и длине усов. «Ящик» этой группы шире, что свидетельствует

о большем межквартильном размахе, а следовательно, и о большей вариативности потребления газа. Медиана, отмеченная линией в середине ящика, также заметно выше по сравнению с другими группами, что указывает на общее более высокое среднее потребление газа в энергетическом секторе. Эти особенности распределения делают эту группу ключевой для учета при формировании стратегии газоснабжения, так как именно она может вносить наибольший вклад в общий объем потребления газа.

Для подтверждения значимости различий в потреблении газа между балансовыми группами был проведен дисперсионный анализ. Результаты анализа с  $F$ -статистикой в 12188,97 явно превышают порог статистической значимости, установленный на уровне 3,84 для 0,05 уровня значимости с одной степенью свободы. К тому же,  $p$ -значение, стремящееся к нулю, подтверждает высокую статистическую значимость обнаруженных различий. Сумма квадратов межгрупповых вариаций значительно превосходит внутригрупповые вариации, подтверждая значительность различий в потреблении между разными группами потребителей.

Эти статистические данные неоспоримо указывают на то, что различия в потреблении газа между укрупненными балансовыми группами являются не только заметными, но и статистически значимыми. Такой результат подчеркивает необходимость дифференцированного подхода при планировании стратегий газоснабжения, учитывая уникальные потребности и характеристики каждого элемента УБГ. Пренебрежение этими различиями может привести к снижению точности планирования, в результате чего могут возникнуть избыточные или недостаточные объемы поставок, что в свою очередь скажется на надежности и экономической эффективности региональной системы газоснабжения.

### Литература

1. The study of structural fields of daily gas consumption of the balance groups of the regional gas supply system / *D. Moroz, N. Hruntovich, S. Jhukovets et al.* // E3S Web of Conferences, Prague, 14–15 мая 2020 года. – Prague, 2020. – P. 01066. – DOI 10.1051/e3sconf/202017801066. – EDN TQAQPI.
2. Оптимизация схем электроснабжения промышленных предприятий / *Е.И. Грачева, Т.В. Синюкова, Т.В. Табачникова, А.Н. Алимова.* – Казань: Казан. гос. энергет. ун-т, 2022. – 135 с. – EDNSMARQD.
3. *Мусаев Т.А.* Использование интеллектуальных систем учета электрической энергии в целях повышения эффективности процесса тарифообразования / *Т.А. Мусаев, О.В. Федоров, Р.Н. Камалиев, А.А. Капанский* // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2020. – № 2. – С. 68–75.
4. Regularities of the formation of structural fields of daily gas consumption of the regional gas supply system / *D. Moroz, N. Hruntovich, A. Kapanski et al.* // Sustainable Energy Systems: innovative perspectives: Conference proceedings (Saint-Petersburg, 29–30 октября 2020 г.). – Saint-Petersburg, 2020. – P. 01076. – DOI 10.1051/e3sconf/202023001076. – EDN BBGFXF.
5. Conditional-constant component in the total consumption of an energy resource and its influence on the energy efficiency of industrial consumers / *N. Hruntovich, A. Kapansky, S. Jhukovets et al.* // Sustainable Energy Systems: innovative perspectives: Conference proceedings (Saint-Petersburg, 29–30 октября 2020 г.). – Saint-Petersburg: Springer, Cham, 2021. – P. 459–470. – DOI 10.1007/978-3-030-67654-4\_48. – EDN MBNNXD.
6. *Федоров В.Т., Кокоев М.Н., Илюхин А.В.* Гидротурбина – источник тепловой энергии для производства энергоемких стройматериалов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2023. – Т. XIX, № 4 (34). – С. 85–95. – DOI: 10.26200/GSTOU.2023.83.55.003.
7. *Моисеенко Н.А., Цуев М.М., Саратов Э.Х.* Большие данные и некоторые возможности их применения // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2023. – Т. 19, № 3 (33). – С. 15–23.

УДК 004.7:628.14

**А.А. Капанский**

*Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,  
Гомель, Беларусь, 246029  
e-mail: kapanski@mail.ru*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ LSTM-РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ**

В статье представлен метод прогнозирования гидравлического давления в системах водоснабжения с использованием рекуррентных нейронных сетей, в частности модели с долгой краткосрочной памятью (LSTM). Основываясь на данных, получаемых с пьезоэлектрических датчиков давления, интегрированных в сеть через протокол MQTT, исследование демонстрирует значительное превосходство LSTM-модели над традиционными моделями. Это подчеркивает не только высокую точность прогноза, но и возможность более эффективного управления системами водоснабжения. Преимущество данной архитектуры заключается в ее гибкости и способности адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации, благодаря обработке новых данных, поступающих на сервер в реальном времени. Базовые принципы построения и настройки модели LSTM могут быть легко модифицированы для прогнозирования различных параметров, что расширяет перспективы использования рекуррентных нейросетей в управлении инженерными системами.

**Ключевые слова:** гидравлическое давление, рекуррентные нейронные сети, модель долгой краткосрочной памяти, системы ресурсоснабжения, датчики давления.

**A.A. Kapansky**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,  
Gomel, Belarus, 246029  
e-mail: kapanski@mail.ru*

## **PRESSURE MODELING IN WATER SUPPLY SYSTEMS USING LSTM RECURRENT NEURAL NETWORKS**

The method for forecasting hydraulic pressure in water supply systems using recurrent neural networks, specifically the long short-term memory (LSTM) model is presented. Based on data obtained from piezoelectric pressure sensors integrated into the network via the MQTT protocol, the study demonstrates a significant superiority of the LSTM model over traditional models. This fact highlights not only the high accuracy of the forecast but also the potential for more efficient water supply system management. The advantage of this architecture lies in its flexibility and ability to adapt to changing operational conditions through real-time processing of new data sent to the server. The basic principles of constructing and configuring the LSTM model can be easily modified to forecast various system parameters, expanding the prospects for using recurrent neural networks in managing engineering systems.

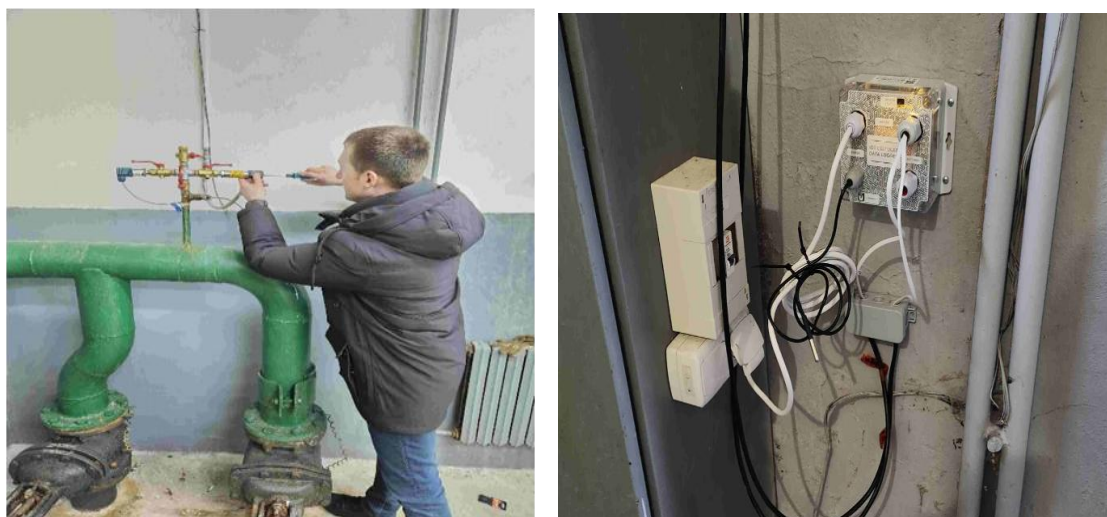
**Key words:** hydraulic pressure, recurrent neural networks, long short-term memory model, resource supply systems, pressure sensors.

Эффективность и надежность систем ресурсоснабжения играют ключевую роль в бесперебойной работе городской инфраструктуры [1, 2]. Внедрение передовых технологий для анализа и прогнозирования динамики таких систем становится важной задачей, способной не только помочь в оперативном выявлении и устранении аварийных ситуаций, но и предложить пути для оптимизации их работы [3–5]. Одним из наиболее мощных инструментов в этом направлении являются рекуррентные нейронные сети (РНС), особенно модели с долгой краткосрочной памятью (LSTM), которые способны учитывать влияние прошлых данных на будущие изменения. В текущем исследовании рассматривается применение LSTM модели для прогнозирования гидравлического давления в системах водоснабжения. Разработка таких моделей позволяет учиты-

вать множество переменных факторов, что способствует более глубокому пониманию работы сложных технических систем и разработке стратегий для их оптимизации, повышения надежности и эффективности.

Несмотря на то, что основное внимание в работе отводится системам водоснабжения, стоит отметить, что алгоритмы искусственного интеллекта также активно используются или могут адаптироваться к другим областям, таким как газоснабжение, нефтяная промышленность или теплоснабжение. Фундаментом для успешной интеграции прогностических моделей служит развитие и поддержание высококачественной информационной инфраструктуры, способной обрабатывать большие объемы данных в реальном времени. Интеграция современных технологий Интернета вещей (IoT) и облачных вычислений играет здесь первостепенную роль, поскольку обеспечивает бесперебойный поток данных от датчиков к аналитическим центрам и обратно к системам управления.

В рамках исследования была создана информационная платформа на базе Гомельской системы водоснабжения Беларуси, ключевым аспектом которой стало оперативное получение гидравлических параметров. Для достижения высокой точности измерений использовались пьезоэлектрические преобразователи давления вместе с модемами RTU-8xx российской компании АО «Телеофис». Сбор и передача информации осуществлялись по протоколу MQTT, который, выполняя функции брокера, эффективно координировал взаимодействие между устройствами [6–8]. На рис. 1 демонстрируется процесс подключения датчика давления и модема в условиях эксплуатации повысительной насосной станции (ПНС).



*Рис. 1. Процесс подключения первичного преобразователя давления к устройству сбора и передачи данных ПНС*

Датчики давления, установленные на ключевых узлах системы водоснабжения, подключались к устройствам сбора и передачи данных, которые выполняли функцию «Издателя». Эти устройства регулярно отправляли данные на вычислительный сервер, где брокер MQTT играл центральную роль в процессе: он принимал данные от издателей и распределял их между подписчиками, такими как персональные компьютеры и мобильные устройства пользователей. Это обеспечивало централизованное и надежное распределение информации, позволяя подписчикам обрабатывать данные в зависимости от их задач. Такая архитектура не только упростила процесс мониторинга системы, но и обеспечила оперативный доступ к данным о гидравлическом давлении, которые впоследствии использовались для обучения моделей искусственного интеллекта. На рис. 2 демонстрируется принятая архитектура модели нейронной сети. Эта структура модели была определена как оптимальная для данной задачи после серии экспериментов и тестирований, позволяя максимально точно прогнозировать динамику гидравлического давления и другие связанные параметры.

Определяющими параметрами базовой архитектуры сети являлись: 50 нейронов в каждом из слоев LSTM и полносвязном слое, подача 12 исторических наблюдений на вход модели и 12 значений прогнозирования, и использование одного параметра входа – измеренного давления с интервалом в 5 минут.



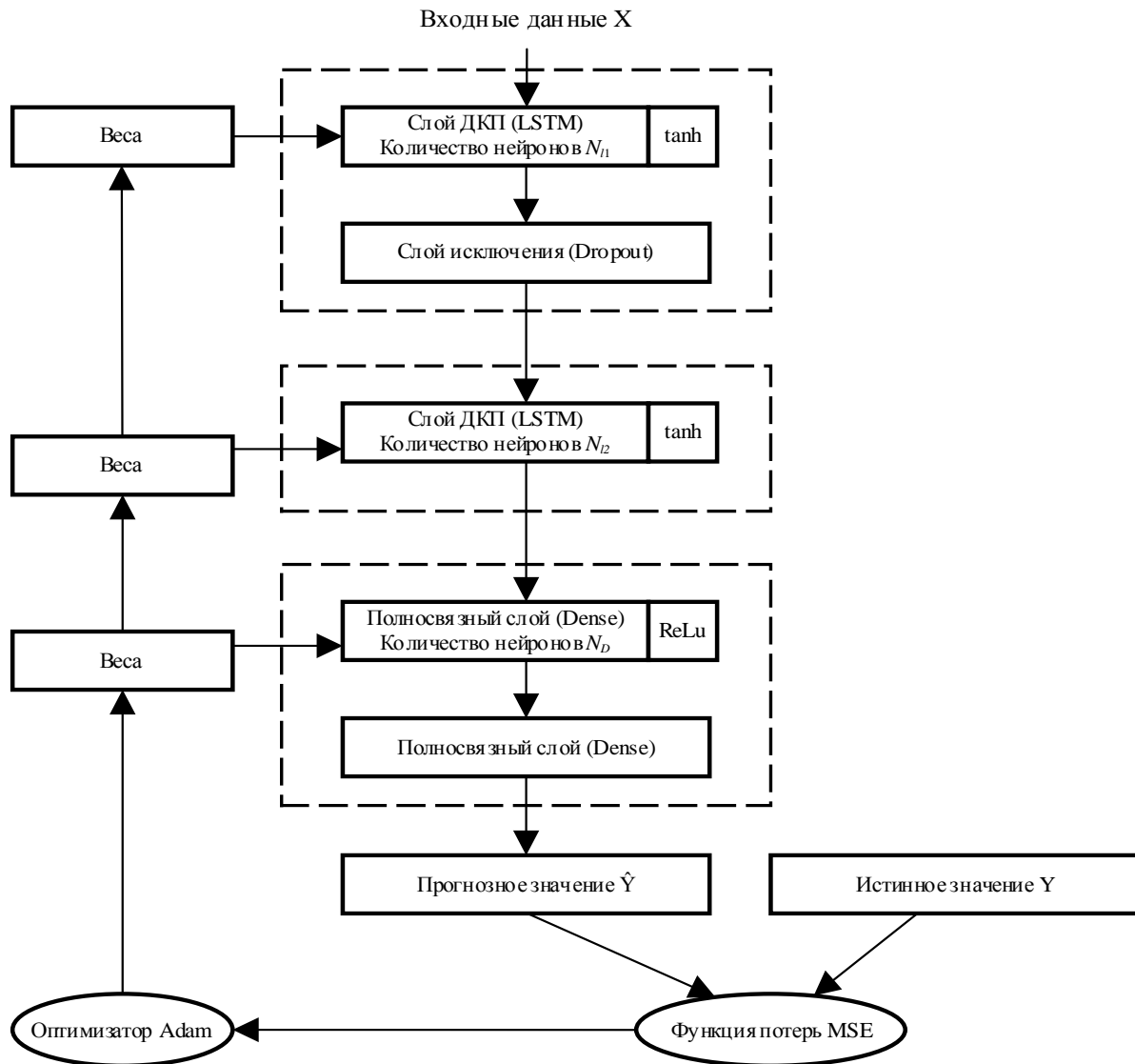


Рис. 2. Принятая архитектура модели нейронной сети для прогнозирования давления

Архитектура нейросетевой модели, используемая для обработки и анализа собранных данных, включала в себя следующие ключевые элементы:

1. *Слой LSTM (Долгая краткосрочная память)*: два слоя LSTM составили основу обработки временных последовательностей, таких как показания давления, благодаря их способности сохранять информацию о предыдущих состояниях системы, что является критически важным для задач прогнозирования.

2. *Функции активации*: гиперболический тангенс (tanh) был применен в слоях LSTM для нормализации значений в диапазоне от  $-1$  до  $1$ , что способствовало модуляции информации между слоями. Функция активации ReLU (Rectified Linear Unit) применялась в полносвязных слоях (Dense), внося нелинейность в модель и позволяя выявлять более сложные зависимости в данных.

3. *Полносвязные слои (Dense)*: слои с большим количеством параметров служили для агрегации и взвешивания признаков, извлеченных из данных LSTM слоев, преобразовывая их в предсказания.

4. *Оптимизатор Adam и функция потерь MSE*: это сочетание гарантировало эффективность и стабильность в процессе обучения модели, способствуя минимизации ошибок и постепенному улучшению точности прогнозов.

В рамках проведенного исследования были изучены семь разнообразных конфигураций нейросетевых моделей, отличающихся количеством и комбинациями слоев LSTM, Dropout и Dense. Основной целью было определение структуры модели, которая обеспечивает наиболь-



шую точность прогнозирования. Анализ результатов показал, что модели с увеличенным до двух или трех количеством слоев LSTM демонстрировали значительное улучшение в прогнозировании. Это подтверждалось снижением показателей таких метрик, как MAPE, SMAPE, MAE и RMSE, в сравнении с однослойной архитектурой LSTM. Добавление слоя регуляризации Dropout способствовало дополнительному улучшению производительности моделей. Особенно хорошие результаты показали модели с одним или двумя слоями Dropout. Модели с одним слоем Dense превосходили в эффективности модели с двумя полносвязными слоями.

Отмечалось, что с увеличением числа слоев и параметров росло и время, необходимое для обучения моделей. В частности, модель с тремя слоями LSTM, а также с Dropout и Dense, требовала вдвое больше времени по сравнению с моделью, состоящей из двух слоев LSTM и одного слоя каждого Dropout и Dense при схожей точности прогнозов. В результате оптимальной структурой модели для прогнозирования гидравлического давления оказалась та, что включала два слоя LSTM, один слой Dropout и один полносвязный слой Dense (рис. 2). Эта конфигурация демонстрировала погрешность на тестовой выборке с MAPE равной 4,79% на 20 эпохах обучения, что свидетельствует о ее высокой эффективности и адекватности для решения поставленной задачи. На рис. 3 демонстрируется влияние архитектуры нейронной сети на результаты моделирования.

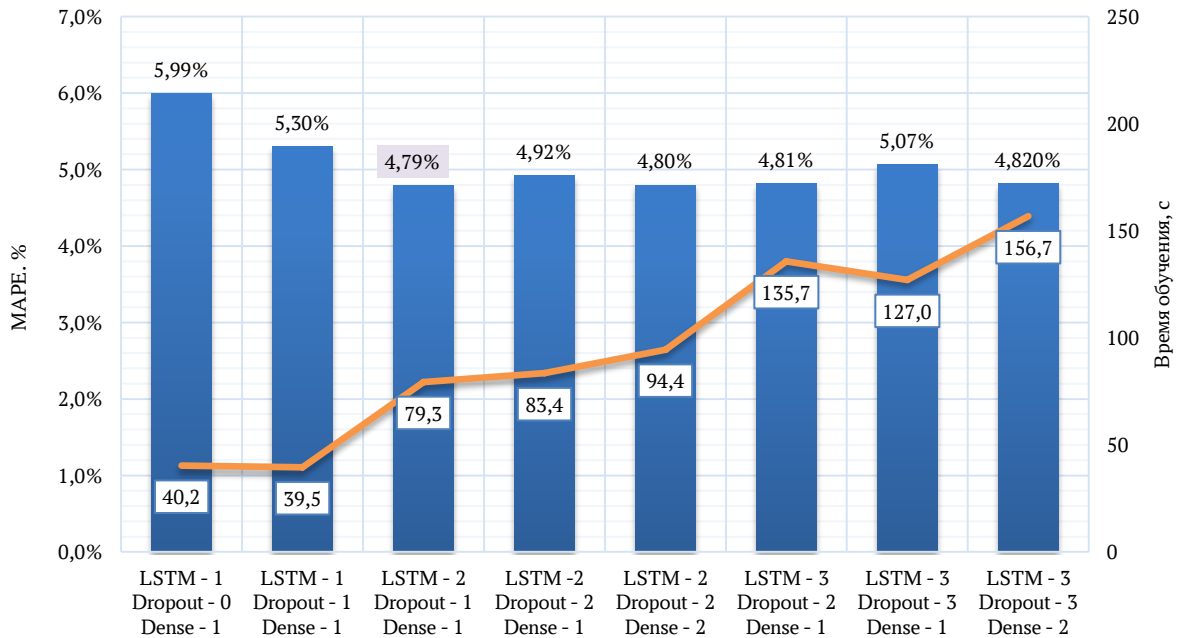


Рис. 3. Влияние архитектуры нейронной сети на производительность модели

В процессе исследования особое внимание было уделено анализу глубины прогноза, т. е. количества шагов (интервалов), на которые модель может предсказать будущие значения. Результаты показали, что точность прогнозирования зависит от глубины горизонта: чем дальше модель пытается предсказать, тем больше возможная ошибка. Минимальная ошибка MAPE, зафиксированная на уровне 4,09%, наблюдалась при прогнозировании на два шага вперед. С увеличением шагов прогнозирования ошибка постепенно возрастала, достигая 5,55% на глубине в 12 шагов.

Зависимость рис. 4 отражает сложности, возникающие при попытке модели адекватно оценить воздействие факторов, которые могут стать более непредсказуемыми на более длительных временных интервалах. К таким факторам относятся, например, сезонные колебания, дневные и недельные циклы, которые характерны для гидравлических систем и могут существенно повлиять на точность прогнозов.

С учетом полученных данных можно сделать вывод, что для обеспечения наилучшей точности предсказаний важно найти оптимальный баланс между желаемой глубиной прогноза и допустимой погрешностью. Выбор шага прогноза должен соответствовать специфическим целям и ограничениям конкретной задачи, учитывая не только потребность в точности, но и необходимость предвидения будущего на приемлемое расстояние во времени.

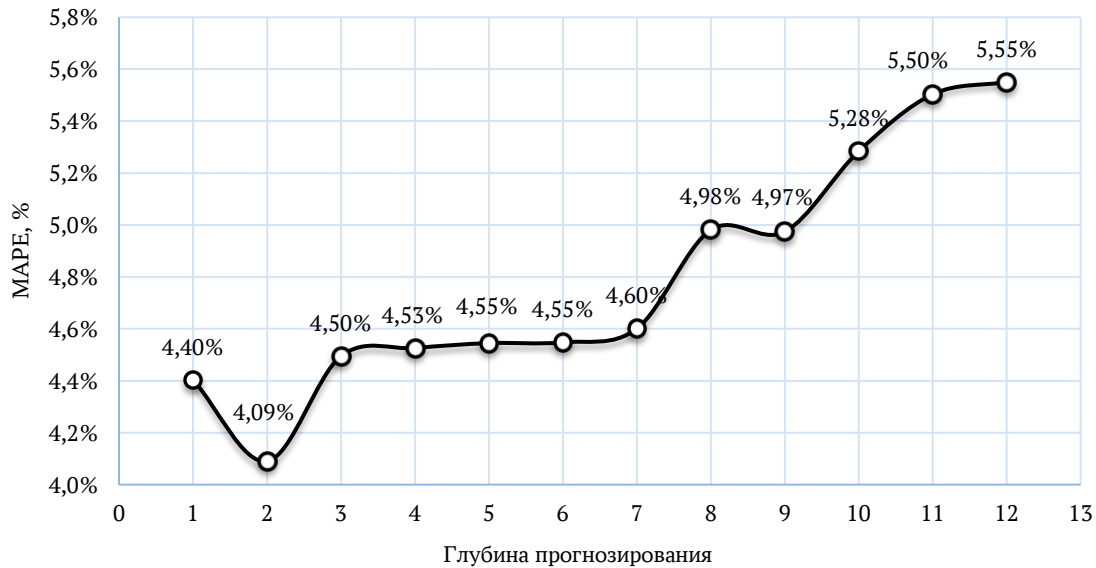


Рис. 4. Влияние архитектуры нейронной сети на производительность модели

В процессе осуществления проекта, направленного на оптимизацию и увеличение эффективности функционирования систем ресурсоснабжения, была оказана неоценимая поддержка со стороны руководства и специалистов Государственного предприятия «Гомельводоканал». Этот вклад оказался неоценимым не только в уточнении и повышении точности моделей прогнозирования, но и в целом способствовал прогрессу в интеграции и адаптации передовых технологических решений в практическую деятельность предприятия.

### Литература

1. Белов О.А. Методология оценки технического состояния электрооборудования при развитии параметрических отказов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2015. – № 3. – С. 96–102.
2. Белов О.А., Парфенкин А.И. Системная интеграция контроля электрооборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10. – №. 1. – С. 14–17.
3. Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower / N.V. Hruntovich, A.A. Kapanski, D. Vaczynski, G.V. Vagapov, O.V. Fedorov // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Vol. 124. – P. 05060. ()
4. Оптимизация схем электроснабжения промышленных предприятий / Е.И. Грачева, Т.В. Синюкова, Т.В. Табачникова, А.Н. Алимova. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – 135 с. – EDN SMARQD.
5. Ezechi C.G., Okoroafor E.R. Integration of Artificial Intelligence with Economical Analysis on the Development of Natural Gas in Nigeria; Focusing on Mitigating Gas Pipeline Leakages // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. – SPE, 2023. – С. D031S018R004.
6. Zyrianoff I. et al. Scalability of an Internet of things platform for smart water management for agriculture // 2018 23rd conference of open innovations association (FRUCT). – IEEE, 2018. – С. 432–439.
7. Thangavel D. et al. Performance evaluation of MQTT and CoAP via a common middleware // 2014 IEEE ninth international conference on intelligent sensors, sensor networks and information processing (ISSNIP). – IEEE, 2014. – С. 1–6.
8. Использование интеллектуальных систем учета электрической энергии в целях повышения эффективности процесса тарифообразования / Т.А. Мусаев, О.В. Федоров, Р.Н. Камалиев, А.А. Капанский // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2020. – № 2. – С. 68–75.

УДК 004.9

**Е.А. Коваль**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: fsshairssf@gmail.com*

## **РАЗРАБОТКА НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОДСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА РЫБ В ВОДОЕМАХ**

В данном проекте представлено описание хода разработки нейронной сети для подсчета количества рыб в водоемах Камчатского края. Описаны актуальность и научная новизна проекта. Произведены анализ и выбор оптимальных языков программирования, библиотек и приложений. Приведено краткое описание принципов работы библиотек и нейронной сети.

**Ключевые слова:** мониторинг туристов, беспилотные дроны, радиомаяки, компьютерное зрение, Камчатка, безопасность туризма, автоматизация, MQTT, Leaflet, экстренные службы.

**E.A. Koval**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: fsshairssf@gmail.com*

## **NEURAL NETWORK DEVELOPMENT FOR COUNTING THE NUMBER OF FISH IN WATER BODIES**

This project describes the development of a neural network for counting the number of fish in the water bodies of Kamchatka Krai. The relevance and scientific novelty of the project is described. The optimal programming languages, libraries and applications are analyzed and selected. A brief description of the principles of operation of libraries and neural network is given.

**Key words:** tourist monitoring, unmanned drones, beacons, computer vision, Kamchatka, tourism safety, automation, MQTT, Leaflet, emergency services.

Рыболовство является основополагающей и ведущей отраслью в Камчатском крае. В 2023 г. Камчатский край продемонстрировал рекордные показатели вылова в 1,8 млн тонн водных биоресурсов, что стало лучшим результатом за всю историю рыбохозяйственной деятельности за всю историю региона [1]. Но даже эти показатели можно улучшить, если использовать нейросеть для подсчета рыб в водоемах и рыбоводных фермах. Более точные данные о количестве и видовой принадлежности рыб позволяют оценить рыбный запас и его изменение, что в свою очередь способствует более эффективному управлению водными биоресурсами. На данный момент не только в Камчатском крае, но и во всей России известен только один случай применения нейросети для подсчета рыбы, а именно внедрение способов автоматизации промышленного контроля на основе технологий машинного зрения и нейронных сетей в компании на одной из рыбоводных ферм компании ZIZ [2]. Разработка данного проекта считается уникальной, так как обученная нейронная сеть станет универсальным инструментом подсчета рыбы не только в рыбоводных фермах, но и камчатских реках.

Цель исследования – разработка нейронной сети для подсчета количества рыб и их видовой принадлежности в водоемах и рыбоводных фермах Камчатского края.

Задачи проекта:

1. Сбор видео- и фотоматериала.
2. Подготовка и нормализация собранных данных для обучения.

1. Выбор архитектуры нейронной сети.
2. Непосредственное обучение модели.
3. Проверка и тестирование обученной модели.
4. Оптимизация и настройка.
5. Внедрение и мониторинг.

Обоснование выбора программного обеспечения: так как была выбрана архитектура сверточной нейронной сети, которая требует высокой вычислительной мощности и обширных операций с данными, возникла необходимость в производительном и гибком языке программирования, которым и стал Python.

Python является одновременно простым и лаконичным языком программирования, что позволяет с минимальными затратами сил и времени разрабатывать достаточно сложные алгоритмы.

Благодаря своему низкому порогу вхождения, он имеет большое сообщество разработчиков, которые вносят немалый вклад в развитие самого языка, а также принимают участие в создании библиотек, использование которых еще сильнее упрощает создание программ, а в данном случае – нейросети.

Для разработки требуется несколько библиотек, таких как TensorFlow, TensorBoard и OpenCV.

TensorFlow – разработанная компанией Google библиотека с открытым исходным кодом для глубокого машинного обучения, которая предоставляет широкий набор инструментов для построения и обучения различных типов нейронных сетей. Помимо этого, TensorFlow поддерживает все популярные операционные системы – Windows, Linux, MacOS, а самое главное, использует вычисления на графах для оптимизации производительности и эффективности вычислений с использованием графического процессора или же специализированные тензорные процессоры.

TensorBoard – это набор средств визуализации, также разработанный Google в дополнение к библиотеке TensorFlow, упрощающий понимание и отладку программ глубокого обучения. Например, он позволяет просматривать граф модели, отображать различные скалярные значения в процессе обучения и визуализировать внедрение, помимо этого TensorFlow визуализирует веса и смещения обучаемой модели, что облегчает анализ ее параметров.

OpenCV или же Open Source Computer Vision Library – это еще одна библиотека с открытым исходным кодом. Представляет собой очень мощную библиотеку алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов. OpenCV содержит функции для загрузки и сохранения изображений, видео и потоков видео различных форматах (PNG, JPEG, AVI, MP4 и т.д.). Работает как с монотонным изображением, так и с цветным. Что немаловажно, уже имеет встроенные алгоритмы анализа: контурный анализа, фильтрация, сегментация и алгоритмы распознавания, к примеру, каскад Хаара [3].

После проведения полного обучения нейронной сети, а также после ее оптимизации и доработки она будет способная распознавать количество и, что не менее важно, вид рыбы как в реках, так и в рыбоводных фермах Камчатского края. Все библиотеки, используемые при создании и обучении нейронной сети, распространяются со свободной лицензией и имеют свободный доступ к исходному коду. Все этапы разработки нейросети выполняются самостоятельно. Разработка и обучение нейронной сети является трудной, но выполнимой задачей. На ранних этапах ее создания требуется доступ к тренировочному датасету из большого количества видео и фотоматериала рыбы в реках и рыбоводных фермах. На этапе внедрения потребуется доступ к различным способам фото- и видеofиксации, например к дронам или видеокамерам, что подразумевает под собой немалые вложения.

### Литература

1. Итоги года: 2023 год на Камчатке стал рекордным по вылову рыбы [Электронный ресурс] // КамчатИнформ. – URL: <https://kaminform.online/news/itogi-goda-2023-god-na-kamchatke-stal-rekordnym-po-vyovu-ryby.html>.
2. Проект «Распознавание рыбы» [Электронный ресурс] // Nord Clan. – URL: <https://nordclan.com/projects/fish-recognition>.
3. Ефремов А.А. Распознавание лиц с использованием искусственных нейронных сетей [Электронный ресурс] // Хабр. – 2014. – URL: <https://habr.com/ru/articles/208092/>.

УДК 004.9:338.48

**А.А. Косенков**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: sasha.kosenkov20@mail.ru*

## **МОНИТОРИНГ ТУРИСТИЧЕСКИХ ГРУПП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ДРОНОВ**

В статье рассматривается применение беспилотных дронов для мониторинга туристических групп в удаленных регионах, таких как Камчатка. Разработанное веб-приложение использует радиомаяки, которыми оснащены вожатые, для автоматизированного сбора и обработки данных о местоположении туристов. Протокол MQTT обеспечивает передачу данных в реальном времени, а полученные координаты отображаются на карте с использованием API Leaflet. В экстренных ситуациях система может автоматически оповещать спасательные службы и задействовать дронов с компьютерным зрением для поиска потерявшихся туристов и оказания первой помощи. В статье описаны используемые технологии и инструменты, такие как React.js, Flask, PostgreSQL и SQLAlchemy. Применение данных методов позволяет повысить безопасность туристических групп и оптимизировать процесс реагирования на чрезвычайные ситуации.

**Ключевые слова:** мониторинг туристов, беспилотные дроны, радиомаяки, компьютерное зрение, Камчатка, безопасность туризма, автоматизация, MQTT, Leaflet, экстренные службы.

**A.A. Kosenkov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: sasha.kosenkov20@mail.ru*

## **MONITORING OF TOURIST GROUPS USING UNMANNED DRONES**

The use of unmanned drones to monitor tourist groups in remote regions such as Kamchatka is discussed. The developed web application uses beacons, which are equipped with counselors, for automated collection and processing of data on the location of tourists. The MQTT protocol provides real-time data transmission, and the received coordinates are displayed on the map using the Leaflet API. In emergency situations, the system can automatically alert rescue services and use drones with computer vision to search for lost tourists and provide first aid. The technologies and tools used, such as React.js, Flash, PostgreSQL and SQLAlchemy are described. The use of these methods makes it possible to increase the safety of tourist groups and optimize the emergency response process.

**Key words:** monitoring of tourists, unmanned drones, radio beacons, computer vision, Kamchatka, tourism safety, automation, MQTT, Leaflet, emergency services.

Камчатка, с ее уникальной и часто суровой природой, является одним из популярных направлений для экстремального туризма. Однако удаленность и сложность маршрутов требуют усиленного внимания к безопасности туристов. В настоящее время туристические агентства и спасательные службы сталкиваются с рядом проблем, таких как необходимость постоянного мониторинга туристических групп и быстрая реакция на чрезвычайные ситуации [1].

Цель данного исследования – создание системы мониторинга туристических групп с использованием беспилотных дронов и радиомаяков. Основная задача системы – автоматизировать процесс отслеживания местоположения туристов и оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации, что повышает уровень безопасности.

Основные задачи исследования:

1. Разработать веб-приложение для мониторинга туристических групп.
2. Интегрировать дроны [1] с функцией компьютерного зрения для поиска и оказания помощи туристам.
3. Обеспечить автоматическое оповещение спасательных служб при чрезвычайных ситуациях.

Перед разработкой системы необходимо было решить несколько ключевых задач. Во-первых, требовалось наладить автоматический сбор и обработку данных от радиомаяков, которые используются водителями для отслеживания местоположения туристических групп. Во-вторых, нужно было интегрировать беспилотные дроны, оснащенные компьютерным зрением, для поиска пропавших туристов и оказания первой помощи. В-третьих, требовалось обеспечить возможность автоматического оповещения спасательных служб при обнаружении чрезвычайных ситуаций [2].

Для решения поставленных задач была разработана система с использованием следующих технологий:

- **Frontend:** React.js – популярный фреймворк для создания динамических пользовательских интерфейсов [3].
- **Backend:** Flask – легковесный веб-фреймворк на Python, обеспечивающий связь между фронтендом и базой данных [3].
- **База данных:** PostgreSQL – реляционная СУБД для хранения данных о пользователях, маяках и их сеансах.
- **MQTT-протокол:** для приема данных от радиомаяков в реальном времени, обеспечивает эффективную и быструю передачу сообщений [4].
- **SQLAlchemy:** ORM для работы с базой данных.
- **Leaflet API:** для динамического отображения местоположения туристов на карте [5].
- **Беспилотные дроны:** оборудованы модулями компьютерного зрения для обнаружения людей и оценки состояния группы [6].

#### Описание классов

В системе задействованы несколько классов, каждый из которых отвечает за различные аспекты функционала:

- **Position.** Этот класс хранит данные о координатах радиомаяков (широта и долгота) и времени получения этих данных. Он является ключевым элементом для отслеживания туристических групп на карте.
- **Role и User.** Эти классы формируют основу системы ролевого доступа. Каждый пользователь может иметь одну или несколько ролей (рядовой пользователь, администратор, наблюдатель), что определяет их уровень доступа в системе. Важной частью функционала является возможность безопасного хранения паролей с использованием хеширования с помощью библиотеки bcrypt.
- **Beacon.** Этот класс хранит информацию о каждом радиомаяке, включая уникальные идентификаторы устройства и MQTT-топиков, используемых для передачи сообщений.
- **Seance.** Этот класс управляет сессиями пользователей и маяков, фиксируя начало и конец сессии, а также предоставляет дополнительное описание. Связь между пользователями и маяками осуществляется через сессии, что позволяет отслеживать активные группы в реальном времени.

**Обработка данных и передача через MQTT.** Основная функция системы – это обработка данных, поступающих от радиомаяков, с использованием протокола MQTT. Данный протокол был выбран из-за его высокой эффективности и способности обеспечивать быструю передачу сообщений с минимальными задержками. Как только радиомаяк отправляет координаты, они поступают на сервер через брокера MQTT, обрабатываются и передаются в базу данных, а затем отображаются на карте в интерфейсе пользователя. Использование SQLAlchemy как ORM упрощает взаимодействие с базой данных PostgreSQL, позволяя безопасно и быстро сохранять данные о местоположении и сессиях (рисунок).

```
class Beacon(db.Model):
    id = db.Column(db.Integer, primary_key=True)
    id_device = db.Column(db.String(100), nullable=False)
    id_mqtt = db.Column(db.String(100), nullable=False)
    message = db.Column(db.String(300), nullable=True)
```

Описание класса Beacon

Класс Beacon содержит информацию о каждом устройстве, включая его уникальный идентификатор и MQTT-топик, что позволяет передавать и обрабатывать сообщения.

#### **Модули системы**

Система разделена на несколько модулей:

- **Модуль обработки данных маяка:** отвечает за сбор данных координат и их последующую передачу через MQTT.
- **Модуль мониторинга:** динамически обновляет координаты на карте. Используя Leaflet API, система визуализирует перемещение групп на карте, обновляя данные в реальном времени.
- **Модуль управления пользователями и ролями:** позволяет администратору управлять доступом пользователей, назначать роли, добавлять или удалять маяки, а также контролировать их статус.

**Применение беспилотных дронов.** Одной из ключевых особенностей системы является использование дронов в случае чрезвычайных ситуаций. Дроны оснащены компьютерным зрением на основе ИИ, работающим на платформе Raspberry Pi 4. При поступлении сигнала о ЧС дрон автоматически отправляется на место последнего полученного сигнала от радиомаяка. С помощью компьютерного зрения дрон ищет туристов, а при обнаружении передает информацию в спасательные службы. Кроме того, дрон может сбросить набор первой помощи.

Этот модуль все еще находится в стадии разработки, однако он представляет собой важный шаг в повышении уровня безопасности туристов на труднодоступных маршрутах.

**Пользовательские роли.** Система предоставляет три основные роли:

- **Рядовой пользователь:** может отслеживать свою туристическую группу в реальном времени, просматривая данные о местоположении на карте. Пользовательский интерфейс разработан с использованием React.js [7], что обеспечивает удобную и интуитивно понятную работу с картой.
- **Администратор:** имеет доступ ко всем маякам в системе. Он может добавлять новые устройства, удалять существующие и управлять данными о пользователях. Администратор отвечает за настройку системы и обеспечение ее стабильной работы.
- **Наблюдатель:** может подписаться на конкретного пользователя и отслеживать его местоположение с его разрешения. Это полезная функция для тех, кто хочет обеспечить безопасность своих близких или туристов.

Разработанная система позволяет туристическим агентствам в реальном времени отслеживать местоположение туристов на карте. Использование протокола MQTT обеспечивает непрерывную передачу данных, а Leaflet API визуализирует координаты групп [4, 5]. Система автоматически обновляет местоположение, предоставляя актуальную информацию.

На данный момент продолжается разработка функционала автоматического оповещения спасательных служб при поступлении сигнала о чрезвычайной ситуации. Дроны с компьютерным зрением могут быть развернуты для поиска и оказания помощи в сложных и удаленных районах.

Среди преимуществ системы можно выделить:

- повышение уровня безопасности туристов,
- автоматизацию процесса мониторинга,
- быструю реакцию в чрезвычайных ситуациях благодаря дронам и радиомаякам.

Созданная система мониторинга туристических групп с использованием дронов и радиомаяков предоставляет агентствам мощный инструмент для обеспечения безопасности на туристических маршрутах. Основные задачи – автоматизация отслеживания групп и оперативное реагирование на чрезвычайные ситуации – успешно реализованы. В дальнейшем планируется расширение функционала системы, включая улучшение алгоритмов поиска пропавших туристов и внедрение автоматической системы отправки сигналов о чрезвычайных ситуациях в спасательные службы.

Таким образом, внедрение такой системы на Камчатке может существенно повысить безопасность туризма в этом удаленном и сложном регионе.

#### **Литература**

1. Новиков А.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в обеспечении безопасности туризма. – М.: Изд-во МГУ, 2019. – 256 с.

2. *Костин В.П., Лобанов Н.И.* Протоколы передачи данных для интернета вещей. – СПб.: Политехника, 2018. – 198 с.
3. *Breiman L.* Random Forests. Machine Learning. – 2001. – № 45(1). – P. 5–32.
4. MQTT Protocol for Real-Time Data Transmission in Tourism Applications. International Journal of Technology and Tourism. – 2021. – Vol. 15. – P. 12–25.
5. Documentation: Leaflet.js, Open-source library for interactive maps. – URL: <https://leafletjs.com>.
6. *Johnson M., Kato Y.* Drone-based systems for search and rescue operations in remote areas. – Journal of Emergency Management. – 2020. – Vol. 18, Iss. 4. – P. 45–56.
7. Flask Documentation: Web Development, One Drop at a Time. – URL: <https://flask.pallets-projects.com>.



УДК [581.526.325+591.524.12](265.5)'2024'

Л.В. Курбанова<sup>1,2</sup>, Т.А. Клочкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003;

<sup>2</sup> Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683000  
e-mail: tatyana\_algae@mail.ru

## ЦВЕТЕНИЕ ФИТО- И ЗООПЛАНКТОНА В АВАЧИНСКОЙ ГУБЕ (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА) В 2024 ГОДУ

В статье обсуждаются данные подсчета количества клеток планктона в водах Авачинской губы в регулярные промежутки времени с 12.05.2024 г. по 23.10.2024 г., а также анализ цветения воды по архивным спутниковым снимкам, выгруженным с портала SoarEarth. По нашим наблюдениям, вызывающая «красные приливы» морская инфузория *Myrionecta rubra* Jankowski и ее пища – криптомонады, – присутствуют в воде круглогодично, распространены по всей водной толще. Осенний пик цветения пришелся на 08.10.2024 г., когда численность *M. rubra* на поверхности составила 8 млн 863 тыс. кл./литр. Суммарное количество клеток планктона в этот день составило 58 911 600 кл./литр, в их число входили криптомонады, диатомея *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve (42 млн 45 тыс. кл./литр), динофлагеллят *Amylax triacantha* (Jørgensen) Sournia, церкозои *Ebria tripartita* (Schumann) Lemmermann, личинки полихеты *Polydora limicola* Annenkova, брюхожесничная инфузория *Stylonychia mytilus* Ehrenberg, медузы *aff. Eutonina* sp. Наши исследования показали, что массовому «цветению» *M. rubra* в Авачинской губе постоянно сопутствует наиболее активное размножение криптомонад. Цветение мирионекты не должно рассматриваться как безопасное в регионе, поскольку в морской трофической цепи ей принадлежит промежуточное место и за ее массовым развитием может следовать цветение других микроорганизмов, в том числе питающихся мирионектой токсичных динофлагеллят и диатомовых водорослей. Для снижения частоты и интенсивности «цветений» Авачинской губы необходимы постоянный контроль за численностью и структурой планктона и снижение на нее антропогенной нагрузки\*.

**Ключевые слова:** Авачинская губы, динофлагелляты, «красные приливы», криптомонады, мирионекта, пищевая цепь, планктон, спутниковые снимки, экосистема, *Myrionecta rubra*.

L.V. Kurbanova<sup>1,2</sup>, T.A. Klochkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003;

<sup>2</sup> Kamchatka Branch of Pacific Geographical Institute FEB RAS,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000  
E-mail: tatyana\_algae@mail.ru

## PHYTO- AND ZOOPLANKTON BLOOM IN THE AVACHA BAY (SOUTHEAST KAMCHATKA) IN 2024

In this paper, we discuss personally collected data on the number of plankton cells from the Avacha Bay estimated at regular intervals from 12.05.2024 to 23.10.2024. We also analysed the seawater blooming in this bay based on archival satellite images downloaded from the SoarEarth portal. Our observations revealed that the marine ciliate *Myrionecta rubra* Jankowski, which causes red tides, and its food – cryptomonads – are present in the seawater all year round and distributed throughout the seawater column. The autumn bloom's peak occurred on 08.10.2024, when the number of *M. rubra* on the seawater surface made 8 million 863 thousand cells/liter. The total number of plankton cells counted on this day was 58,911,600 cells/liter, including cryptomonads, diatom

\* Авторы выражают благодарность сотрудникам КФ ТИГ ДВО РАН д.б.н. Н.Г. Клочковой за полезные комментарии и вопросы по тексту статьи и д.б.н. С.Г. Коростелеву за содействие в организации сбора проб. Работа подготовлена в рамках выполнения проектов «Морская экология: Разработка биотехники выращивания бурых водорослей Камчатского края для санитарной марикультуры и восстановления их естественных популяций» (Пер. № НИОКТР 122040600047-4) и «Исследование и сохранение уникального морского биоразнообразия Камчатки» (Пер. № 124093000049-8).

species *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve (42 million 45 thousand cells/liter), dinoflagellate *Amylax triacantha* (Jørgensen) Soumia, cercozoan *Ebria tripartita* (Schumann) Lemmermann, polychaete larvae *Polydora limicola* Annenkova, gastrociliated ciliate *Stylonychia mytilus* Ehrenberg, and jellyfish aff. *Eutonina* sp. As our studies showed, massive blooming of *M. rubra* in the Avacha Bay is constantly accompanied by the most active reproduction of cryptomonads. Thus the blooming of *M. rubra* should not be considered safe in this region, since this ciliate occupies an intermediate place in the marine trophic chain and its massive development can be followed by a blooming of other microorganisms, including toxic dinoflagellates and diatoms that feed on *M. rubra*. To reduce the frequency and intensity of plankton blooming in the Avacha Bay, it is necessary to constantly monitor the number and structure of plankton and reduce the anthropogenic load on the bay.

**Key words:** Avacha Bay, dinoflagellates, red tides, cryptomonads, food chain, plankton, satellite images, ecosystem, *Myrionecta rubra*.

В последние десятилетия «красные приливы», т. е. визуально наблюдаемое изменение цвета воды на поверхности моря, вызванное массовым размножением планктона, приобретают характер глобальной эпидемии. В отдельных районах Мирового океана цветение воды настолько интенсивное, что возможно определить семейственную и родовую принадлежность планктона по цветовой гамме флуоресценции пигмента с помощью метода спутникового дистанционного зондирования [1]. Массовому размножению планктона во многом способствует антропогенная эвтрофикация прибрежных вод и внутренних морей. Помимо антропогенного воздействия во всем мире наблюдаются естественные изменения морских экосистем, связанные с глобальными изменениями климата. Они сопровождаются изменениями ареалов видов, состава и структуры донных и планктонных сообществ, появлением видов-вселенцев.

Проблема «красных приливов» актуальна для всей Восточной Камчатки. Впервые зафиксированные здесь в 1945 г. между мысами Олюторский и Наварин, с конца 1980-х гг. они стали интенсивными и устойчивыми [2–4]. В Авачинской губе цветение воды стало практически круглогодичным с 1990-х гг., прерываясь с небольшими промежутками между сезонными пиками. При этом экологическое состояние планктона прикамчатских вод полноценно не контролируется и опубликованные данные по его количественному составу имеют скорее эпизодический, чем регулярный характер.

Внимание к Авачинской губе обусловлено тем, что на ее берегах расположена городская агломерация Петропавловск – Елизово – Вилючинск, где сосредоточена большая часть промышленного потенциала Камчатки и живет основная масса населения региона. В Авачинскую губу впадают реки, несущие с водосборной площади отходы сельскохозяйственных предприятий и фермерских хозяйств. В будущем в связи с планируемым освоением Северного морского пути (СМП) на ее берегах планируется строительство одного из основных транспортных узлов – порта-хаба с функцией перевалочной и снабженческой базы СМП. В связи с этим можно прогнозировать, что антропогенная нагрузка на водоем будет возрастать.

За последние 50 лет Авачинская губа уже потеряла большую часть своего бывшего биоразнообразия [5, 6]. Здесь кардинально изменились состав макро- и мейобентоса, населяющая мягкие грунты флора и фауна, планктон. На большинстве участков береговой линии прибрежные сообщества уже давно потеряли свой природный облик [7, 8]. Начальные стадии их деградации наблюдаются на участках побережья, прилегающих к Авачинской губе.

Еще 29 лет назад, в 1995 г., сообщалось, что в Авачинской губе «красные приливы» преимущественно вызываются обильным размножением морской инфузории *Myrionecta rubra* Janowski [2]. Подсчет количества клеток систематически не проводился, и характеристика явления чаще была описательной и квалифицировалась как «высокая плотность популяции» (в данном случае клеток *M. rubra*) В последние годы в СМИ и на сайтах камчатских научных организаций о вспышках *M. rubra* сообщалось достаточно регулярно и указывалось, что «численность потенциально вредоносных микроводорослей мала, поэтому обследованные акватории опасности в данный момент не представляют» [9, 10].

Но настолько ли безопасно круглогодичное цветение *M. rubra* в Авачинской губе? Может ли оно служить сигналом того, что загрязнение Авачинской губы в последние несколько лет критически ускорилось и экологическая устойчивость бухты и ее способность к поддержанию природного равновесия снижаются еще более стремительно?

Для выяснения этого вопроса мы провели подсчет количества клеток планктона в водах Авачинской губы в районе 3-го причала Петропавловск-Камчатского морского торгового порта (ст. 1; рис. 1, Б) и на трех дополнительных станциях (ст. 2–4; рис. 1, Б) в регулярные промежутки времени с 12.05.2024 г. по 23.10.2024 г., т. е. в течение приблизительно 5,5 месяца. Условно это время можно разделить на поздневесенний, летний и осенний периоды. Пробы отбирали батометром Молчанова ГР-18 в поверхностном и придонном слоях на глубине от 12 до 23,3 м, как показали данные судового эхолота. Клетки планктона просчитывали в счетной камере Sedgewick-Rafter объемом 1 мл. Под плотностью планктона понимали количество клеток в литре воды. Для подсчета подвижных клеток пробы фиксировали в слабом растворе формальдегида. Камеральную обработку проб проводили с помощью микроскопов «VanGuard» 1113 АМН и Olympus BX53 с цифровой фотокамерой Olympus DP73 с программным обеспечением Cell Sens Standard (Olympus, Japan).

Для анализа цветения воды использовали архивные спутниковые снимки Авачинской губы, выгруженные с портала SoarEarth [11]. Снимки были сделаны с помощью сенсора Sentinel-2 с разрешением 10 м на 1 пиксель (рис. 1, А – Д). На портале SoarEarth просматривали все снимки района за период с мая по октябрь 2024 г. После отбраковки снимков с облачностью, бликами, сильным волнением выбрали четыре изображения, на которых заметно обильное цветение в бухте, видимое со спутника как полосы и пятна на водной поверхности (рис. 1, А – Д).

По нашим наблюдениям, *M. rubra* и ее пища – криптомонады – присутствуют в воде круглогодично, распространены по всей водной толще, поскольку встречались в пробах с поверхностного и придонного слоя. До начала отчетливо видимой фазы цветения, которое в 2024 г. началось в первые дни сентября, численность *M. rubra* (на 30.07.24) составила 330 кл./литр. При этом на снимке Авачинской губы с портала SoarEarth еще в конце июня отчетливо видно изменение цвета воды, полосы и большое зеленое пятно, занимающее практически 2/3 ее площади (рис. 1, А). На фотографиях, сделанных с самолета в конце июля 2024 г., также видно, что вода в Авачинской губе окрашена в желто-горчичный и зеленоватый цвета. Таким образом, в те месяцы это была не *M. rubra*, а другие планктонные организмы. Информация о них будет приведена нами в отдельной публикации. На снимке, сделанном в августе, уже видны желто-зеленые полосы вдоль побережья, расположенного напротив г. Петропавловска-Камчатского (рис. 1, Б), при этом численность *M. rubra* оставалась стабильно низкой и вода в красный цвет окрашена не была.

Обильное цветение *M. rubra* началось в начале сентября (рис. 1, В) и продолжилось до конца октября (рис. 1, В – Г). Так, с 11.09.2024 г. по 13.09.2024 г., т. е. всего за двое суток, численность *M. rubra* только в поверхностном слое воды в районе сбора проб в Авачинской губе увеличилась в 2,5 раза – с 182 тыс. кл./литр до 456 тыс. кл./литр. Уже через трое суток, т. е. 16.09.2024 г., численность клеток возросла в пять раз и составила 2 млн 333 тыс. кл./литр.

Скачков повышения и последующего понижения численности клеток (в период с 11.09.2024 г. по 23.10.2024 г.) было несколько, пик цветения пришелся на 08.10.2024 г., когда численность *M. rubra* на поверхности составила 8 млн 863 тыс. кл./литр, т. е. в 48,6 раза больше, чем месяцем ранее. Затем через трое суток после 08.10.24 численность клеток пошла на понижение и составила 1 млн 409 тыс. кл./литр. Через шесть суток, к 17.10.24 г., она снова повысилась до 3 млн 640 тыс. кл./литр). При этом стоит особо отметить, что *M. rubra* не была единственным видом в наших пробах. Суммарное количество клеток планктона в пробах, собранных в пик его цветения 08.10.2024 г., составило 58 911 600 кл./литр, в их число входили криптомонады, диатомовые *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve (массовый вид, по численности превосходивший *M. rubra* в 4,7 раза и составивший 42 млн 45 тыс. кл./литр), *Amylax triacantha* (Jørgensen) Sournia, *Ebria tripartita* (Schumann) Lemmermann, личинки полихеты *Polydora limicola* Annenkova, брюхохоресничая инфузория *Stylonychia mytilus* Ehrenberg, медузы aff. *Eutonina* sp.

В настоящее время известно, что вид *M. rubra* не продуцирует токсины, т. е. нетоксичен [12, 13], однако это не делает его массовое цветение безопасным [14, 15]. В научной литературе неоднократно сообщалось о его губительном воздействии на прибрежные экосистемы и объекты открытой марикультуры [16–18]. После отмирания клеток *M. rubra* происходит бактериальное разложение взвешенного и оседающего на дно органического вещества, что вызывает резкое снижение в воде содержания кислорода и появление сероводорода и аммиака. Непрерывающееся поступление гниющей органики способно привести к смертности донных животных, полезных микроорганизмов [19–20], а также к заилению субстрата [8]. В последние несколько лет со стороны моря в г. Петропавловске-Камчатском регулярно доносится ощутимый запах серово-

дорода и аммиака, свойственный разложению органики, причем присутствует он во все сезоны года. Отметим, что наблюдаемое нами массовое развитие *M. rubra* и другого микропланктона отчетливо коррелирует с этим явлением.

Кроме того, как уже было сказано выше, *M. rubra* не цветет в одиночку и представляет собой промежуточное звено в единой трофической цепи видов, формирующих «красный прилив», многие из которых токсичны, в данном случае динофлагелляты.

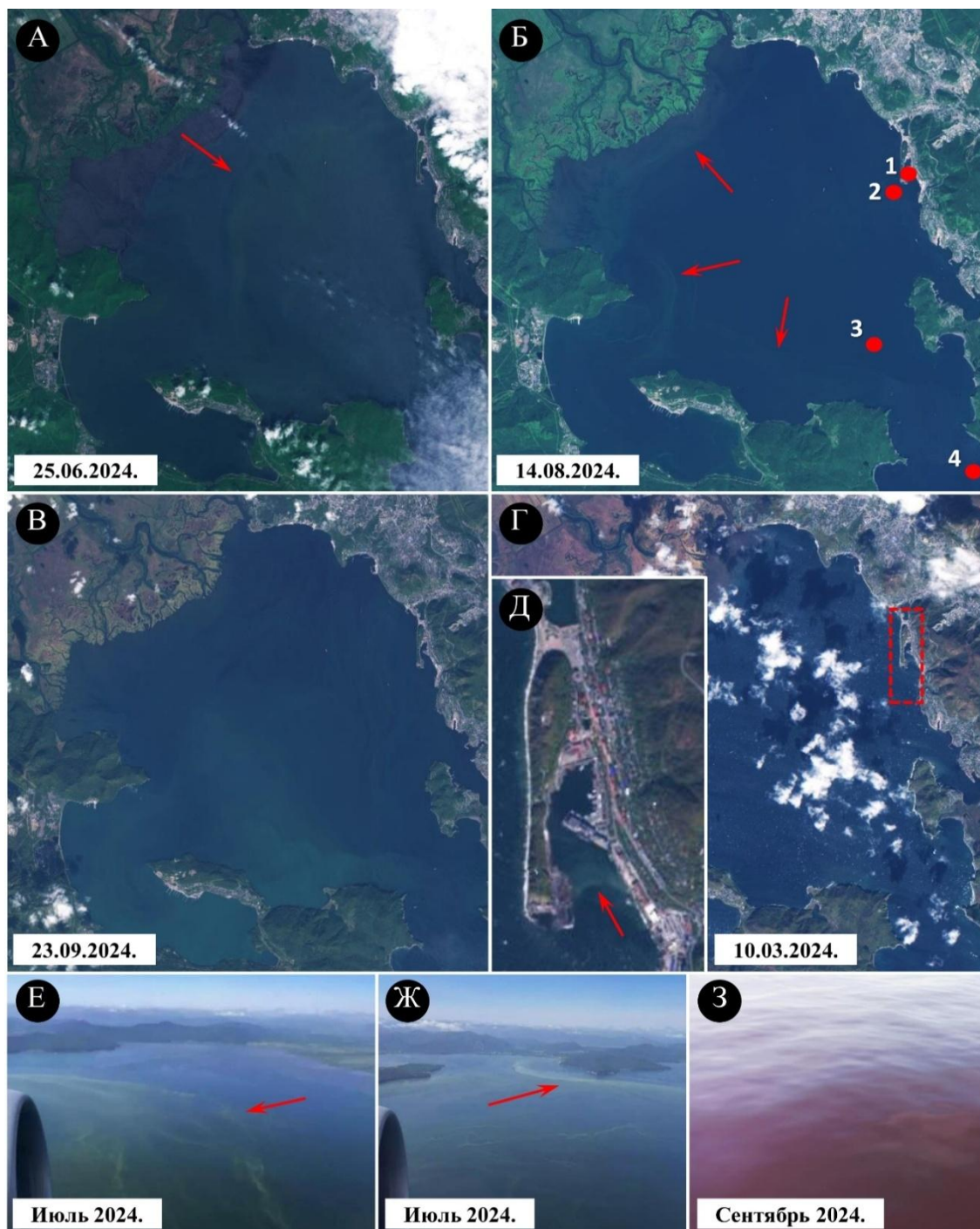


Рис. 1. Цветение воды в Авачинской губе в разные месяцы 2024 г.

Красными точками и номерами 1–4 на рис. Б отмечены места отбора проб.

А – Д – архивные спутниковые снимки, выгруженные с портала SoarEarth. Стрелками показано цветение, видимое со спутника как полосы и обширные пятна на поверхности бухт; В – цветением охвачена вся бухта;

Г – на снимке пунктиром отмечена территория 3-го причала Петропавловск-Камчатского морского торгового порта, охваченная «красным приливом» (увеличено на рис. Д, четко видимая зеленая полоса показана стрелкой);

Е – Ж – цветение воды в бухте, видимое из иллюминатора самолета; З – красный цвет воды в бухте, вызванный массовым размножением *Myrionecta rubra*



Для объяснения этого утверждения отметим, что сама инфузория является облигатным миксотрофом, и для устойчивого фотосинтеза и роста популяции ей требуется употребление в пищу клеток криптононад [21]. Чтобы расти с максимальной скоростью, она съедает одну клетку криптоноады в день, что обеспечивает всего 1–2% от суточной потребности в углероде [22]. Из литературных данных известно, что *M. rubra* способна поддерживать фотосинтетические клептопластиды и ядра криптононад внутри себя в функциональном состоянии в течение 13 недель, при этом попавшие внутрь ее клетки чужеродные органеллы «съеденных» криптононад активно делятся [23].

Наши исследования показали, что массовому «цветению» *M. rubra* в Авачинской губе постоянно сопутствует «цветение» криптононад, тем не менее последние часто вообще не упоминаются и не считаются опасными. Представители этой группы могут быть автотрофами, гетеротрофами и миксотрофами, т. е. питаются бактериями, обильно развивающимися в воде, особенно на фоне антропогенного загрязнения, прежде всего вызванного канализационными стоками, несущими большое количество взвешенной и растворенной органики. Изучение количественного содержания в клетках *M. rubra* представителей этой группы водорослей в период ее массового развития в Авачинской губе показало, что среднее количество клептопластид криптононад в одной инфузории может достигать 20–22 штук. Для удовлетворения такого «аппетита» *M. rubra* необходимо, чтобы популяция поедаемого вида была в несколько раз больше, чем у вида-потребителя.

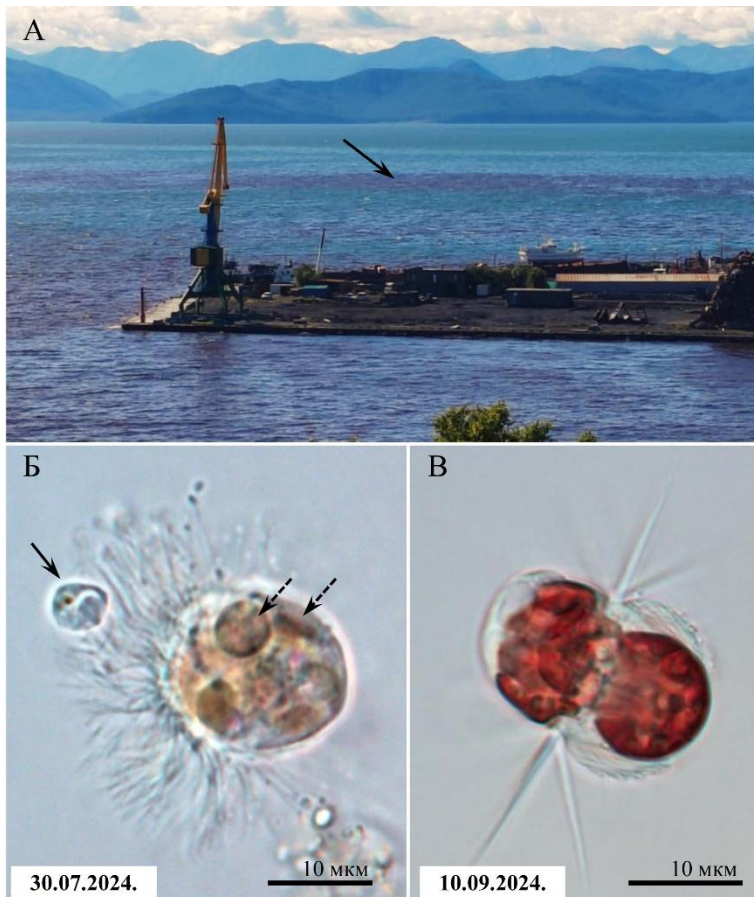


Рис. 2. «Красный прилив» в районе Петропавловск-Камчатского морского торгового порта в сентябре 2024 г. (рис. А, стрелка) и его возбудитель – морская инфузория *Myrionecta rubra* (Б, В);

Б – инфузория с небольшим количеством «съеденных» криптононад внутри нее (показаны пунктирными стрелками). Также одна клетка криптоноады удерживается ресничками инфузории (показано стрелкой);  
В – инфузория с большим количеством живых клептопластид от «съеденных» ею криптононад

В прослеженной нами пищевой цепи *M. rubra*, судя по данным других исследователей, является пищей более крупных динофлагеллят [24, 25] и других планктонных организмов [26–30]. В Авачинской губе Г.В. Коновалова регистрировала 12 токсичных и потенциально токсичных видов и форм динофлагеллят [2]. В связи с изложенным выше обстоятельством – массовом развитии *M. rubra*, происходящем в период наиболее активного размножения криптононад, – цветение вод Авачинской губы, вызванное данным видом инфузорий, не должно рассматриваться как безопасное. В описанной выше трофической цепи ему принадлежит промежуточное место. За его массовым развитием может следовать цветение других микроорганизмов, в том числе пи-

тающихся мирионектой токсичных динофлагеллят и диатомовых водорослей. Для снижения частоты и интенсивности «цветений» Авачинской губы необходим постоянный контроль за численностью и структурой планктона и снижение на нее антропогенной нагрузки.

### Литература

1. The many shades of red tides: Sentinel-2 optical types of highly-concentrated harmful algal blooms / P. Gernez, M.L. Zoffoli, T. Lacour, T.H. Farinas, G. Navarro, I. Caballero, T. Harmel // Remote Sensing of Environment. – 2023. – Vol. 287, № 113486. – P. 1–19.
2. Коновалова Г.В. «Красные приливы» у восточной Камчатки (Атлас-справочник). – Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1995. – 56 с.
3. Токранов А.М. Состав прибрежной ихтиофауны юго-восточной Камчатки после вредоносного цветения водорослей осенью 2020 года // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2022. – № 59. – С. 38–48.
4. Санамян Н.П., Коробок А.В., Санамян К.Э. Качественная оценка последствий влияния вредоносного цветения водорослей осенью 2020 года у побережья Юго-Восточной Камчатки (Северо-Западная Пацифика) на мелководные бентосные сообщества // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2023. – № 63. – С. 22–44.
5. Клочкова Н.Г., Березовская В.А. Макрофитобентос Авачинской губы и его антропогенная деструкция. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 208 с.
6. Очеретяна С.О., Клочкова Н.Г., Клочкова Т.А. Сезонный состав «зеленых приливов» в Авачинской губе и влияние антропогенного загрязнения на физиологию и рост некоторых зеленых водорослей // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2015. – № 33. – С. 30–36.
7. Морская экология: Разработка биотехники выращивания бурых водорослей Камчатского края для санитарной марикультуры и восстановления их естественных популяций. Рег. № НИ-ОКТР 122040600047-4. Этап 1: Отчет о НИР / Т.А. Клочкова, А.Н. Капустин, М.В. Васильев, М.В. Благодрава, Р.Г. Болотова; Федеральное агентство по рыболовству. – 2022. – 112 с.
8. Морская экология: Разработка биотехники выращивания бурых водорослей Камчатского края для санитарной марикультуры и восстановления их естественных популяций. Рег. № НИ-ОКТР 122040600047-4. Этап 2: Отчет о НИР / Т.А. Клочкова, А.В. Климова, М.В. Васильев, Л.А. Позолотина, М.А. Соколов, В.Р. Мунгалова; Федеральное агентство по рыболовству. – 2023. – 85 с.
9. Наука: Цветение водорослей в Авачинской губе пока неопасно. – URL: <https://fishnews.ru/news/45269> (дата обращения: 02.12.2024).
10. Красные полосы Авачинской губы. – URL: [http://kamniro.vniro.ru/presscenter/news/krasnye\\_polosy\\_avachinskoj\\_guby](http://kamniro.vniro.ru/presscenter/news/krasnye_polosy_avachinskoj_guby) (дата обращения: 02.12.2024).
11. Soar. The new Atlas. – URL: <https://soar.earth/> (дата обращения: 02.12.2024).
12. Fenchel T. On “red water” in the Isefjord (inner Danish waters) caused by the ciliate *Mesodinium rubrum* // Ophelia. – 1968. – Vol. 5. – P. 245–253.
13. Lindholm T. *Mesodinium rubrum* – a unique photosynthetic ciliate // Advances in Applied Microbiology. – 1985. – Vol. 3. – P. 1–48.
14. Yoo J.S., Kim Y.H., Lee I.K. Recolonization of the disturbed benthic algal community in Incheon Dock // Korean Journal of Botany. – 1991. – Vol. 34. – P. 165–173 (in Korean).
15. Yoo J.S., Kim Y.H., Lee I.K. Succession of benthic algal community in Dock marine ecosystem perturbed by red tide // Algae. – 1999. – Vol. 14. – P. 181–187 (in Korean).
16. The role of phytoplankton in the dissolved oxygen budget of a stratified estuary / P.G. Soulsby, M. Mollowney, G. Marsh, D. Lowthion // Water Science and Technology. – 1984. – Vol. 17. – P. 145–156.
17. Hayes G.C., Purdie D.A., Williams J.A. The distribution of ichthyoplankton in Southampton Water in response to low oxygen levels produced by a *Mesodinium rubrum* bloom // Journal of Fish Biology. – 1989. – Vol. 34. – P. 811–813.
18. Potential risk of *Mesodinium rubrum* bloom in aquaculture area of Dapeng’ao cove, China: diurnal changes in the ciliate community structure in the surface water / H. Liu, X. Song, L. Huang, Y. Tan, Y. Zhong, J.R. Huanf // Oceanologia. – 2012. – Vol. 54. – P. 109–117.

19. Мангазеев А.В., Клочкова Н.Г., Клочкова Т.А. Использование дистанционного мониторинга для оценки состояния макрофитобентоса Авачинской губы в районе сброса стоков очистных сооружений // Вестник научного центра ВОСТНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2024. – № 3. – С. 80–88.
20. Обратноосмотическая фильтрация молочной творожной сыворотки как способ детоксикации ее выбросов и улучшения функционирования очистных сооружений г. Петропавловска-Камчатского / А.В. Мангазеев, М.В. Васильев, Т.А. Клочкова, Н.Г. Клочкова // Промышленные процессы и технологии. – 2024. – Т. 4, № 1. – С. 28–43.
21. Importance of the mixotrophic ciliate *Myrionecta rubra* in marine ecosystems / G. Myung, H.S. Kim, K.G. Jang, J.W. Park, W. Yih // Sea. – 2007. – Vol. 12. – P. 178–185 (in Korean).
22. Smith M., Hansen P.J. Interaction between *M. rubrum* and its prey: importance of irradiance, prey concentration, and pH // Marine Ecology Progress Series. – 2007. – Vol. 338. – P. 61–70.
23. Cryptophyte gene regulation in the kleptoplastidic karyokleptic ciliate *Mesodinium rubrum* / G.H. Kim, J.H. Han, B. Kim, J.W. Han, S.W. Nam, W. Shun, J.W. Park, W. Yih // Harmful Algae. – 2016. – Vol. 52. – P. 23–33.
24. First successful culture of the marine dinoflagellate *Dinophysis acuminata* / M.G. Park, S. Kim, H.S. Kim, G. Myung, Y.G. Kang, W. Yih // Aquatic Microbial Ecology. – 2006. – Vol. 45. – P. 101–106.
25. Harmful *Dinophysis* species: a review / B. Reguera, L. Velo-Suárez, R. Raine, M.G. Park // Harmful Algae. – 2012. – Vol. 14. – P. 87–106.
26. Rassmussen E. Systematics and ecology of the Isefjord marine fauna (Denmark) // Opelia. – 1973. – Vol. 11. – P. 1–507.
27. Jimenez R., Intriago P. Observation blooms of *Mesodinium rubrum* in the upwelling area off Ecuador // Oceanologica Acta, Supplementum 1987. Proceedings of the International Symposium on Equatorial Vertical Motion, Paris, 6–10 May 1985. – 1987. – P. 145–154.
28. Sullivan L.J., Gifford D.J. Diet of the larval ctenophore *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz (Ctenophora, Lobata) // Journal of Plankton Research. – 2004. – Vol. 26, Iss. 4. – P. 417–431.
29. Rapid feeding on live organisms of the phototrophic ciliate *Mesodinium rubrum* by Farrer's Scallop *Chlamys farreri* / W. Yih, H.S. Kim, G. Myung, Y.G. Kim // Journal of Marine Biotechnology. – 2004. – Vol. 6. – P. 142–145.
30. Liu H., Dagg M.J., Strom S. Grazing by the calanoid copepod *Neocalanus cristatus* on the microbial food web in the coastal Gulf of Alaska // Journal of Plankton Research. – 2005. – Vol. 27. – P. 647–662.

УДК 534.1

**Ю.А. Лапин, М.В. Грибиниченко**

*Дальневосточный федеральный университет,  
Владивосток, 690922  
e-mail: lapin.iaa@dvfu.ru*

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРОПУЛЬСИВНОМ КОМПЛЕКСЕ С МОД ПРИ МЕДЛЕННОМ И БЫСТРОМ ПРОХОДЕ РЕЗОНАНСНОЙ ЗОНЫ**

В работе описано экспериментальное исследование крутильных колебаний в пропульсивном комплексе с малооборотным дизельным двигателем на переходных и стационарных рабочих режимах. Исследование проводилось во время натурных испытаний пропульсивного комплекса контейнеровозного судна «Транзит Тавайза». Приведены зависимости амплитуд напряжений крутильных колебаний в промежуточном валу пропульсивного комплекса от частоты вращения двигателя при быстром разгоне двигателя, при быстром торможении и плавном проходе. Описан исследуемый пропульсивный комплекс, приведена его крутильная схема и относительные амплитуды валопроводной формы крутильных колебаний. Описана используемая измерительная система.

**Ключевые слова:** крутильные колебания, торсиографирование, пропульсивный комплекс, малооборотный дизель.

**Yu.A. Lapin, M.V. Gribinichenko**

*Far Eastern Federal University,  
Vladivostok, 690922  
e-mail: lapin.iaa@dvfu.ru*

### **EXPERIMENTAL STUDY ON TORSIONAL VIBRATIONAL IN PROPULSION PLANT WITH LOW SPEED DIESEL ENGINE DURING SLOW AND FAST PASSING THROUGH RESONANT ROTATING SPEED**

The experimental torsional vibrations study in a propulsion plant with a low-speed diesel engine in transient and stationary operating modes is described. The study was conducted during sea trials of the container ship "Transit Tawaiza" propulsion plant. Torsional vibration stress amplitudes dependences in the intermediate shaft of the propulsive complex on the engine speed during rapid acceleration of the engine, during rapid braking and smooth passage are given. The investigated propulsive complex is described, its mass-elastic system and torsional vibration shaft conducted shape relative amplitudes are given. The measuring system used is described.

**Key words:** torsional vibrations, torsional vibration measurement, propulsion plant, low-speed diesel engine.

Малооборотные дизели используются в качестве главных на многих крупных морских транспортных судах. Обширное применение этих двигателей обусловлено их высокой экономичностью, надежностью, высоким моторесурсом. Малооборотный дизельный двигатель (МОД), имея худшие показатели удельной мощности (кВт/кг), чем средне- и высокооборотные дизельные двигатели (ВОД и СОД), позволяет осуществлять прямую передачу мощности на винт. В результате этого упрощается конструкция главного пропульсивного комплекса, упрощается его техническое обслуживание.

Одним из недостатков пропульсивных комплексов с МОД является присутствие в установке опасных резонансных крутильных колебаний I формы. I форма крутильных колебаний является валопроводной – то есть узел находится на промежуточном, упорном или гребном валу. Характерная особенность этой формы крутильных колебаний в том, что ее частота находится в пределах 4–6 Гц (исходя из опыта работы авторов). В результате этого в рабочем диапазоне малооборотных дизелей имеются резонансы главных моторных порядков с этой формой колебаний.



Под главным моторным порядком понимается порядок вынужденных колебаний, кратный числу цилиндров для двухтактных двигателей и равный числу вдвое меньшему, чем число цилиндров для четырехтактных двигателей. Резонанс главного порядка малооборотного дизеля с валопроводной формой часто приводит к появлению опасных напряжений, превышающих допусковые для длительной работы и назначению запретных зон частот вращения.

Ввиду низкой частоты свободных колебаний применение силиконовых демпферов часто неэффективно для гашения крутильных колебаний валопроводной формы установок с МОД и прямой передачей. Размеры демпфера получаются чрезмерно большими. Проектировщики таких пропульсивных комплексов чаще стараются сместить эту форму в зону между минимальной устойчивой частотой вращения двигателя и частотой вращения, соответствующей малому ходу. Это достигается путем применения пружинных демпферов или тяжелых маховиков, устанавливаемых на свободный фланец коленчатого вала. В результате этого в рейсе двигатель быстро проходит запретную зону, после чего эксплуатируется за ее пределами. Во время маневров и реверсов двигатель проходит через запретную зону многократно во время разгонов и торможений. Российскими исследователями подтверждено, что работа судовых двигателей на нестационарных режимах и их динамика на этих режимах требует специального рассмотрения. [1–5]. Исследование развития крутильных колебаний в пропульсивных комплексах малооборотных судов на различных режимах работы является актуальной задачей.

Целью данной работы является экспериментальное исследование развития крутильных колебаний, возникающих в пропульсивном комплексе судна с МОД, при медленном прохождении резонансных зон по правилам процедуры торсиографирования и при быстром проходе резонансных зон во время маневров.

#### Исследуемый пропульсивный комплекс

Экспериментальное исследование проводилось на контейнеровозном судне «Транзит Тавайза». Общий вид пропульсивного комплекса судна приведен на рис. 1.

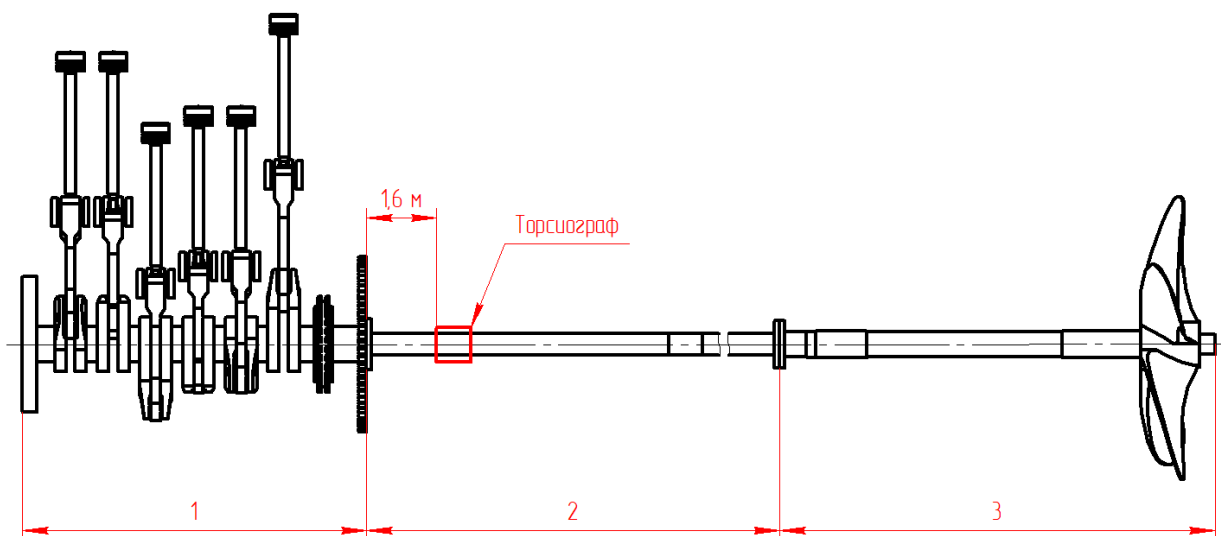


Рис. 1. Общий вид исследуемого пропульсивного комплекса:  
1 – главный двигатель; 2 – промежуточный вал; 3 – гребной вал

Главный двигатель – фирмы MAN Energy Solution 6S60-ME-C10.5, имеет номинальную мощность 11 500 кВт при 105 об/мин. В систему управления двигателем установлена заводская оптимизация для работы на малых нагрузках. За счет электронного управления степень сжатия на малых нагрузках достигает 20, уменьшаясь до 15,5 при номинальной нагрузке.

Расчетная крутильная схема данного пропульсивного комплекса состоит из 14 масс и приведена на рис. 2.

Валопроводная форма крутильных колебаний имеет собственную частоту 4,36 Гц. Относительные амплитуды этой формы колебаний приведены на рис. 3.

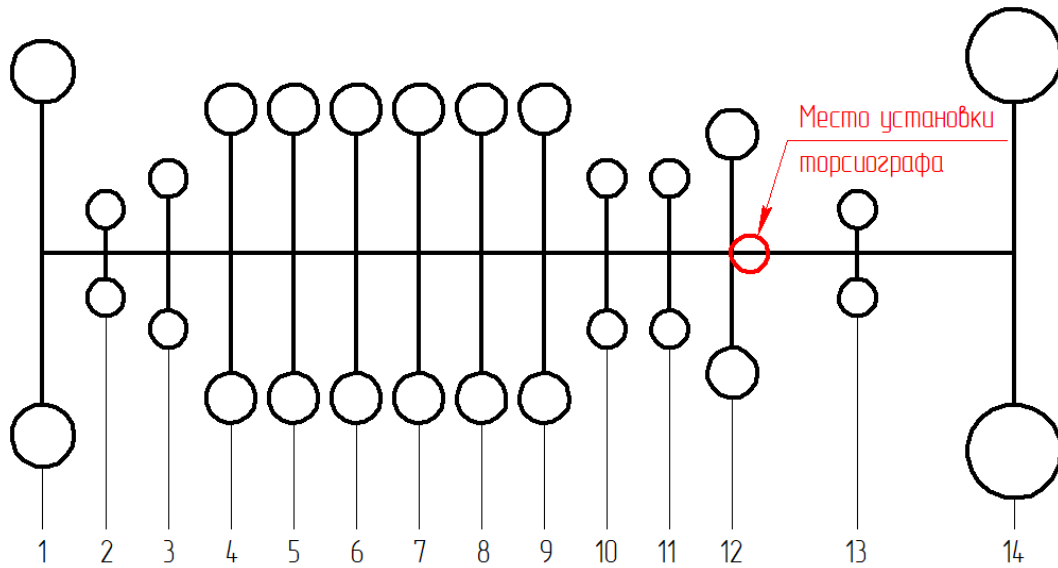


Рис. 2. Крутильная схема исследуемого пропульсивного комплекса:

- 1 – маховый диск для снижения частоты крутильных колебаний; 2 – фланец; 3 – компенсатор момента;  
 4 – кривошип № 1; 5 – кривошип № 2; 6 – кривошип № 3; 7 – кривошип № 4; 8 – кривошип № 5;  
 9 – кривошип № 6; 10 – упорный подшипник + цепной привод вспомогательных механизмов;  
 11 – компенсатор момента; 12 – маховик; 13 – фланец; 14 – гребной винт

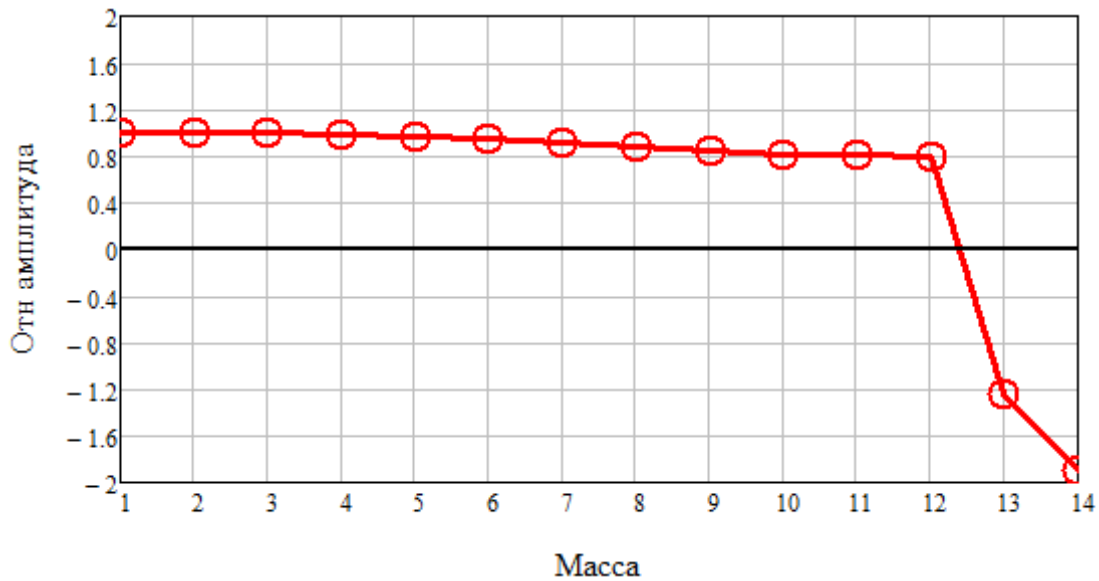


Рис. 3. Относительные амплитуды масс валопроводной формы крутильных колебаний (4,36 Гц)

### Измерительное оборудование

Для измерения крутильных колебаний использовалась система измерения российской фирмы ZETLAB на базе трехосевых акселерометров. Крутильные колебания определяются тангенциальной осью измерений акселерометра. При равномерном вращении вала, при отсутствии крутильных колебаний, временной сигнал с акселерометра будет представлять собой синусоиду, имеющую амплитуду  $9,81 \text{ м/с}^2$  и период, равный периоду одного оборота вала. При возникновении крутильных колебаний на оборотной синусоиде появится обертоном с частотой крутильных колебаний. Метод измерения крутильных колебаний при помощи акселерометров приведен в различных работах [6–9]. Расположение системы на валопроводе показано на рис. 4 и на рис. 2.

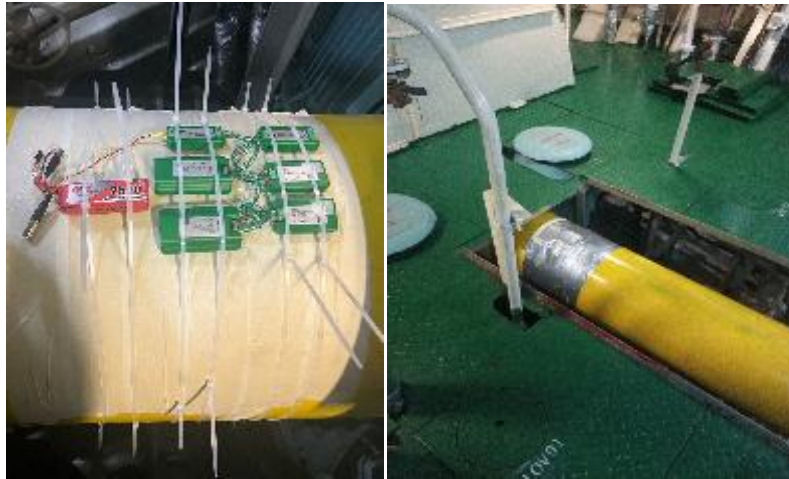


Рис. 4. Расположение измерительной системы на валопроводе

### Ход испытаний

Запись системы начата с момента установки прибора на промежуточный вал. Был записан весь период торсиографирования – плавный разгон и плавное торможение двигателя, а также все пуски, остановки, реверсы главного двигателя в период движения судна к месту испытаний и движения к месту стоянки после испытаний.

### Анализ полученных результатов

В результате анализа полученных записей были построены зависимости амплитуд и напряжений крутильных колебаний, возникающих в валопроводе при плавном проходе резонансной зоны, а также при быстром разгоне и быстром торможении (рис. 5).

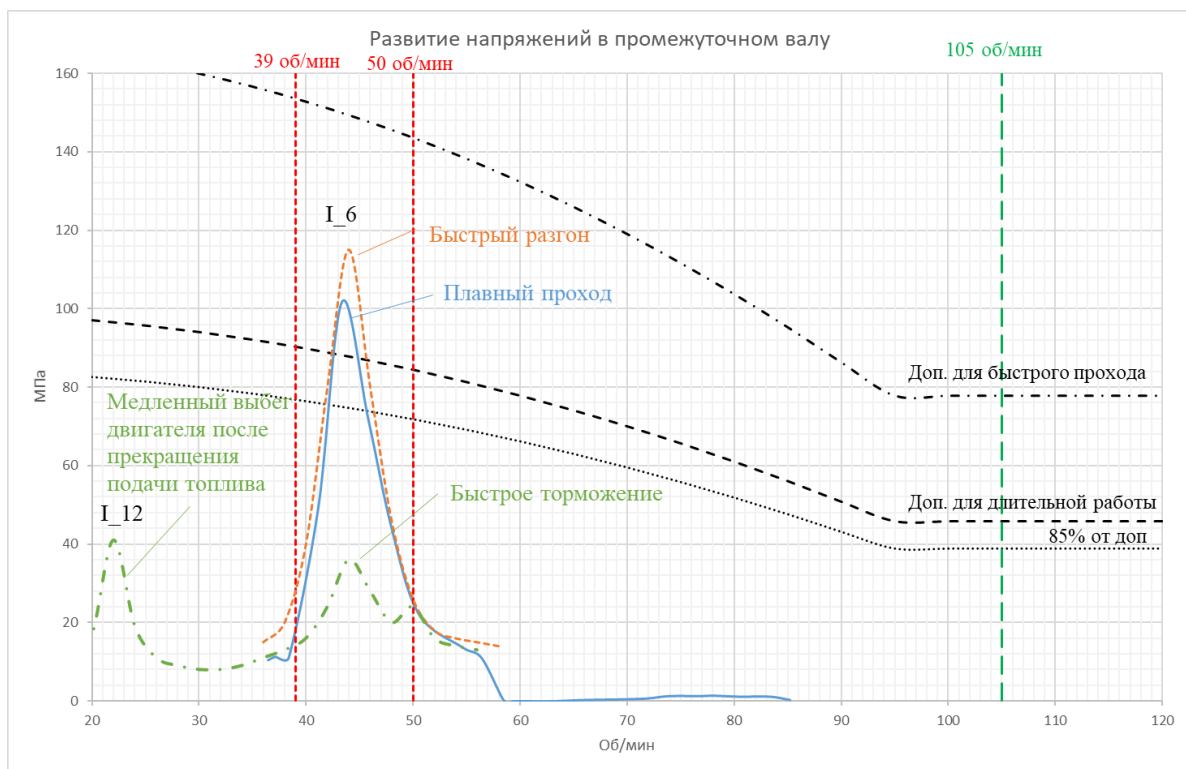


Рис. 5. Зависимости измеренных амплитуд и напряжений, возникающих от крутильных колебаний в исследуемом пропульсивном комплексе

Полученные результаты позволяют сделать выводы о том, что при быстром разгоне малооборотного двигателя крутильные колебания успевают полностью развиться. Амплитуды в этом

случае большие, чем при плавном проходе резонансной зоны. Предположительно это связано с тем, что при быстром разгоне двигатель на той же частоте вращения передает больший крутящий момент, чем при плавном проходе. Малая амплитуда крутильных колебаний при быстром торможении, вероятнее всего, объясняется тем, что при быстром торможении двигатель на той же частоте вращения передает меньший крутящий момент.

На основе полученных результатов можно сделать следующее заключение.

- крутильные колебания в пропульсивном комплексе с МОД развиваются в течение 5-6 циклов, что по времени составляет менее одного оборота вала;
- при быстром проходе резонансной зоны во время разгона в пропульсивных комплексах с МОД развиваются напряжения не меньшие (в некоторых случаях большие), чем при плавном проходе;
- при быстром проходе резонансной зоны во время торможения крутильные колебания практически не проявляются;
- расчет величины напряжений от крутильных колебаний во время быстрого разгона в пропульсивных комплексах с МОД на этапе проектирования является актуальной задачей для обеспечения их надежности и безаварийной длительной эксплуатации.

Дальнейшие исследования будут направлены на расчетное определение величины крутильных колебаний в пропульсивных комплексах с МОД на нестационарных режимах работы двигателя.

### Литература

1. Покусаев М.Н., Хоменко Т.В., Горбачев М.М. Применение систем мониторинга крутильных колебаний для повышения надежности судовых машинно-двигательных комплексов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2023. – № 72–73. – С. 78–86. – EDN YHFRMM.
2. Исследование крутильных колебаний машиннодвигательного комплекса разъездного речного судна «РК-2091» проекта 376 / М.Н. Покусаев, В.А. Мамонтов, А.Р. Рубан и др. // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 1-4(43). – С. 88–92. – EDN XCKQLH.
3. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. – СПб.: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 2007. – 276 с. – ISBN 5-02-025134-8. – EDN UBASSH.
4. Румб В.К., Паюсов В.И., Чихачев Е.В. Переходные процессы в судовой пропульсивной установке с ДВС // Двигателестроение. – 2011. – № 4(246). – С. 26–30. – EDN ONSZHH.
5. Румб В.К., Хтоо Н.А. Учет нестационарности нагружения при прогнозировании усталостной долговечности судовых валопроводов // Морской вестник. – 2024. – № 2(90). – С. 72–74. – DOI 10.56192/1812-3694\_90\_72. – EDN WLZFCQ.
6. Сравнительная оценка применения микроэлектромеханических акселерометров для измерения крутильных колебаний судовых машинно-двигательных комплексов / М.М. Горбачев, А.В. Дьяченко, Д.Г. Конищев, А.Г. Кокуев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2024. – № 1. – С. 95–103. – DOI 10.24143/2073-1574-2024-1-95-103. – EDN MEPTMY.
7. Горбачев М.М., Колыванов В.В. Выбор методов постоянного мониторинга крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2023. – № 2. – С. 54–65. – DOI 10.24143/2073-1574-2023-2-54-65. – EDN JYRACU.
8. Метод измерения крутильных колебаний судовых валопроводов при помощи трехосевого акселерометра / Ю.А. Лапин, М.В. Грибиниченко, О.С. Портнова, П.А. Андрюхина // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2023. – № 3(56). – С. 35–45. – DOI 10.24866/2227-6858/2023-3/35-45. – EDN SIVWMC.
9. Лапин Ю.А., Грибиниченко М.В. Оценка величины крутильных колебаний в пропульсивном комплексе краболовных судов проекта Damen CCa 5712LS // Вестник Морского государственного университета. – 2024. – № 95. – С. 9–17. – EDN APLNJK.

УДК 664.8.047

**А.П. Лебедева<sup>1</sup>, Е.А. Степанова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,  
Санкт-Петербург, 198035  
e-mail: otd\_o@gumrf.ru;

<sup>2</sup> Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: len\_sta@rambler.ru

### **РАВНОВЕСНАЯ ВЛАЖНОСТЬ, ПОТЕНЦИАЛ МАССОПЕРЕНОСА И СОРБЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ПИЩЕВЫХ И КОРМОВЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ СОРБЕНТОВ**

Статья посвящена определению и анализу результатов исследования равновесной влажности, потенциала массопереноса и сорбционной активности ряда пищевых и кормовых материалов как потенциальных сорбентов. Критериями предварительного отбора материалов были: дисперсность, возможность повторного использования, низкая стоимость и доступность, возможность последующего отделения от объекта сушки.

**Ключевые слова:** контактно-сорбционная сушка, сорбенты, равновесная влажность, потенциал массопереноса, сорбционная активность.

**A.P. Lebedeva<sup>1</sup>, E.A. Stepanova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
Saint Petersburg, 198035  
e-mail: otd\_o@gumrf.ru;

<sup>2</sup> Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: len\_sta@rambler.ru

### **EQUILIBRIUM HUMIDITY, MASS TRANSFER POTENTIAL AND SORPTION ACTIVITY OF SOME FOOD AND FEED MATERIALS AS POTENTIAL SORBENTS**

The determination and analysis of the results of the study of equilibrium humidity, mass transfer potential and sorption activity of a number of food and feed materials as potential sorbents is discussed. The criteria for the preliminary selection of materials were dispersion, possibility of reuse, low cost and availability, possibility of subsequent separation from the drying object.

**Key words:** contact-sorption drying, sorbents, equilibrium humidity, mass transfer potential, sorption activity.

Кинетика переноса массы в капиллярно-пористых телах определяется разностью переноса вещества.

Потенциал переноса  $Q_m$  введен А.В. Лыковым по аналогии с тепловым потенциалом или температурой [1]. А.В. Лыков определил потенциал переноса влаги как функцию влагосодержания и внешних параметров. Они должны быть одинаковыми во всех частях тела при термодинамическом равновесии.

Чтобы был осуществлен перенос влаги от одного тела к другому, необходим градиент потенциалов.

Потенциал массопереноса (массообменные градусы °М) в зависимости от равновесной влажности  $Q_m = f(\varphi)$  при различных температурах для ряда исследуемых материалов представлен на рис. 1–4. Абсолютно сухое тело имеет потенциал, равный 0°М, а при максимальном гигроскопическом влагосодержании 100°М.

Для сравнения сорбционной активности ряда исследуемых материалов как потенциальных сорбентов была использована методика Л.Б. Циммерманиса, который предложил ввести единый энергетический потенциал переноса [2].

Введенные Л.Б. Циммерманисом положения дают возможность рассматривать увлажнение (или насыщение влагой) капиллярно-пористого тела в гигроскопической области ( $0 < u < u_2$ ) и в области влажного состояния (когда  $u_2 < u \leq u_{\max}$ ), где  $u_{\max}$  – влагосодержание, соответствующее максимальному увлажнению. При этом адсорбционные силы могут действовать на всей поверхности тела (сорбента) (рис. 1–4.).

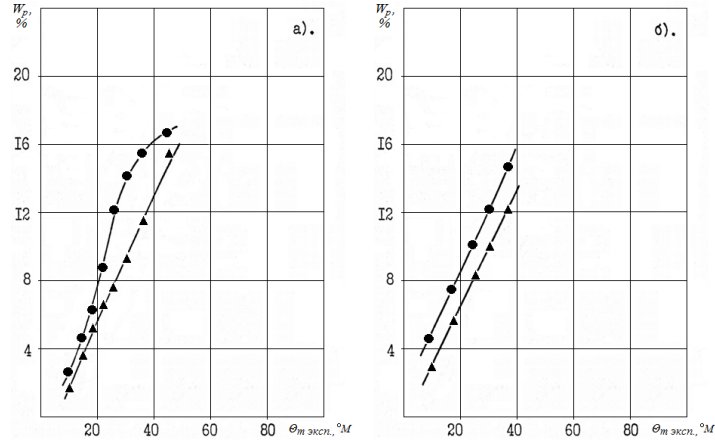


Рис. 1. Зависимость равновесной влажности от потенциала массопереноса исследуемых материалов при различных температурах: а) – манная крупа; б) – дробленое зерно пшеницы; ● –  $t = 20^\circ\text{C}$ ; ▲ –  $t = 45^\circ\text{C}$

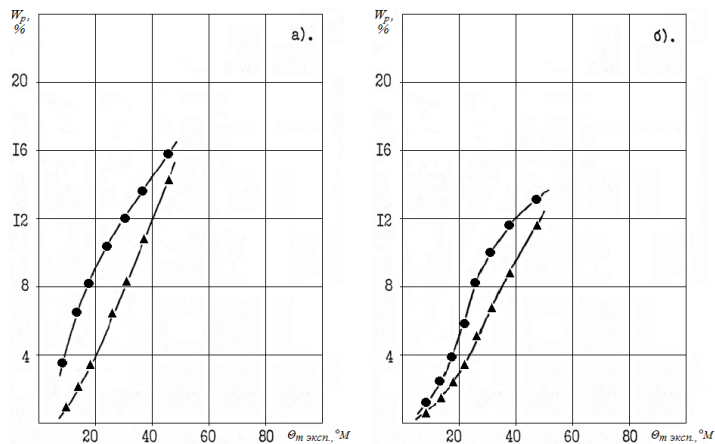


Рис. 2. Зависимость равновесной влажности от потенциала массопереноса исследуемых материалов при различных температурах: а) – пшеничные отруби; б) – лузга подсолнечная; ● –  $t = 20^\circ\text{C}$ ; ▲ –  $t = 45^\circ\text{C}$

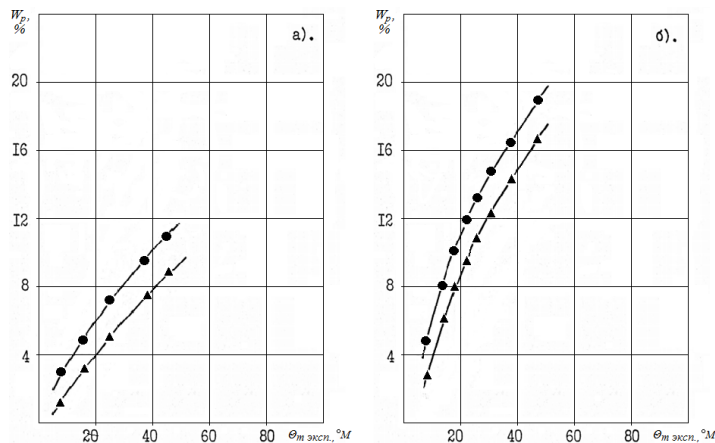


Рис. 3. Зависимость равновесной влажности от потенциала массопереноса исследуемых материалов при различных температурах: а) –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; б) – зерно пшеницы; ● –  $t = 20^\circ\text{C}$ ; ▲ –  $t = 45^\circ\text{C}$

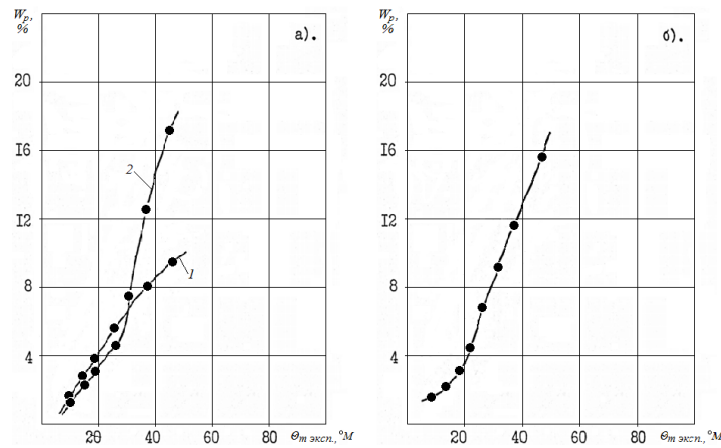


Рис. 4. Зависимость равновесной влажности от потенциала массопереноса исследуемых материалов при  $t = 20^{\circ}\text{C}$ : а) – картофельная мука; б) – морковь

Изменение молярной энергии распределения влаги в поле сорбционных сил можно определить как:

$$\Delta E_p = a_c \Delta E_\phi,$$

где  $\Delta E_\phi$  – энергия распределения водяного пара,

$a_c$  – сорбционная активность.

Во сколько раз увеличивается энергия распределения моля воды при переходе из равновесного пара в поле сорбционных сил тела, определяет сорбционная активность. При этом сорбционная активность должна быть не равной нулю (рис. 5).

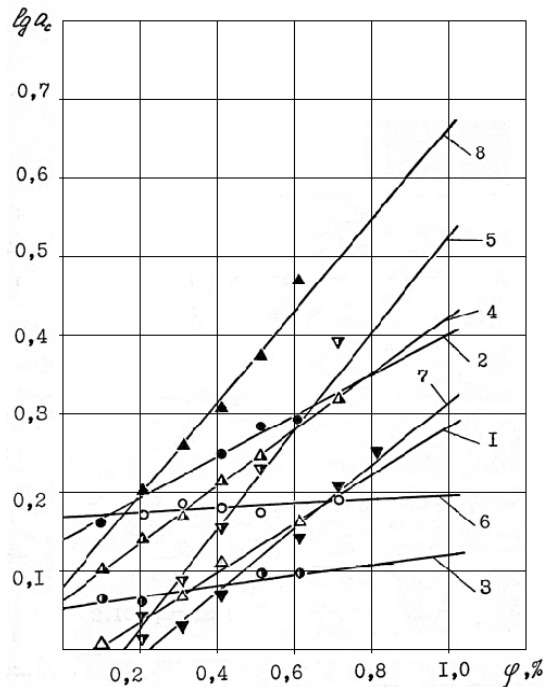


Рис. 5. Характерные зависимости сорбционной активности  $a_c$  от  $\phi$ : 1 – дробленое зерно пшеницы; 2 – лузга подсолнечная; 3 – манная крупа; 4 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 5 – зерно пшеницы; 6 – пшеничные отруби; 7 – картофельная мука; 8 – «активированная» картофельная мука

При изучении гигроскопических свойств сорбентов была исследована «активированная» картофельная мука, полученная по методу, предложенному Э.Г. Тутовой с соавторами [3]. Данный продукт отличается от картофельной муки [4] тем, что с целью улучшения его качества пу-

тем повышения влагопоглощительной способности он дополнительно содержит соль, причем компоненты взяты в следующем соотношении масс, %:

Картофельная мука	95÷95%
Соль	5÷10%.

Таким образом, сорбционная активность может являться характеристикой влажного состояния капиллярно-пористого тела. Она показывает на отклонение реального поля сорбционных сил от идеальной системы, в качестве идеальной системы служит водяной пар.

Изучение сорбционной активности для потенциальных сорбентов является неотъемлемым этапом при исследовании процесса контактно-сорбционной сушки.

Сорбционную активность исследуемых материалов определяли как:

$$a_c = \frac{1}{\ln \varphi} \ln \frac{u_p}{u_r},$$

где  $u_p$  и  $u_r$  – равновесное и гигроскопическое влагосодержание материала, кг/кг;

$\varphi$  – относительная влажность.

Результаты экспериментов представлены на рис. 5 в виде зависимости  $a_c = f(\varphi)$  для исследуемых материалов.

Из зависимости, представленной графиком, видно, что сорбционная активность выбранных в качестве потенциальных сорбентов материалов сравнительно велика и мало отличается от сорбционной активности  $Al_2O_3$ , известного как распространенный и широко применяемый сорбент. На основании этого можно сделать вывод о возможности применения исследуемых материалов в качестве сорбентов.

### Литература

1. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 470 с.
2. Цимерманис Л.Б. Термодинамические и переносные свойства капиллярно-пористых тел. – Челябинск: Южно-Уральское книжное изд-во, 1971. – 201 с.
3. А. с. 1144675 (СССР). Сорбент-наполнитель для пищевых и кормовых продуктов / Авт. изобрет. Э.Г. Тутова и др. – Оpubл. в Б.И., 1985, № 10. 4. ТУ 10-04-08-88. 1985, № 10. Мука картофельная пищевая; Введ. С 21.03.88 г. до 21.03.93 г. – 10 с. – Группа Н43.
4. ТУ 10-04-08-88. 1985, № 10. Мука картофельная пищевая; Введ. С 21.03.88 г. до 21.03.93 г. – 10 с. – Группа Н43.



УДК 502/504:582.272

Д.О. Мартыненко<sup>1,2</sup>, А.В. Климова<sup>1,3</sup>, Т.А. Клочкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003;

<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683023;

<sup>3</sup> Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683000  
e-mail: darri.martynenko@yandex.ru

### КОМПЛЕКСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛОВ НА РАННЕЕ РАЗВИТИЕ БУРОЙ ВОДОРОСЛИ *FUCUS DISTICHUS* В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ

Исследовано сочетанное воздействие металлов (Cu, Co, Cd и Pb) на развитие проростков бурой водоросли *Fucus distichus* subsp. *evanescens* в искусственной среде. Эксперименты проводили в лабораторных условиях в течение 30 суток при температуре 8°C, фотопериоде 10 : 14 и интенсивности освещения 30 мкмоль·фотонов/(м<sup>2</sup>·с). Показано, что при внесении номинальных концентраций металлов до их нормативных значений 2ПДК абсолютная скорость роста водорослей снижалась в два и более раз по отношению к контрольной группе. Во всех культурах фукуса преобладал I тип морфогенеза: проростки имели хорошо сформированный главный ризоид, аномалии развития отмечались редко. Подавляющим рост водорослей эффектом обладала среда с номинальными концентрациями Cu 5 мкг/л (1ПДК) и Pb 20 мкг/л (2ПДК). При этой комбинации металлов ростовые процессы не восстанавливались даже после перемещение проростков *F. distichus* в среду без добавления загрязнителей.

**Ключевые слова:** *Fucus distichus* subsp. *evanescens*, Fucales, скорость роста, кобальт, медь, свинец, цинк, номинальные концентрации, ранние стадии развития, тяжелые металлы.

D.O. Martynenko<sup>1,2</sup>, A.V. Klimova<sup>1,3</sup>, T.A. Klochkova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003;

<sup>2</sup> Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683023;

<sup>3</sup> Kamchatka Branch of Pacific Geographical Institute FEB RAS,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000  
e-mail: darri.martynenko@yandex.ru

### COMBINED EFFECTS OF METALS ON THE EARLY DEVELOPMENT OF THE BROWN ALGAE *FUCUS DISTICHUS* UNDER LABORATORY CULTIVATION CONDITIONS

The combined effect of metals (Cu, Co, Cd and Pb) on the development of brown alga *Fucus distichus* subsp. *Evanescens* seedlings in an artificial environment was studied. The experiments were carried out in laboratory conditions for 30 days at a temperature of 8°C, a photoperiod of 10 : 14 and an illumination intensity of 30 μmol photons / (m<sup>2</sup> s). As shown, the nominal concentrations of metals were introduced up to their standard values of 2MPC, the absolute growth rate of algae decreased by 2 or more times compared to the control group. Type I morphogenesis prevailed in all *Fucus* cultures: seedlings had a well-formed main rhizoid; developmental anomalies were rare. The inhibitory effect on algal growth was demonstrated by the medium with nominal concentrations of Cu 5 μg/l (1MPC) and Pb 20 μg/l (2MPC). With this combination of metals, growth processes were not restored even after the transfer of *F. distichus* seedlings to a medium without the addition of polluting heavy metals.

**Key words:** *Fucus distichus* subsp. *evanescens*, Fucales, growth rate, cobalt, cuprum, lead, zinc, nominal concentrations, early stages of development, heavy metals.

Бурая водоросль *Fucus distichus* subsp. *evanescens* широко распространена в умеренных широтах Дальнего Востока России, а также в Белом и Баренцевом морях [1–3]. Этот вид обладает высокой устойчивостью к наиболее распространенным загрязнителям морских вод – нефтепродуктам и тяжелым металлам [4, 5]. Кроме того, в акваториях с постоянным антропогенным влиянием *F. distichus* остается одним из доминирующих видов макрофитобентоса в прибрежных сообществах [3]. Выживаемость фукуса в неблагоприятных условиях среды послужила основой для разработки методов восстановления экологического состояния акваторий и последующего применения этого вида в санитарной марикультуре [4, 6].

В прибрежных районах с развитой транспортной инфраструктурой и активным судоходством уровень загрязнения морских вод высокий [7]. Часто содержание металлов в акваториях, прилегающих к городам-портам России может превышать ПДК в несколько раз [8]. Так, в 2023 г. повышенное содержание меди было зафиксировано в морских водах залива Гренфьорд (пос. Баренцбург, Шпицберген) – 14,3 мкг/л, залива Корсаков (порт Корсаков, Сахалин) – 7 мкг/л, Татарского пролива (г. Александровск-Сахалинский) – 5,6 мкг/л и бухте Золотой Рог (г. Владивосток) – 6,2 мкг/л. Также в указанных выше районах в воде и донных отложениях обнаружены в меньших концентрациях кобальт, кадмий и свинец. В прикамчатских водах, даже в Авачинской губе, подвергающейся длительному антропогенному воздействию, содержание тяжелых металлов отмечается только в следовых количествах [9]. В то же время в 2009 г. в грунтах северо-восточной части этой бухты содержание меди достигало 243 мг/кг, кадмия – 2,3 мг/кг и свинца 241 мг/кг [9]. Вероятно, донные отложения в этих районах могут выступать вторичным источником загрязнения вод металлами и негативно влиять на развитие обитающих здесь гидробионтов.

Ранее нами в лабораторных экспериментах были установлены уровни содержания некоторых металлов (меди, кобальта, кадмия и свинца) в морской воде, которые ингибируют развитие ранних стадий развития *F. distichus* [5, 10]. При этом среди всех протестированных металлов именно медь обладала наиболее выраженным токсичным эффектом уже при концентрации выше 5 мкг/л. Поскольку в прибрежных акваториях содержание металлов, как и других загрязнителей, в среде часто носит сложный и временный характер, то целью исследования являлась оценка комплексного воздействия нескольких металлов I и II класса опасности на развитие проростков фукуса.

Для получения лабораторных культур *F. distichus* использовали фертильные образцы водорослей, собранные в приливно-отливной зоне мыса Санникова (Авачинская губа, Юго-Восточная Камчатка) в летний период 2024 г. Проростки фукуса получали согласно методу, детально описанному нами ранее [11, 12]. IMR-среду для культивирования готовили с применением морской воды с соленостью 25‰, отобранной также, как и водоросли, у мыса Санникова. Содержание меди, кобальта, свинца и кадмия в природной морской воде не превышала 1 ppm. В экспериментах использовали IMR-среду, полученную после предварительной фильтрации и стерилизации природной морской воды и добавления необходимых витаминов, микро- и макроэлементов [5, 13]. Для приготовления комбинированных растворов металлов Cu + Cd с номинальными концентрациями 5 мкг/л каждого элемента, Cu + Co с номинальными концентрациями 5 мкг/л Cu и 20 мкг/л Cd и Cu + Pb с номинальными концентрациями 5 мкг/л Cu и 20 мкг/л Pb использовали соли  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CdCl}_2$  и  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ . Полученные среды соответствовали допустимым значениям по Cu и Co – 1ПДК, по Cd и Pb – 2ПДК тестируемых элементов в морской воде.

Выращивание проростков проводили в течение 30 суток при температуре +8°C и коротком световом дне (фотопериод 10 : 14), интенсивность освещения составляла 30 мкмоль·фотонов/(м<sup>2</sup>·с). Помимо испытуемых групп, параллельно выращивали культуры фукуса в средах без добавления металлов. Каждый раствор с комбинацией элементов тестировали в трех повторностях. В экспериментах добавление растворов металлов в среды проводили с шестых по 21-е сутки, т. е. период экспозиции водорослей в загрязненной среде составил 15 суток.

Наблюдения за развитием проростков *F. distichus* с помощью инвертированного микроскопа Olympus IX73 (Olympus, Япония) вели каждые 3–4 сут. Количество измеренных экземпляров составляло 100 и более для каждой группы, водоросли отбирали случайным образом. Линейные размеры проростков состояли из измерений длин их ризоидальной и талломической частей. Абсолютную скорость роста (AGR, мкм/сут) рассчитывали по формуле [14]:

$$AGR = (L_2 - L_1) / (t_2 - t_1),$$

где  $L_1$  – среднее значение начальной и  $L_2$  – среднее значение текущей длины (мкм) проростков;  $(t_2 - t_1)$  – период времени между начальным и текущим измерениями (сут).

Статистическую обработку и визуализацию результатов выполняли в программе GraphPad Prism ver. 10.2.3. Нормальность распределения полученных данных проверяли с помощью теста Д'Агостино-Пирсона, гомогенность дисперсии – теста Брауна-Форсайта. Для оценки статистических различий между контрольными и испытываемыми группами применяли однофакторный дисперсионный анализ, при выявлении различий между контрольной и испытываемыми группами использовали апостериорное сравнение с помощью критерия Даннетта. Различия между средними значениями считали достоверными при  $p \leq 0,05$ .

Развитие проростков фукуса в первую неделю культивирования во всех группах проходило одинаково – их размеры варьировали от 93 до 154 мкм (рис. 1, А). На 9-е сутки культивирования после добавления металлов в среды различия в линейных размерах между контрольной и испытываемыми группами варьировали от 13 до 21%. При этом заметное отставание в росте наблюдалось в культурах фукуса с добавлением Cu и Pb. В последующие две недели их темпы роста заметно снизились (рис. 1, А). В целом экспонирование водорослей в течение 15 суток в средах с добавлением металлов существенно отразилось на скорости роста (рис. 1, А и Б). За этот период длина проростков в средах без добавления металлов увеличилась в два раза и достигала в среднем 477 мкм при  $AGR = 16$  мкм/сут. Менее интенсивно развивались культуры в средах с совместным добавлением Cu + Cd, их скорость роста достигала 8,5 мкм/сут и в средах с совместным добавлением Cu + Co – 2,7 мкм/сут (рис. 1, Б). Выявлены слабые ростовые процессы для проростков в средах с добавлением Cu и Pb – за период воздействия загрязнителей их средняя длина увеличилась только на 10 мкм, что не превышает значений абсолютной скорости роста – 0,5 мкм/сут.

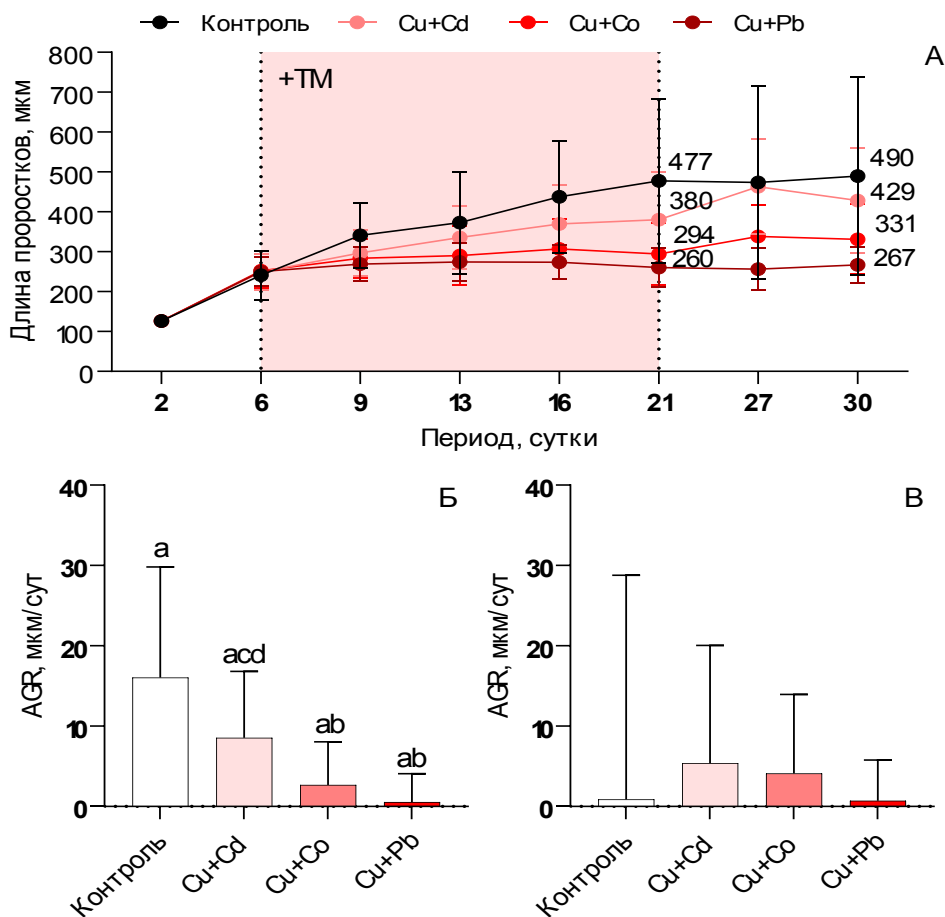


Рис. 1. Развитие проростков бурой водоросли *Fucus distichus* в условиях комплексного воздействия металлов: А – динамика линейного роста, представлены средние арифметические значения и стандартное отклонение, Б – скорость роста ( $AGR$ , мкм/сут) в средах с добавлением комбинаций металлов Cu + Cd, Cu + Co и Cu + Pb с 6-х по 21-е сутки культивирования, В – скорость роста ( $AGR$ , мкм/сут) в средах без добавления металлов за период с 22-х по 30-е сутки культивирования

С 22-х суток эксперимента все проростки культивировали в средах без добавления металлов. За этот период фукусы в контрольной группе сформировали полноценную объемную талломическую часть и развитые ризоиды. Как следствие, скорость роста водорослей значительно снизилась (рис. 1, В). Разница в линейных размерах проростков в испытуемых группах Cu + Cd и Cu + Co и контрольной группе составляла 12 и 32% соответственно. Фукусы, культивируемые ранее в средах с добавлением Cu и Pb, практически не изменили своих размеров с 6-х суток эксперимента, их талломическая часть была слаборазвитой и состояла из нескольких десятков клеток. Абсолютная скорость роста снизилась во всех группах, кроме культур, выращенных в средах с повышенным содержанием Cu и Co (рис. 1, В). Следует отметить, что после двухнедельного воздействия металлов на проростки и их последующее содержание в чистых питательных средах не отразилось отрицательно на ростовых процессах. Вероятно, в естественной среде краткосрочное загрязнение этими металлами существенно не влияет на ранние стадии развития фукуса.

Известно, что развитие фукуса в первые недели сопровождается формированием развитой ризоидальной части и активным делением клеток талломической части проростка. Однако в неблагоприятных условиях развитие органов прикрепления может происходить с нарушениями. Ранее нами были выделены четыре типа морфогенетического развития проростков фукуса [5]: главный ризоид с боковыми выростами или без них (тип I); несколько равнозначных ризоидов (тип II); нарушение оси роста (тип III); отсутствие ризоидов у многослойной талломической части (тип IV). Тип морфогенеза во многом определяет скорость роста и общие линейные размеры проростков. Так, ювенилы, развивающиеся по I типу, имеют наибольшую длину слоевищ, чем представители других морфотипов. Как правило, этот тип развития ризоидов наиболее часто встречается в лабораторных культурах фукуса [5, 10].

К 21-м суткам эксперимента во всех группах преобладали проростки с I типом морфогенеза ризоидальной части. При этом в контрольной группе их доля составляла 70,7%, остальные проростки развивались по II морфотипу (рис. 2). Наличие в культурах проростков с разными типами морфогенеза обусловило их дифференциацию на две размерные группы. Также для этой группы был характерен широкий диапазон линейных размеров водорослей от 150 до 878 мкм. В испытуемых группах диапазоны длин ювенилов были значительно уже (рис. 2, А). На долю I типа морфогенеза приходилось 79% в культурах, выращенных в средах с совместным внесением Cu и Cd, 81% – Cu и Co, 96% – Cu и Pb. Важно отметить, что в культурах, развивающихся в присутствии Co, у некоторых проростков отмечалось нарушение оси роста (рис. 2, Б).

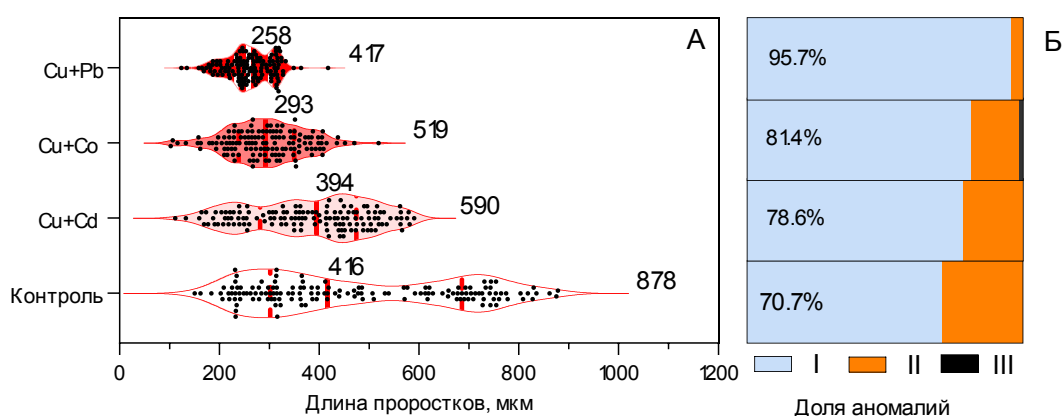


Рис. 2. Особенности развития проростков бурой водоросли *Fucus distichus* на 21-е сутки выращивания в средах с добавлением металлов: А – распределение длин проростков (цифрами указаны медианные и максимальные значения), Б – доля аномального развития ризоидов в контрольной и экспериментальных группах

Важно отметить, что развитие проростков фукуса в средах с аналогичным номинальным содержанием только одного из протестированных металлов не влияло на скорость их роста, а в отдельных случаях незначительно ее стимулировало [5, 10]. В то время как совместное при-

существование меди и другого металла снижало скорость роста ювенилов фукуса в два и более раз (см. рис. 1). В проведенных экспериментах номинальные концентрации металлов в средах не превышали 2ПДК. Вероятно, совместное присутствие металлов в среде усиливает ингибирование роста водорослей, особенно отчетливо это проявлялась в комбинации Cu и Pb. При этом в последнем случае смена питательных растворов на среды без добавления металлов и последующее выращивание проростков не восстановило у них ростовые процессы. В остальных испытуемых группах темпы роста были сопоставимы с предыдущим периодом (рис. 1, А и В). Проведенный эксперимент выявил устойчивость ранних стадий развития фукуса к совместному содержанию в среде металлов Cu + Cd и Cu + Co в количествах, превышающих их ПДК.

### Литература

1. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2024. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.algaebase.org> (дата обращения: 10.10.2024).
2. Клочкова Н.Г., Королева Т.Н., Кусиди А.Э. Атлас водорослей макрофитов прикамчатских вод. Т. 1. – Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО, 2009. – 218 с.
3. Биология развития и экология бурой водоросли *Fucus distichus* в прибрежных водах Камчатки / Т.А. Клочкова, А.Н. Кашутин, А.В. Климова, Н.Г. Клочкова. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2021. – 128 с.
4. Степаньян О.В., Матишов Г.Г., Кулыгин В.В. Устойчивость макроводорослей Баренцева моря к нефтяному загрязнению // Наука Юга России. – 2017. – Т. 13, № 3. – С. 103–108.
5. Климова А.В., Болотова Р.Г., Клочкова Т.А. Развитие проростков бурой водоросли *Fucus distichus* subsp. *evanescens* (Fucales, Phaeophyceae) в условиях избыточного содержания свинца и кадмия // Физиология растений. – 2022. – Т. 69, № 4. – С. 427–437.
6. Воскобойников Г.М., Малавенда С.В., Метелькова Л.О. Роль водорослей-макрофитов в биоремедиации от нефтепродуктов Кольского залива Баренцева моря // Морской биологический журнал. – 2021. – Т. 6, № 3. – С. 35–43.
7. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2021. – М.: Наука, 2022. – 230 с.
8. Обзор о состоянии и загрязнении окружающей среды в Российской Федерации в 2023 году. – М.: Росгидромет, 2024. – 215 с.
9. Воздействие антропогенного загрязнения на состояние макрофитобентоса в бухте Раковая (Авачинская губа, юго-восточная Камчатка) / Н.Г. Клочкова, А.В. Климова, С.О. Очеретяна, А.Э. Кусиди, Е.В. Касперович // Вестник КамчатГТУ. – 2016. – № 35. – С. 53–64.
10. Климова А.В., Клочкова Т.А., Болотова Р.Г. Воздействие кобальта и меди на рост проростков бурой водоросли *Fucus distichus* subsp. *evanescens* (Fucales, Phaeophyceae) // Вестник КамчатГТУ. – 2023. – № 64. – С. 22–31.
11. Motomura T. Electron and immunofluorescence microscopy on the fertilization of *Fucus distichus* (Fucales, Phaeophyceae) // Protoplasma. – 1994. – Vol. 178. – P. 97–110.
12. Климова А.В., Кашутин А.Н. Раннее развитие камчатских представителей *Fucus evanescens* (Phaeophyceae, Fucales) в условиях лабораторного культивирования // Вестник КамчатГТУ. – 2016. – № 37. – С. 50–56.
13. Biology of a terrestrial green alga, *Chlorococcum* sp. (Chlorococcales, Chlorophyta), collected from the Miruksazi stupa in Korea / Т.А. Klochkova, S.-H. Kang, G.Y. Cho, C.M. Poeschel, J.A. West, G.H. Kim // Phycologia. – 2006. – Vol. 45. – P. 349–358.
14. Hunt R. Basic Growth Analysis. – Dordrecht: Springer, 1990. – 112 p.

УДК 66.024.5:629.5.06

**А.Н. Рак, С.А. Жуков**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail:lion15ua@rambler.ru*

## **ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ УСТАНОВОК ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ SO<sub>x</sub> С МОРСКИХ СУДОВ**

Все существующие схемы скрубберов позволяют в полном объеме обеспечить требования международного и национальных морских законодательств в части сокращения выбросов серы, но имеют некоторые ограничения и зависят от районов Мирового океана, в которых эксплуатируются или предполагается эксплуатировать суда. Кроме того, одним из действенных способов сокращения выбросов серы является переход к видам топлива с низким содержанием серы или к газообразному топливу. К сожалению, технический потенциал всех нефтеперерабатывающих предприятий во всем мире пока является недостаточным для решения данной проблемы.

**Ключевые слова:** главный двигатель, котел, скруббер, выброс, труба Вентури, зона экологического контроля, сера.

**A.N. Rak, S.A. Zhukov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: lion15ua@rambler.ru*

## **MAIN APPROACHES TO THE CHOICE OF INSTALLATIONS FOR REDUCING SO<sub>x</sub> EMISSIONS FROM MARINE VESSELS**

All existing scrubber designs can fully meet the requirements of international and national maritime legislation in terms of reducing sulfur emissions, but have some limitations and depend on the areas of the world's oceans in which the vessels are operated or are expected to operate. In addition, one of the effective ways to reduce sulfur emissions is to switch to low-sulfur fuels or gaseous fuels. Unfortunately, the technical potential of all oil refineries around the world is still insufficient to solve this problem.

**Key words:** main engine, boiler, scrubber, emission, venturi tube, environmental control zone, sulfur.

Известно, что одним из источников антропогенных выбросов в окружающую среду является морской транспорт. По данным отдельных источников, ежедневный расход топлива оценивается примерно 4,5 млн баррелей в день. На большинстве судов в качестве топлива применяется топливо с высоким содержанием серы, превышающим его содержание в топливе для автомобильного транспорта. При сжигании топлива (рис. 1) образуются оксиды серы SO<sub>x</sub>, которые оказывают отрицательное влияние не только на флору и фауну Мирового океана, а также могут спровоцировать риск респираторных и легочных заболеваний.

Цель работы – путем исследования существующих схем показать их особенности и функциональные возможности для правильной эксплуатации с учетом их соответствия требованиям международного морского законодательства в области экологии.

В работе использованы ссылки на основные нормативно-правовые акты в области сокращения выбросов с морских судов, а также информация из инструкций по эксплуатации судовых скрубберов, которые доступны в открытых источниках.

Анализ состояния вопроса показывает, что возможны несколько путей решения проблемы – переход на топливо с низким содержанием серы (газойль, газообразное топливо, метанол и др.) или модернизация судов путем установки оборудования по дополнительной очистке продуктов сгорания топлива – скрубберов.

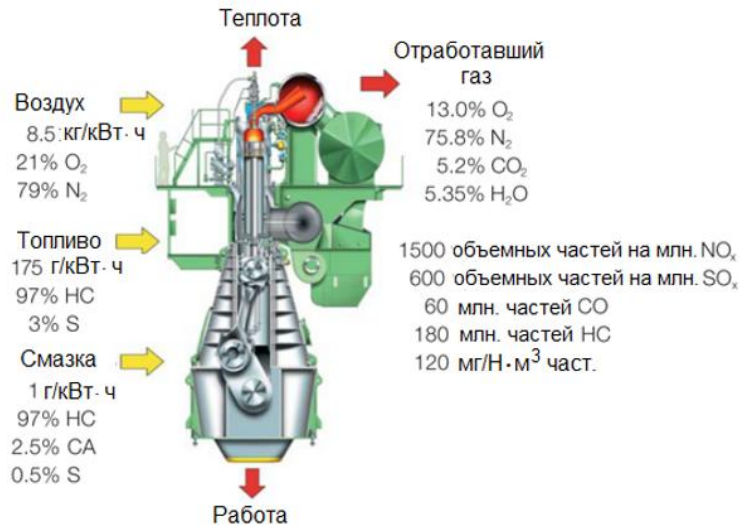


Рис. 1. Вещества, образующиеся при сжигании топлива

При этом в соответствии с [1] устанавливаются зоны мониторинга выбросов серы (рис. 2) и их количественные показатели [2].

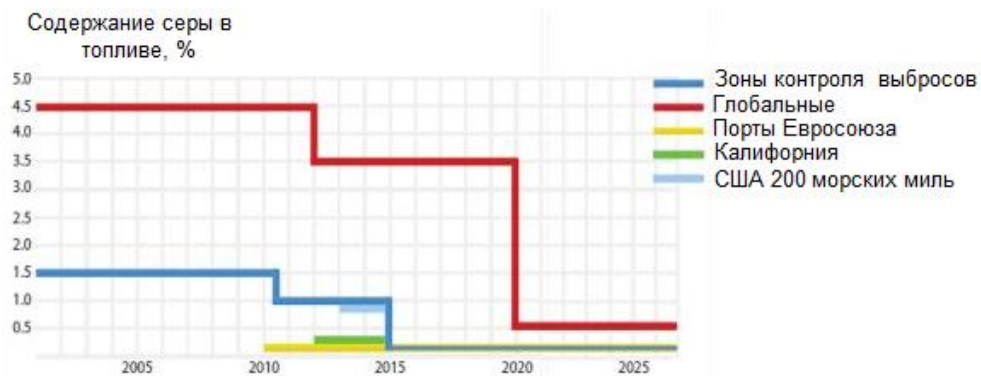


Рис. 2. Зоны мониторинга

Как показывает практика, в настоящее время наиболее предпочтительным является второй вариант, поскольку вся мировая нефтеперерабатывающая промышленность не в состоянии обеспечить в полном объеме потребности мирового судоходства в полном объеме.

Если за точку отсчета принять 2011 г., то можно заметить, что количество судов со скрубберами постоянно возрастало. На рис. 3 представлена динамика изменения числа судов со скрубберами. Резкий скачок произошел в 2019 г., когда количество судов со скрубберами увеличилось в 4,2 раза.

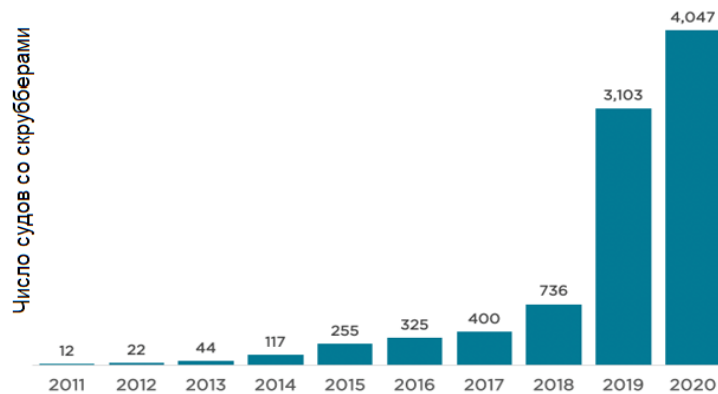


Рис. 3. Число судов со скрубберами



Дополнительная очистка продуктов сгорания основывается на свойстве серы растворяться в воде. При этом может использоваться как морская, так и пресная вода с добавками каустической соды и известняка.

Классификация скрубберов представлена на рис. 4.

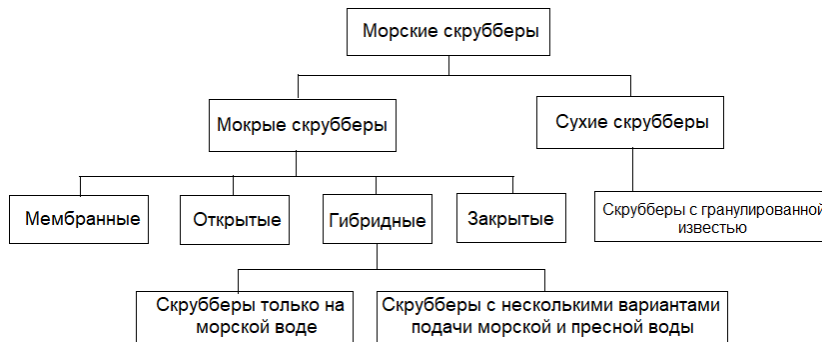


Рис. 4. Классификация морских скрубберов

Дополнительная очистка продуктов сгорания основывается на свойстве серы растворяться в воде. При этом может использоваться как морская, так и пресная вода с добавками каустической соды и известняка.

Промывочная вода после обработки в сепараторе для удаления из нее осадка сбрасывается в открытое море, а очищенные продукты сгорания выводятся из системы. Туманоуловители используются в промывочных колоннах для удаления любого кислотного тумана, который образуется в камере, путем отделения капель, присутствующих во входном газе, от выходного газового потока. Процессы, происходящие в скруббере, представлены на рис. 5 и 6.

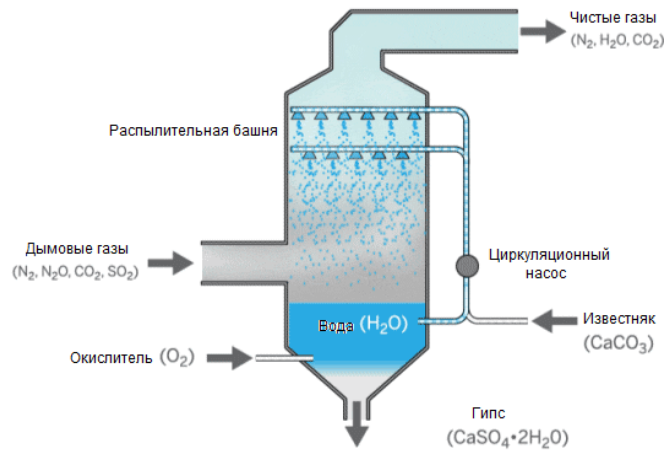


Рис. 5. Процессы, происходящие в скруббере

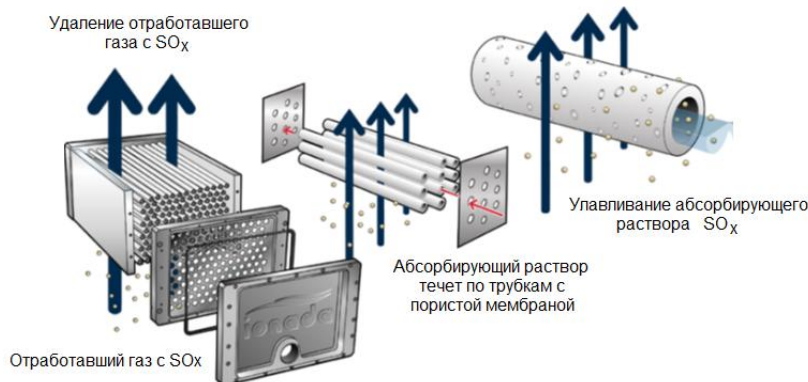


Рис. 6. Фильтрующий элемент мембранного скруббера



В процессе химических реакций образуется щелочь, нейтрализующая серу. Количество щелочи, необходимой для нейтрализации, зависит как от мощности двигателя(-ей), установленного на судне, так и от расхода топлива (рис. 7).

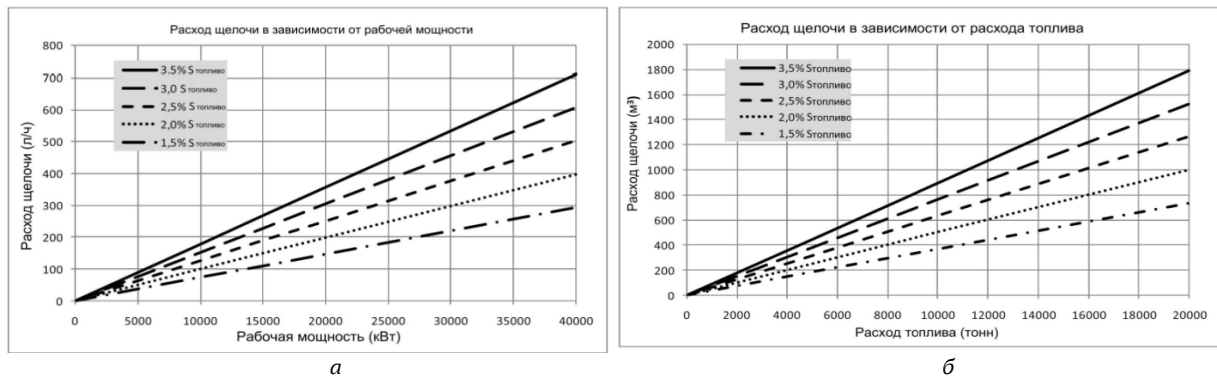


Рис. 7. Расход щелочи: в зависимости от мощности двигателя (а); в зависимости от расхода топлива (б)

Основными схемами по дополнительной очистке продуктов сгорания являются схемы, представленные на рис. 8 и 9.



Рис. 8. Основные схемы скрубберов: с одним входом (а); многоходовый (б)

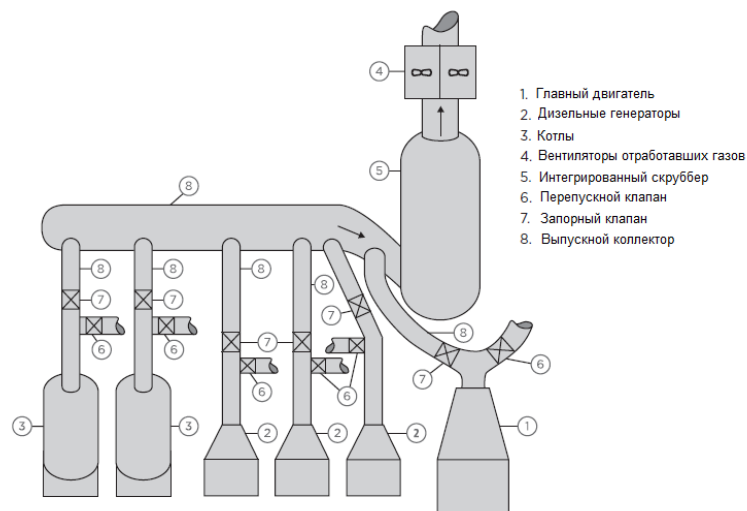


Рис. 9. Интегрированная схема скруббера

Из рис. 8 и 9 следует, что скрубберы с одним входом применяются только для одного двигателя, многорядовые – для нескольких однотипных, интегрированные – для нескольких разнотипных установок, и все могут работать в различных схемах очистки (рис. 10, а – з).

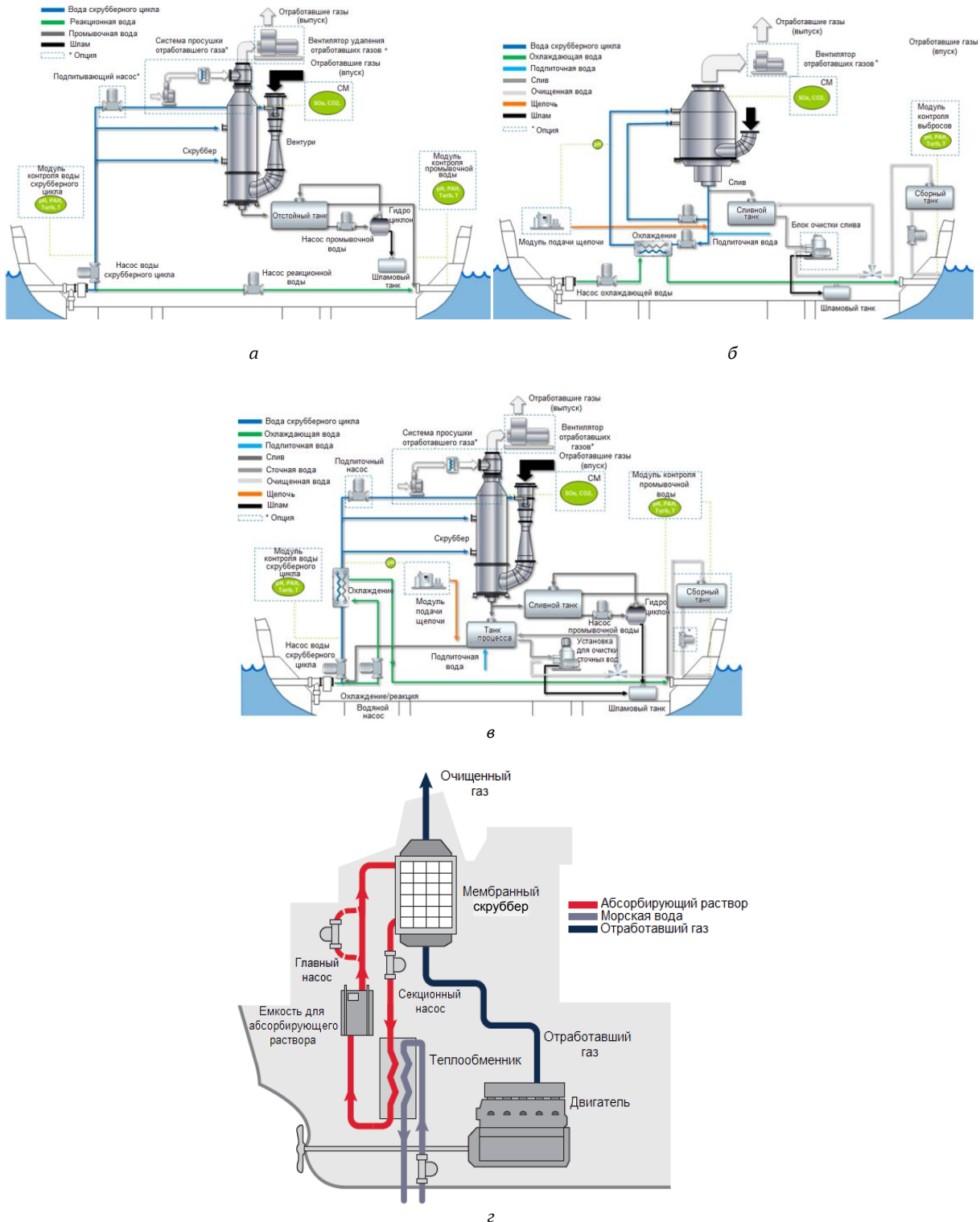


Рис. 10. Системы мокрых скрубберов: открытая (а); закрытая (б); гибридная (в); мембранная (з)

Все представленные на рис. 10 скрубберы обеспечивают необходимый уровень очистки от серы и применяются в зависимости от районов плавания:

- схемы с открытым контуром применяются в районах за пределами 200 морских миль. При этом промывочная вода при надлежащем контроле может сливаться обратно в океан;

- схемы с закрытым контуром в портах и прибрежных водах и портах. Естественно, что возникает проблема со сдачей загрязненных вод;
- наиболее универсальной является гибридная схема, которая позволит осуществлять слив воды в океан при соблюдении требований или сдавать загрязненные воды в портах назначения.

Правила МАРПОЛ 73/78 требуют, чтобы перед выпуском использованная промывочная вода подвергалась контролю, чтобы убедиться, что ее значение рН не слишком низкое. Для этого в гибридных системах применяются модули очистки воды (рис. 11), которые обеспечивают необходимый уровень рН.

Количество модулей очистки зависит как от мощности двигателя, так и от объема промывочной воды, сливаемой в океан. Поэтому для обеспечения необходимых качественных показателей сливаемой воды увеличивается и количество модулей.

Контроль за выбросами серы в атмосферу осуществляется с помощью системы непрерывного мониторинга, состав которой представлен на рис. 12.

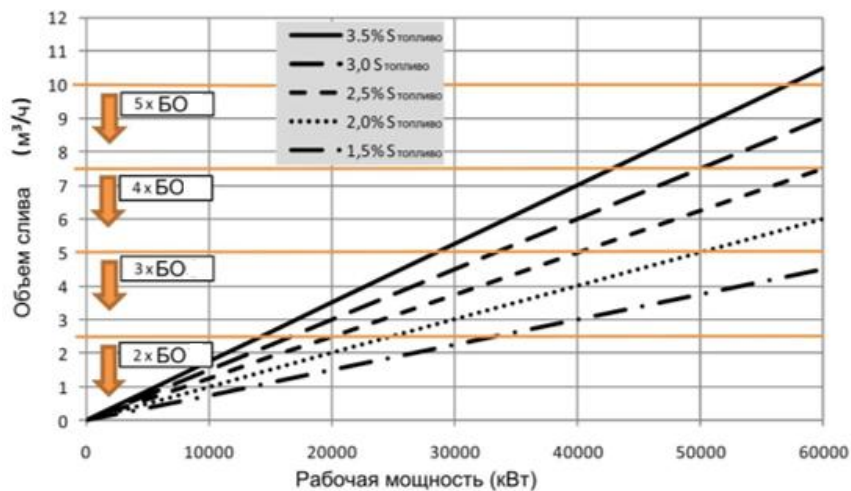


Рис. 11. Зависимость объема сливаемой промывочной воды в зависимости от рабочей мощности



Рис. 12. Система непрерывного мониторинга

Совокупные затраты на модернизацию судов при установке скрубберов в зависимости от возраста судов и типа скрубберов представлены на рис. 13.

Ужесточение требований по сокращению выбросов серы с морских судов не только со стороны Международной морской организации, а и национальными законодательствами стало причиной появления такого документа, как Fuel Oil Non-availability Report (FONAR) – Доклад о недоступности топлива. В нем подразумевается фиксация факта о невозможности получения судового топлива с низким содержанием серы на всем маршруте следования судна при отсутствии скрубберной установки [3]. Как считают судовладельцы или операторы морских судов такой документ поможет сократить штрафные санкции за несоблюдение требований по выбросам.

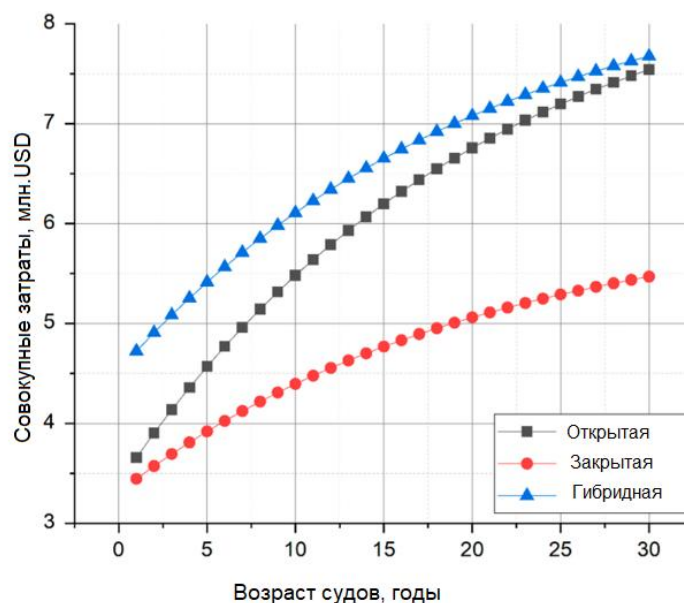


Рис. 13. Совокупные затраты на модернизацию судов при установке скрубберов

1. Основными направлениями по сокращению выбросов  $SO_x$  с морских судов являются: установка скрубберов или переход на топливо с низким содержанием серы. Даже установка скруббера на судне может занять по времени 4–6 недель. Если увеличить количество судов, работающих на СПГ, то здесь тоже могут возникнуть проблемы с размещением топливных танков. Емкость для СПГ может занять примерно 3% полезной вместимости для груза, в то же самое время скруббер занимает место 0,3%.

2. В связи с поэтапным сокращением выбросов  $SO_x$  с 4,5 до 0,5% увеличилось число судов со скрубберами. Если принимать за начало отсчета 2012 г., то это увеличилось в 337 раз.

3. Все существующие типы скрубберов обеспечивают требования по выбросам и зависят от возможностей самих установок и требований нормативно-правовых актов.

4. Скрубберы являются сложными техническими и технологическими комплексами. Естественно, что совокупные затраты на модернизацию судов являются многофакторными величинами, которые зависят в том числе и от возраста самих судов. Если сравнивать затраты на модернизацию при установке скрубберов, то следует отметить, что более дорогими системами будут, как ни странно, гибридная и открытая система. Это связано с контролем соответствия продуктов очистки допустимым концентрациям при сбросе в море. В конечном итоге установка скрубберов скажется на итоговой цене доставки грузов.

5. К применению FONAR необходимо подходить очень тщательно, взвешивая все «за» и «против» такого шага, поскольку он не сможет в полной степени избежать ответственности за превышение концентрации выбросов серы, только поможет в некоторой степени снизить суммы штрафов.

### Литература

1. МАРПОЛ 73/78. Приложение VI (пересмотренное) к Конвенции «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» / ЗАО ЦНИИМФ. – Санкт-Петербург, 2022. – 50 с.
2. Руководство по применению положений Международной Конвенции МАРПОЛ 73/78. НД №2-030 101-049 / ФАУ «Российский морской регистр судоходства». – Санкт-Петербург, 2022. – 135 с.
3. URL: [https://www.korabel.ru/news/comments/otchet\\_o\\_nedostupnosti\\_topliva\\_fonar\\_ruka\\_pomoschi\\_sudovladelcam.html](https://www.korabel.ru/news/comments/otchet_o_nedostupnosti_topliva_fonar_ruka_pomoschi_sudovladelcam.html) (дата обращения: 18.05.2024).

УДК 621.43

**Э.С. Савенко, С.А. Матвиенко**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
Макеевка, 286123  
e-mail: e.s.savenko@donnasa.ru*

### **ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВС ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

Ресурс восстанавливаемых деталей транспортных машин определяется технологией их восстановления. В данной статье представлена технология пластического деформирования металлов, основанная на электрогидравлическом воздействии, заключающемся в использовании энергии высоковольтного импульсного разряда в жидкости для преобразования электрической энергии в механическую и соответствующего изменения формы заготовки. Технологический процесс восстановления поршневых пальцев включает следующие операции: от батареи конденсаторов на два электрода, размещенных на малом расстоянии друг от друга в воде или масле генерируется импульс мощного тока; под воздействием электрического дугового разряда жидкость быстро испаряется, создавая при этом ударную волну; при установке заготовки с матрицей перед ударной волной последняя передает свою энергию, в результате чего заготовка деформируется, принимая форму матрицы. Основными достоинствами этой технологии пластической деформации является низкое потребление энергии, простота оборудования и высокая эффективность обработки. В статье обосновано использование электрогидравлического эффекта для восстановления критических по надежности деталей ДВС транспортных машин – поршневых пальцев.

**Ключевые слова:** восстановление, поршневой палец, электрогидравлическая раздача, установка, проволока.

**E.S. Savenko, S.A. Matvienko**

*Donbass National Academy of Construction and Architecture,  
Makeyevka, 286123  
e-mail: e.s.savenko@donnasa.ru*

### **APPLICATION OF THE ELECTROHYDRAULIC TREATMENT METHOD FOR THE RESTORATION OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES CRITICAL PARTS IN TRANSPORT VEHICLES**

The resource of the restored parts of transport vehicles is determined by the technology of their restoration. The technology of plastic deformation of metals based on electrohydraulic action, which consists in using the energy of a high-voltage pulse discharge in a liquid to convert electrical energy into mechanical energy and a corresponding change in the shape of the workpiece is presented. The technological process of restoring piston pins includes the following operations: a powerful current pulse is generated from a capacitor bank on two electrodes placed at a short distance from each other in water or oil; under the influence of an electric arc discharge, the liquid quickly evaporates, creating a shock wave; when installing a blank with a matrix before the shock wave, the latter transmits its energy, as a result, the workpiece is deformed, taking the form of a matrix. The main advantages of this plastic deformation technology are low energy consumption, simplicity of equipment and high processing efficiency. The use of the electrohydraulic effect for the restoration of critical reliability parts of internal combustion engines of transport vehicles – piston pins is proved.

**Key words:** restoration, piston pin, electrohydraulic distribution, installation, wire.

Основная задача при создании машин заключается в экономии сырья и топливно-энергетических ресурсов, а также во вторичном использовании материальных ресурсов [1–3]. В связи с этим большое значение имеет разработка прогрессивных технологических процессов восстановления критических по надежности деталей силовых установок транспортных машин [4, 5]. К таким относится поршневой палец ДВС.

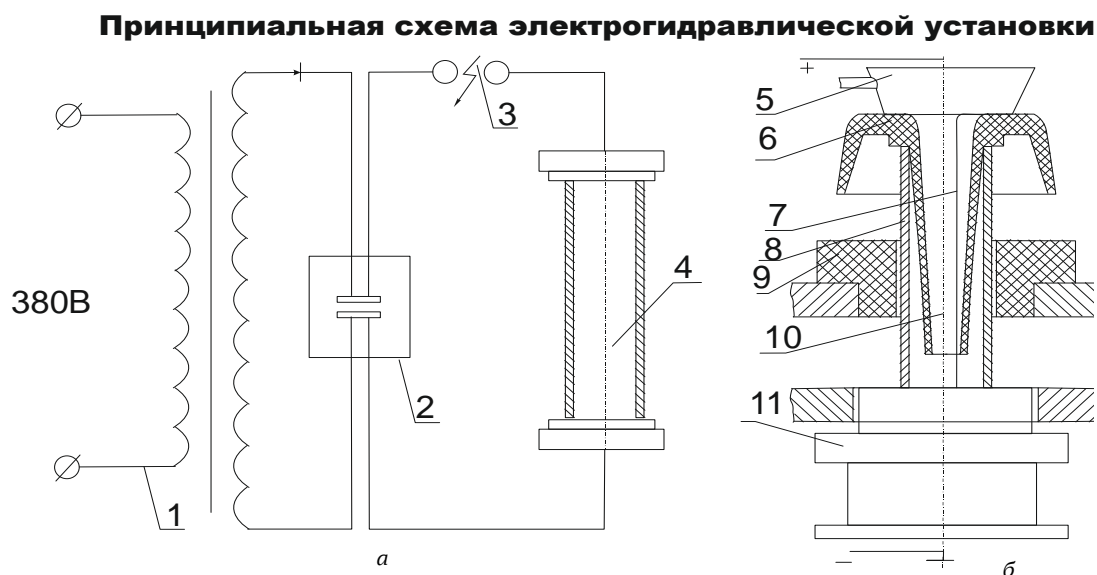
Для применяемых в настоящее время технологий восстановления поршневых пальцев двигателей внутреннего сгорания транспортных машин характерны сложность технологического процесса обработки, низкая производительность обработки, значительные расходы тепловой и электрической энергии [6, 7]. В настоящее время широко применяется способ пластической деформации металла электрогидравлическим воздействием, основанном на использовании энергии высоковольтного импульсного разряда для преобразования электрической энергии в механическую и изменения формы заготовки.

Целью работы является синтез способа пластической деформации на базе электрогидравлической разрядки с целью повышения эффективности восстановления деталей ДВС транспортных машин.

Для достижения поставленной цели работы решались следующие задачи:

- установление зависимостей величины деформации деталей от электрических параметров процесса обработки и применяемого материала изделия;
- разработка математической модели и определение оптимальных режимов и параметров технологического процесса электрогидравлической обработки.

Устройство установки для электрогидравлической обработки представлено на рис. 1.



*Рис. 1. Устройство электрогидравлической установки:  
 а - принципиальная схема электрогидравлической установки: 1 - выпрямительное устройство;  
 2 - блок накопления энергии; 3 - формирующий промежуток; 4 - технологический узел;  
 б - схема технологического узла при восстановлении поршневого пальца:  
 5 - подвижный положительный электрод; 6 - патрон; 7 - взрывающаяся проволока;  
 8 - палец поршневой; 9 - гнезда; 10 - техническая вода; 11 - отрицательный электрод*

Сущность технологического процесса восстановления поршневых пальцев заключается в следующем:

- на первом этапе создается ударная волна электрическим разрядом;
- далее электрическая энергия через зарядное устройство и выпрямитель-трансформатор накапливается в батарее статических конденсаторов;
- при достижении необходимого для процесса значения энергии формирующее устройство замыкает разрядную цепь, и как следствие между рабочими электродами происходит высоковольтный пробой;
- сформированный плазменный шнур за счет расширения вызывает в жидкости образование ударной волны.

На рис. 2 представлены графики зависимостей давления и радиального перемещения стенки детали во внутренней полости детали от времени обработки. Технологические параметры процесса обработки:  $u = 40$  кВ,  $C = 5$  мкФ,  $L = 5,6$  мкГц, взрывающаяся проволочка из Al, диаметром 0,7 мм, длиной 80 мм.



Согласно результатам определения гидродинамических параметров разряда можно сделать следующие выводы:

- изменения радиуса канала разряда прямо пропорциональны времени;
- достигаемые при обработке значения параметров обработки (давление, гидродинамическая скорость) обеспечивают возможность восстановления поршневых пальцев ДВС транспортных машин.

Согласно проведенным вычислениям наибольшая эффективность обработки достигается при применении проволоки из *Al* диаметром менее одного миллиметра и индуктивности цепи в диапазоне 3–12 мкФ.

На рис. 3 представлены зависимости технологических характеристик процесса ЭГР при применении иницирующей проволоки из различных материалов.

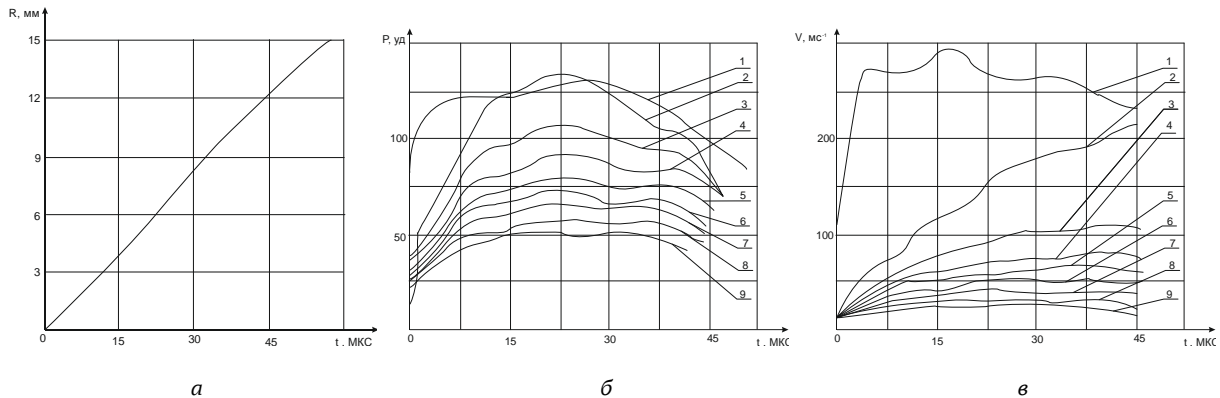


Рис. 2. Результаты вычислений гидродинамических параметров разряда:  
 а – зависимость радиуса канала разряда от времени; б – зависимость давления от времени;  
 в – вариации скорости расширения разряда

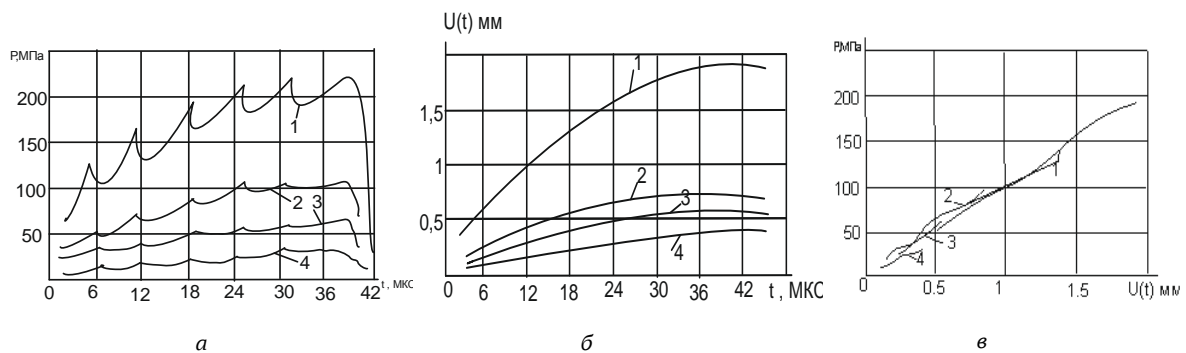


Рис. 3. Графики зависимостей технологических характеристик ЭГР:  
 а – зависимость давления во внутренней полости детали от времени;  
 б – зависимость радиального перемещения стенки заготовки от времени;  
 в – зависимость радиального перемещения стенки от давления во внутренней полости

Согласно результатам исследований применение метода электрогидравлической раздачи при восстановлении ответственных деталей транспортных машин имеет большие технологические перспективы.

### Литература

1. Utomated Diagnostic System for Engine Cylinder – Piston Group / O. Saraiev, I. Saraieva, I. Gritsuk, R. Vrublevskiy, D. Kurnosenko, M. Ahieiev // SAE Technical Paper 2020-01-2022. – 2020. doi: <https://doi.org/10.4271/2020-01-2022>. Mode of access: SAE International (Scopus).
2. Матвиенко С.А. Анализ особенностей влияния эксплуатационных факторов на деталь // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы между-

нар. науч.-техн. конф. (17–19 октября 2018 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2019. – С. 102–105.

3. Моделирование процесса электроразряда при восстановлении поршневых пальцев ДВС / Э.С. Савенко, Н.В. Савенков, С.А. Матвиенко, А.Г. Каспарьянц // Вестник СибАДИ. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 242–255. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-242-255>.

4. Исследование процесса вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда. Построение математической модели процесса / А.В. Дудан и др. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 40–48.

5. Method For Determination of Liquefied Gas Fuel Consumption and Harmful Emissions Of Vehicles / I. Gritsuk, V. Mateichyk, V. Volkov, D. Pohorletsy, M. Bulgakov // Seria: Mechanical Engineering (Inżynieria Mechaniczna) Transport Means Engineering. – Operation, Fuels And Safety – Selected Issues, Rzeszow University of Technology, 2022. – P. 37–44. ISBN 978-83-7934-606-6.

6. Application of Combined Electric Arc Coatings for Parts and Units of Vehicles Recovery in Repair Technologies / M. Ahieiev, I. Gritsuk, A. Litikova, I. Bilousov, R. Vrublevskyi, O. Boboshko, O. Smyrnov, I. Saraieva, I. Khudiakov // SAE Technical Paper 2021-01-5100. – 2021. – P. 17. – DOI: 10.4271/2021-01-5100.

7. Технология применения способа электрогидравлической раздачи для восстановления деталей / Э.С. Савенко, С.А. Матвиенко, В.В. Симонов и др. // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2024. – Т. 20, № 1. – С. 15–24. – URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/spgs/2024-1/st\\_02\\_savenko\\_matvienko\\_simonov\\_belanov\\_gudolin.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2024-1/st_02_savenko_matvienko_simonov_belanov_gudolin.pdf).



УДК 502/504

**А.Д. Талова, О.Р. Рожко**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: talovalina2004@gmail.com*

### **АВТОТРАНСПОРТНАЯ НАГРУЗКА ПЕРЕКРЕСТКОВ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ ПОЧВ КУЛТУЧНОГО ОЗЕРА \***

Статья посвящена исследованию антропогенного воздействия на озеро Култучное, расположенное в центре г. Петропавловска-Камчатского. В работе проанализированы два основных источника воздействия: транспортная нагрузка и загрязнение тяжелыми металлами. Оценен уровень шумового загрязнения от автотранспорта вокруг озера. Проведен анализ содержания Zn, Cu, Pb в прибрежных почвах на шести станциях. Результаты исследования показали значительное влияние автотранспорта на уровень шума в окрестностях озера, а также превышение ПДК меди и свинца в некоторых точках отбора проб почвы. Полученные данные свидетельствуют о необходимости принятия мер по снижению антропогенной нагрузки на экосистему озера Култучного.

**Ключевые слова:** Озеро Култучное, антропогенное воздействие, транспортная нагрузка, шумовое загрязнение, тяжелые металлы, загрязнение почв, экологическое состояние, Петропавловск-Камчатский, мониторинг окружающей среды.

**A.D. Talova, O.R. Rozhko**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: talovalina2004@gmail.com*

### **TRAFFIC LOAD OF INTERSECTIONS AND ASSESSMENT OF COASTAL SOILS CONDITION OF LAKE KULTUCHNOE**

The study of anthropogenic impact on Lake Kultuchnoe, located in the center of Petropavlovsk-Kamchatsky is demonstrated. Two main sources of impact: transport load and heavy metal pollution are analyzed. The level of noise pollution from vehicles at various points around the lake was assessed. The analysis of the content of Zn, Cu, Pb in coastal soils at six stations was carried out. The results of the study showed a significant influence of vehicles on the noise level in the vicinity of the lake, as well as the excess of MPC of copper and lead at some points of soil sampling. The data obtained indicate the need to take measures to reduce the anthropogenic load on the ecosystem of Lake Kultuchnoe.

**Key words:** Lake Kultuchnoe, anthropogenic impact, transport load, noise pollution, heavy metals, soil pollution, ecological condition, Petropavlovsk-Kamchatsky, environmental monitoring.

По данным Камчатстата, на 1 000 жителей края в 2022 г. приходилось 576 автомобилей. Это сравнимо с показателями Западной Европы. В среднем один легковой автомобиль выбрасывает в атмосферу за день около одного килограмма разных токсичных и канцерогенных веществ. Причем подобные вещества способны аккумулироваться и находиться в окружающей среде до 5 лет. При этом, согласно статистике, грузовые машины и автобусы вырабатывают больше выхлопных газов, чем легковые автомобили [1, 2].

Култучное озеро – небольшое озеро в центре Петропавловска-Камчатского. Расположено между Мишенной, Зеркальной и Никольской сопками, отделено от Авачинской бухты узким пе-

---

\* Данная статья заняла первое место в конкурсе на лучшую научную статью студентов, курсантов, молодых ученых КамчатГТУ в номинации «Лучшая неопубликованная научная статья студентов, курсантов, магистрантов» (октябрь 2024 г.).

решейком. Размеры озера – 815 на 283 метра. Глубина достигает 7 метров (по другим данным – 4,5 метра), на дне находится слой ила мощностью до 3 метров [3].

Проводилось исследование на предмет антропогенного воздействия около озера Култучного различными видами транспорта в отдельные промежутки времени в течение дня. Исследование проводилось в точках местности, обозначенных на карте, приведенной ниже (рис. 1).

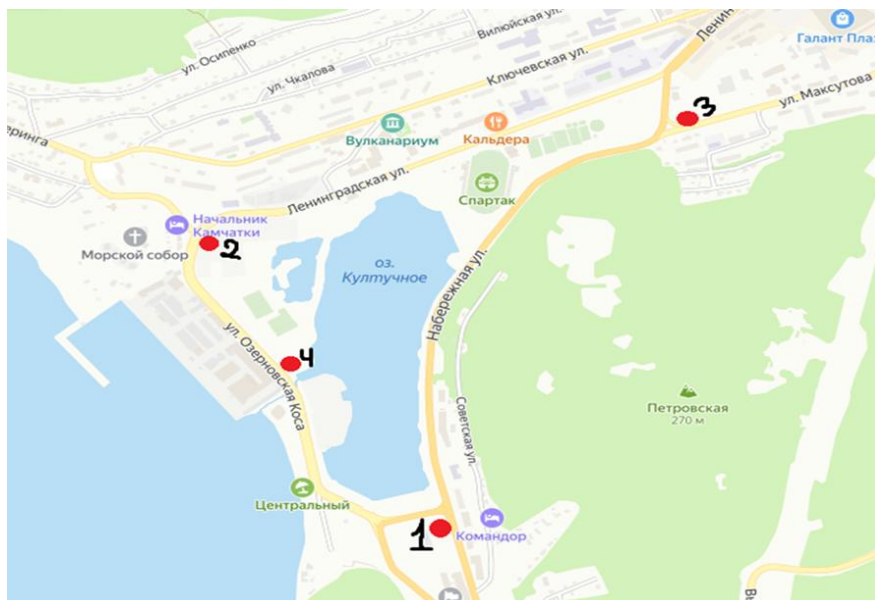


Рис. 1. Месторасположение точек исследования антропогенного воздействия на Култучное озеро

Также, исходя из полученных данных исследования, подготовлен Полевой журнал, приведенный ниже в виде таблицы.

**Полевой журнал обследования характеристик движущегося потока автотранспортных средств**

Точка обследования	Утро/ кол-во (шт.)	День/ кол-во (шт.)	Вечер/ кол-во (шт.)	Дата
Перекресток ул. Советская – ул. Набережная	<u>9.35–9.50</u> Л-515 АМ-29 Г≤12-16 А-34	<u>12.30–12.45</u> Л-426 АМ-14 Г≤12-5 А-25	<u>18.58–19.13</u> Л-514 АМ-2 Г≤12-3 А-24	16.07.2024
Перекресток ул. Озерновская коса и ул. Беринга	<u>9.33–9.47</u> Л-165 АМ-12 Г≤12-3 А-22	<u>12.36–12.51</u> Л-250 АМ-12 Г≤12-2 А-19	<u>18.30–18.45</u> Л-193 АМ-10 Г≤12-2 А-17	16.07.2024
Перекресток ул. Ленинградская и ул. Набережная	<u>9.25–9.40</u> Л-586 АМ-24 Г≤12-3 А-38	<u>12.35–12.50</u> Л-637 АМ-29 Г≤12-2 А-47	<u>18.30–18.45</u> Л-481 АМ-5 А-31	16.07.2024
Вход на Экологическую тропу с ул. Озерновская коса	<u>9.30–9.45</u> Люди – 15	<u>12.30–12.45</u> Люди – 60	-----	16.07.2024

Таким образом, исходя из вышепредставленных данных, можно сделать следующий вывод, что антропогенное воздействие на Култучное озеро в большей степени оказывают легковые автомобили в течение всего дня, например, в точке перекрестка ул. Советская – ул. Набережная отмечено наиболее максимальное воздействие автомобилей в утреннее и вечернее время. На перекрестке ул. Озерновская коса – ул. Беринга отмечено максимальное воздействие в обеденное и вечернее время. На перекрестке ул. Ленинградская – ул. Набережная отмечено максимальное воздействие автомобилей в утреннее и обеденное время.

Также, подмечено, что на Култучное озеро антропогенное воздействие оказывают люди, обычно в обеденное время.

По итогам проведенных исследований можно утверждать, что Култучное озеро подвержено очень сильному антропогенному влиянию. Автомобильное движение осуществляется в большом объеме, вследствие этого возникает большое количество шума, который может доходить до превышения нормы.

Для оценки экологического состояния озера Култучного на основе анализа содержания тяжелых веществ, а именно Zn, Cu, Pb, в прибрежных почвах 03.06.2024 г. провели сбор проб на шести станциях (рис. 2).



Рис. 2. Расположение станций отбора проб почв рядом с оз. Култучным

Район исследований:

Ст. 1 – около пирса озера Култучного;

ст. 2 – около стадиона «Спартак»;

ст. 3 – на платформе озера Култучного;

ст. 4 – в роще ив;

ст. 5 – около скейтпарка;

ст. 6 – около «Этнодеревни».

Мы оценили экологическое состояние озера Култучного с помощью анализа содержания токсичных веществ (Zn, Cu, Pb) в прибрежных почвах (рис. 3).

Все исследованные станции на озере Култучном характеризовались низким уровнем загрязнения металлов.

Превышение ПДК меди было обнаружено на станциях 3, 4, 5, 6, а свинца на станциях 1, 3, 5, 6 [4].

Станция 3 характеризовалась самым низким уровнем загрязнения, а станция 1 – самым высоким.

Проведенное исследование выявило значительное антропогенное воздействие на озеро Култучное в г. Петропавловске-Камчатском. Основными источниками воздействия являются интенсивное автомобильное движение и, как следствие, высокий уровень шумового загрязнения, а также загрязнение прибрежных почв тяжелыми металлами.

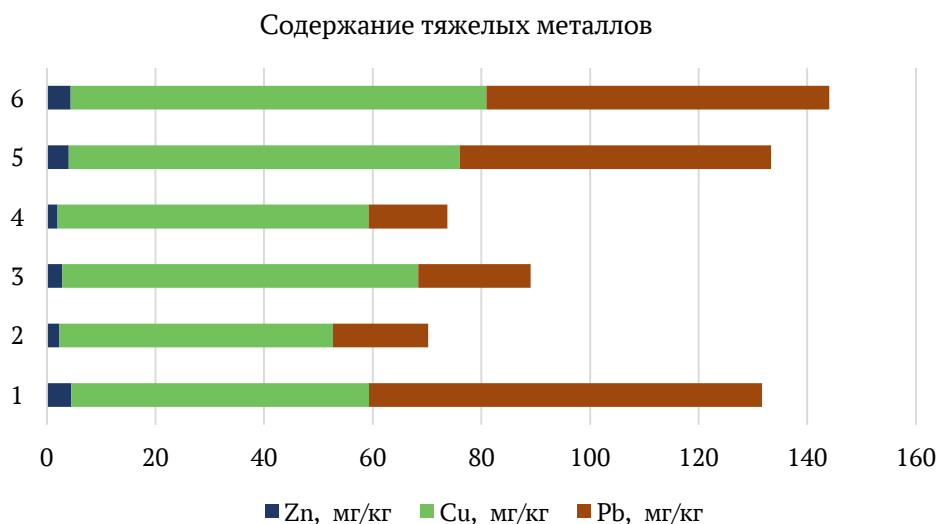


Рис. 3. Гистограмма содержания тяжелых металлов

Анализ содержания Zn, Cu и Pb в почвах показал превышение ПДК меди на станциях 3, 4, 5 и 6, а свинца – на станциях 1, 3, 5 и 6. Наибольший уровень загрязнения отмечен в районе пирса (станция 1), что может быть связано с близостью к автодороге и высокой интенсивностью движения.

### Литература

1. Камчатка сравнялась с Европой по количеству машин [Электронный ресурс]. – URL: <https://kam24.ru/news/main/20231030/101379.html?ysclid=m1q2cyrvbm24809111> (дата обращения: 01.10.2024).
2. Колбасина Н.И., Котов М.М. Химический состав выхлопных газов автотранспорта, его влияние на здоровье человека // Материалы X Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». – 2018.
3. Лобков Е.Г., Карпенко В.И. Экологическое состояние озера Култучное, меры по его улучшению и возможности хозяйственного использования // Сборник докладов науч.-практ. конф. / Сост. и научн. ред. Е.Г. Лобков, В.И. Карпенко. – Петропавловск-Камчатский: Камчат-пресс, 2017.
4. СанПиН 2.1.7.1287-03 «Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы».

УДК 620.22:669

**Р.М. Трибунская, Д.С. Тряпицина**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: rayamt@mail.ru*

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАРОК СПЛАВОВ ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ**

Представлены результаты определения марок сплавов деталей судового редуктора зарубежного производства методами лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии и рентгенофлуоресцентного анализа.

**Ключевые слова:** сплав, банк данных, многоэлементный анализ, массовая доля, лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия, функция позиционирования, рентгенофлуоресцентный анализатор.

**R.M. Tribunskaya, D.S. Tryapitsina**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: rayamt@mail.ru*

## **IDENTIFICATION OF EQUIPMENT PARTS ALLOY GRADES OF FOREIGN MANUFACTURERS**

The results of determination of alloy grades of ship reduction gear parts of foreign production using by methods of laser-spark emission spectrometry and X-ray fluorescence analysis are presented.

**Key words:** alloy, data bank, multi-element analysis, mass fraction, laser-spark emission spectrometry, positioning function, X-ray fluorescent analyzer.

Надежная техническая эксплуатация судов заключается в непосредственном качественном использовании техники, ее техническом обслуживании и ремонте. Материальный износ деталей изделия в целом определяется в изменении ее размеров, формы, механических свойств материалов и т. д., которые сокращают срок их службы.

В процессе ремонта оборудования зарубежного производства очень часто возникают трудности в определении марки сталей и сплавов отдельных деталей на предмет соответствия российским сплавам. В справочниках найти такую информацию не всегда представляется возможным.

Среди недостатков следует отметить отсутствие режима поиска марки сплава в базе данных по известному химическому составу. В СНГ, и в России в частности, функционируют уже довольно много банков по материалам, в подавляющем большинстве они используют персональные компьютеры. В данных содержатся сведения о материале: наименование марки, химический состав, стандарты, область применения, аналоги, небольшая дополнительная информация [1].

При проведении ремонтных работ судна очень остро встал вопрос об изготовлении некоторых деталей судового оборудования, конструкторская документация которого отсутствовала. По заявке предприятия был проведен анализ сплавов деталей оборудования зарубежного производства на предмет соответствия стандартов российским сплавам.

Анализ по определению химического состава проводился на фрагментах деталей методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии [2], в соответствии с требованиями ГОСТ 18895-97 [3], на лазерном спектрометре «ЛИС-01». Специально разработанный лазер и встроенная оптическая система прибора обеспечивают высокую точность и воспроизводимость измерений, позволяют проводить многоэлементный анализ с последующей идентификацией марки материала.

Измерение массовых долей химических элементов в сплавах обследуемых фрагментов осуществлялся по стандартным методам измерений. Контроль образцов с неровными поверхностями проводился с использованием функции позиционирования.

Результаты исследования приведены в табл. 1–4.

Таблица 1

**Химический состав сплава вкладыша редуктора (MIBA 10932010833-6.1 STD)**

№ п/п	Объект контроля	Содержание в % или наличие/отсутствие									Соответствие
		Основа: Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	Al	S	P	
1	Вкладыш редуктора (MIBA 10932010833-6.1 STD)	98,81 ± 0,03	до 0,03	0,22 ± 0,03	0,71 ± 0,06	0,12 ± 0,03	0,08 ± 0,02	0,03 ± 0,01	>0,035	>0,035	Сталь для судостроения повышенной прочности

Таблица 2

**Химический состав сплава вкладыша редуктора (MIBA 04942024249-2.2)**

№ п/п	Объект контроля	Содержание в % или наличие/отсутствие									Соответствие
		Основа: Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	Al	S	P	
2	Вкладыш редуктора (MIBA 04942024249-2.2)	99,43 ± 0,45	до 0,03	0,17 ± 0,03	0,17 ± 0,02	0,17 ± 0,02	0,05 ± 0,03	0,07 ± 0,02	>0,035	>0,035	Сталь конструкционная для сварных конструкций

Таблица 3

**Химический состав сплава подшипника редуктора (внешняя часть)**

№ п/п	Объект контроля	Содержание в % или наличие/отсутствие										Соответствие
		Основа: Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	V	Al	S	P	
3	Подшипник редуктора (внешняя часть)	97,44 ± 0,33	0,16–0,21	0,33 ± 0,04	1,58 ± 0,08	0,14 ± 0,03	0,08 ± 0,02	0,09 ± 0,01	0,02 ± 0,01	>0,035	>0,035	Сталь для судостроения повышенной прочности

Таблица 4

**Химический состав сплава подшипника редуктора (внутренняя часть)**

№ п/п	Объект контроля	Содержание в % или наличие/отсутствие										Соответствие
		Основа: Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	V	Al	S	P	
4	Подшипник редуктора (внутренняя часть)	97,59 ± 0,89	0,17–0,22	0,36 ± 0,05	1,57 ± 0,10	0,15 ± 0,03	0,14 ± 0,03	0,08 ± 0,02	0,03 ± 0,01	>0,035	>0,035	Сталь для судостроения повышенной прочности

Рентгеноспектральный анализ химического состава цветного сплава пальца направляющей проводилось портативной лабораторией Niton XL2 (рентгенофлуоресцентный анализатор) по двум пробам, результаты определения в табл. 5.

Химический состав сплава пальца направляющей

№ п/п	Объект контроля	№ пробы	Содержание в % или наличие/отсутствие									Общая сумма примесей
			Cu	Pb	Si	Sn	Sb	Fe	Al	Mn	Zn	
5	Палец направляющей	1	Ост	0,46	0,01	9,95	0,02	0,014	0,01	0,01	2,08	< 1,0
		2	Ост	0,38	0,01	9,23	0,02	0,014	0,01	0,01	1,84	< 1,0
		Норма по ГОСТ 613-79	Ост	Не более 0,5	Не более 0,02	9,0-10		Не более 0,3	Не более 0,02		1,0-3,0	Не более 1,0

Результаты механических испытаний, например, пальца направляющей показали следующие значения: твердость 220-222 НВ, временное сопротивление на разрыв Rm 650-700 МПа, предел текучести Re  $\geq$  250 МПа, относительное удлинение A5 10%.

На основании проведенных исследований было установлено:

а) фрагменты деталей судовых механизмов соответствуют примерным аналогам:

– вкладыш редуктора (МІВА 10932010833-6.1 STD): сталь для судостроения повышенной прочности D27S, E27S, E, A27S;

– вкладыш редуктора (МІВА 04942024249-2.2): сталь конструкционная для сварных конструкций 09Г2-1, 09ГСФЕ;

– подшипник редуктора (внешняя часть): сталь для судостроения повышенной прочности А32, D32;

– подшипник редуктора (внутренняя часть): сталь для судостроения повышенной прочности А36, D36;

б) сплав пальца направляющей по химическому составу и механическим свойствам соответствует марке литейной бронзы BrO10Ц2.

### Литература

1. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 2003. – 783 с.
2. Спектральные методы анализа. Практическое руководство / В.И. Васильева, И.В. Шкутина, О.Ф. Стоянова, С.И. Карпов. – СПб.: Лань, 2022. – 416 с.
3. ГОСТ 18895-97 Сталь. Методы фотоэлектрического спектрального анализа.

УДК 621.314.21:51-74

**Г.В. Фотченко**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: galina\_fotchenko@mail.ru*

**АППРОКСИМАЦИЯ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛИ  
ТРАНСФОРМАТОРА ТРДН-40000/230-У1  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОЦЕНКЕ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ**

Наиболее известным случаем проявления геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в электрических сетях является выход из строя 13 марта 1989 г. системы электроснабжения провинции Квебек, Канада. Причиной этого происшествия стало протекание ГИТ через силовые трансформаторы. Для диагностики ГИТ в высоковольтных линиях нами используются гармоники тока, протекающего в них. Их генерация зависит от степени нелинейности системы, в данном случае трансформаторов. Нелинейность трансформаторов определяется функцией намагниченности стали, входящей в их состав, которая приводится в виде таблицы. Для анализа процессов воздействия ГИТ на трансформаторы необходимо эту зависимость получить в виде аналитического выражения, что возможно при использовании операции аппроксимации. Известные подходы аппроксимации, используемые в электротехнике, ориентированы на получение аналитического выражения для работы на участке кривой намагниченности, соответствующей насыщению. В нашем случае, поскольку величина ГИТ мала по сравнению с токами, протекающими в трансформаторе, необходимо разработать подход, который бы учитывал эту особенность. Исходя из проведенного сопоставления различных подходов аппроксимации показано, что в большей степени этой задаче отвечает аппроксимация Берга.

**Ключевые слова:** геомагнитно-индуцированные токи, трансформаторы, кривые намагничивания, аппроксимация, коэффициенты Берга, гиперболический синус.

**G.V. Fotchenko**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: galina\_fotchenko@mail.ru*

**APPROXIMATION OF THE MAGNETIZATION CURVES  
OF TRANSFORMER TRDN-40000/230-U1 STEEL  
IN RELATION TO THE ASSESSMENT OF GEOMAGNETIC-INDUCED CURRENTS**

The most famous case of geomagnetic-induced currents (GIT) in electrical networks is the failure of the power supply system of the province of Quebec, Canada on March 13, 1989. The cause of this incident was the leakage of GIT through power transformers. To diagnose GIT in high-voltage lines, we use harmonics of the current flowing in them. Their generation depends on the degree of nonlinearity of the system, in this case transformers. The nonlinearity of transformers is determined by the magnetization function of the steel included in their composition, which is given in the form of a table. To analyze the processes of GIT exposure to transformers, it is necessary to obtain this dependence in the form of an analytical expression, which is possible when using the approximation operation. Known approximation approaches used in electrical engineering are focused on obtaining an analytical expression for working on a section of the magnetization curve corresponding to saturation. In our case, since the GIT value is small compared to the currents flowing in the transformer, it is necessary to develop an approach that would take this feature into account. Based on the comparison of various approximation approaches, it is shown that Berg's approximation meets this task to a greater extent.

**Key words:** geomagnetic-induced currents, transformers, magnetization curves, approximation, Berg coefficients, hyperbolic sine.



Основное воздействие ГИТ на системы электроснабжения заключается в насыщении магнитопроводов силовых трансформаторов, сдвигая рабочий линейный режим силовых трансформаторов в нелинейную часть кривой намагничивания. При этом часть магнитного потока вытесняется из магнитопровода, увеличивается поток рассеяния, что вызывает дополнительные потери и нагрев конструктивных элементов силовых трансформаторов. Дополнительный нагрев твердой изоляции и масла вызывает газообразование, что может привести к срабатыванию газовой защиты и отключению силовых трансформаторов, а также приводит к снижению срока их эксплуатации. В связи с этим учет влияния геомагнитно-индуцированных токов при геомагнитных бурях на режимы работы силовых трансформаторов в системах электроснабжения является актуальным.

Диагностика геомагнитно-индуцированных токов в высоковольтных линиях может быть прямой, когда в нулевой провод включается регистратор, и косвенный, например, путем регистрации высших гармоник, с последующим анализом их вариаций. Для этого подхода важно получить аналитическое выражение, которое бы адекватно описывало нижний участок кривой намагничивания трансформаторной стали.

В данной работе построены и сравниваются три вида аппроксимирующих функций для кривых намагничивания стали марки Э-43 (1513), которая используется в сердечнике трансформатора ТРДН-40000/230-У1. Все расчеты выполнялись в программе Wolfram Mathematica.

Листовая электротехническая сталь марки Э-43 (1513), которая используется в сердечнике трансформатора ТРДН-40000/230-У1, характеризуется кривой намагничивания  $B = f(H)$ , которая является нелинейной относительно физических величин, которые ее описывают, где  $B$  – магнитная индукция, а  $H$  – соответствующая ей напряженность магнитного поля. Кривые намагничивания можно часто встретить либо в графической форме (рис. 1), либо в табличной (табл. 1). Но это не всегда удобно при практической работе с ними.

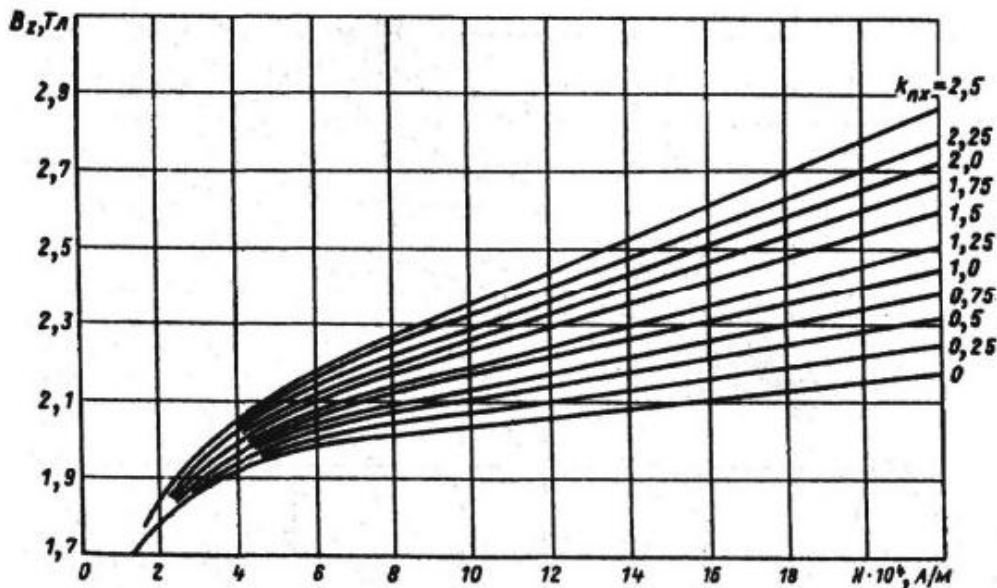


Рис. 1. Кривые намагничивания стали марок 1511, 1512, 1513 [1]

Таблица 1

Листовая электрическая сталь марок 1511, 1512, 1513 (высоколегированная) [1]

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	96	97	98	99	100	102	104	106	108	111
0,5	114	117	120	123	126	129	132	136	140	144
0,6	148	152	156	160	164	168	172	177	182	187
0,7	192	197	202	208	214	220	226	233	240	247
0,8	254	261	268	275	282	289	296	303	310	317
0,9	325	333	341	349	358	367	376	385	394	404

В,Тл	H, А/м									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1	414	424	435	446	458	470	483	496	510	524
1,1	538	553	569	586	604	623	643	664	685	707
1,2	730	754	780	810	840	870	900	940	980	1 030
1,3	1 080	1 140	1 200	1 270	1 340	1 410	1 490	1 590	1 600	1 720
1,4	1 940	2 060	2 200	2 340	2 500	2 700	2 920	3 140	3 370	3 600
1,5	3 850	4 060	4 290	4 520	4 760	5 000	5 300	5 650	6 000	6 350
1,6	6 700	7 100	7 600	8 100	8 650	9 300	10 000	10 700	11 400	12 200
1,7	13 000	14 000	15 000	16 000	17 000	18 000	19 000	20 000	21 000	22 000
1,8	23 000	24 000	25 000	26 000	27 000	28 000	29 000	30 000	31 200	32 500
1,9	34 000	35 500	37 000	38 500	40 500	42 500	45 000	51 000	57 000	63 000
2	70 000	77 000	84 500	92 000	10 000	108 000	116 000	124 000	138 000	140 000
2,1	148 000	156 000	164 000	172 000	180 000	188 000	196 000	204 000	212 000	220 000
2,2	228 000	236 000	244 000	252 000	260 000	268 000	276 000	284 000	292 000	300 000

Первый вид аппроксимации, который рассмотрим в данной работе, – аппроксимация степенным полиномом. По табл. 1 построим кривую намагничивания (рис. 2).

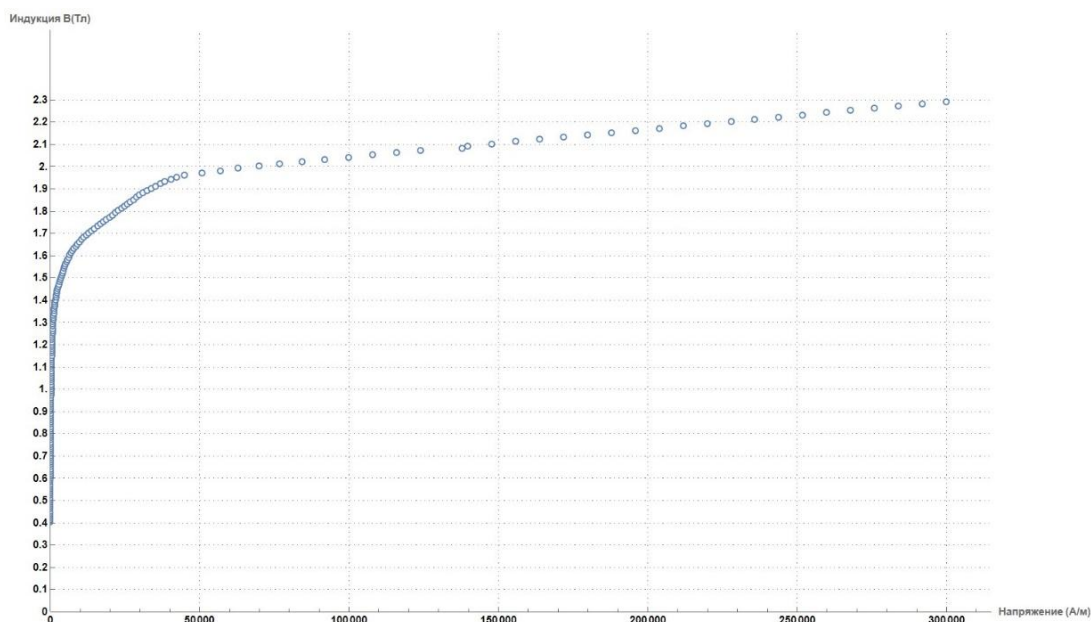


Рис. 2. Кривая намагничивания стали марки Э-43 (1513)

На представленном графике просматриваются два участка с различной степенью нелинейности. Поэтому аппроксимацию проведем для двух участков, показанных на рис. 3 и 4.

Аппроксимирующая функция для графика на рис. 3 представлена полиномом пятой степени:

$$H = -3,5332456243625048 + 0,10991605367028222x - 0,0012156837379048646x^2 + 0,00000681437186530284x^3 - 1,88800029149693 \times 10^{-8}x^4 + 2,058655201224211 \times 10^{-11}x^5.$$

Аппроксимирующую функцию для графика на рис. 4 можно представить полиномом семнадцатой степени:

$$H = 0,2098213379944748 + 0,003284077249485969x - 0,000004719872526977097x^2 + 4,245842903674483 \times 10^{-9}x^3 - 2,530748893585385 \times 10^{-12}x^4 + 1,044899843798764 \times 10^{-15}x^5 - 3,089288778610704 \times 10^{-19}x^6 + 6,705106785772133 \times 10^{-23}x^7 - 1,087527307524367 \times 10^{-26}x^8 + 1,333274461728825 \times 10^{-30}x^9 - 1,242166222151008 \times 10^{-34}x^{10} + 8,787251740917203 \times 10^{-39}x^{11} - 4,682271365958629 \times 10^{-43}x^{12} + 1,846829045668346 \times 10^{-47}x^{13} - 5,224656759115237 \times 10^{-52}x^{14} + 1,001878009309573 \times 10^{-56}x^{15} - 1,165741787226933 \times 10^{-61}x^{16} + 6,211188028109788 \times 10^{-67}x^{17}.$$

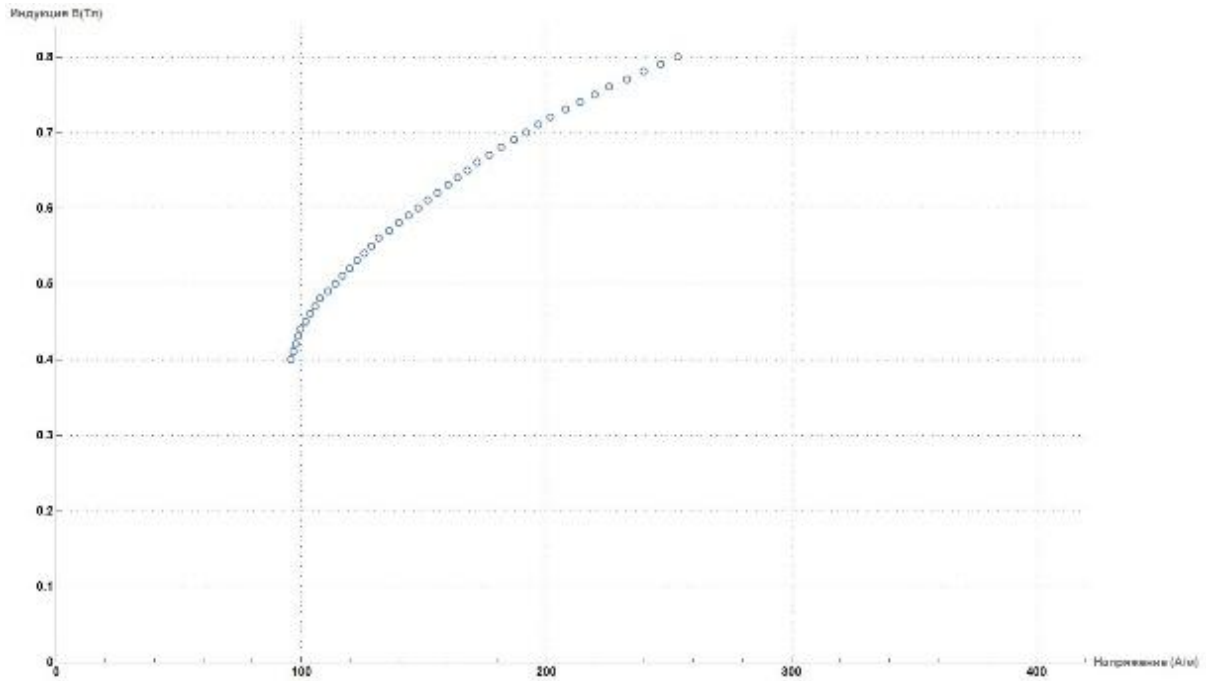


Рис. 3. Кривая намагничивания стали марки Э-43 (1513) при  $0 < B < 0,8$  (Тл)

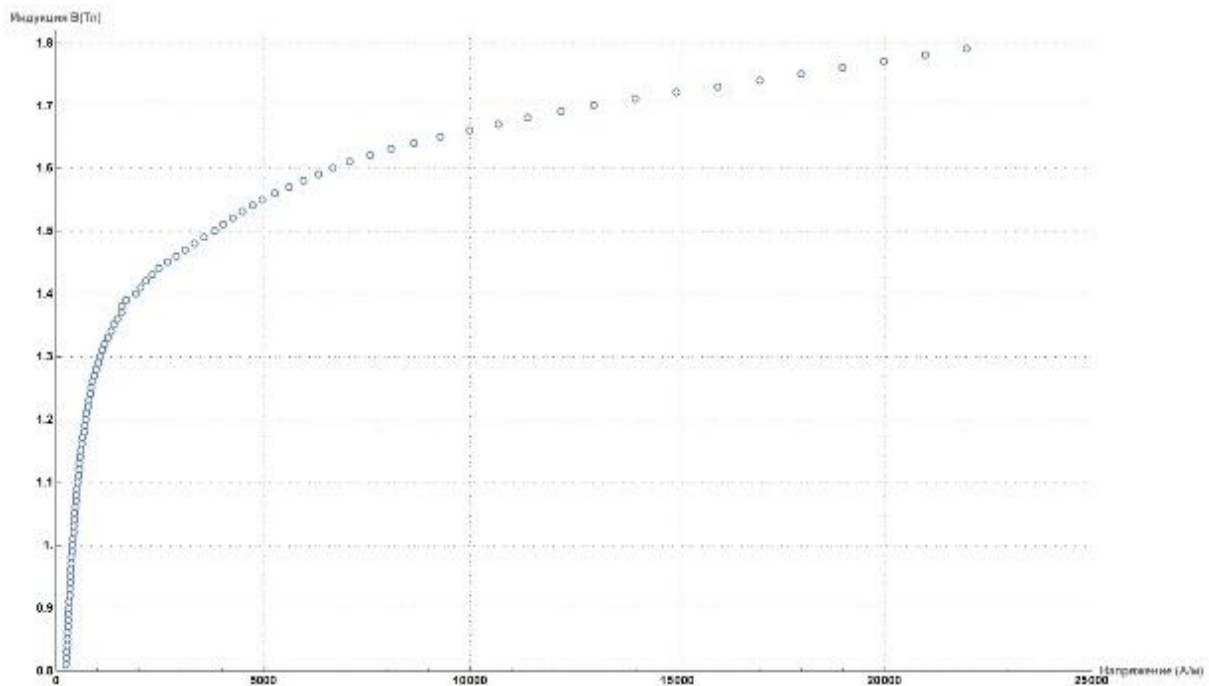


Рис. 4. Кривая намагничивания стали марки Э-43 (1513) при  $0,8 < B < 1,8$  (Тл)

Очевидно, что в этом методе формально достигнута большая точность аппроксимации, однако она не дает возможности оценить поведение гармонических составляющих для разных значений ГИТ (рис. 5 и 6).

Аппроксимация гиперболическим синусом показана в публикации [2]. При тех же вводных данных получаем следующий график (рис. 7).

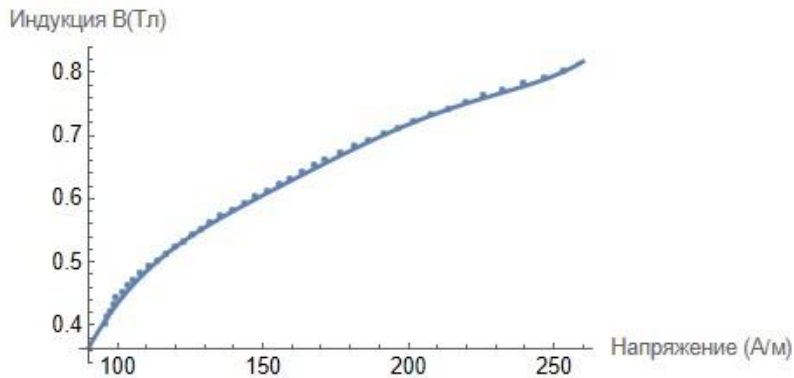


Рис. 5. Аппроксимация кривой намагничивания стали марки Э-43 (1513) при  $0 < B < 0,8$  (Тл)

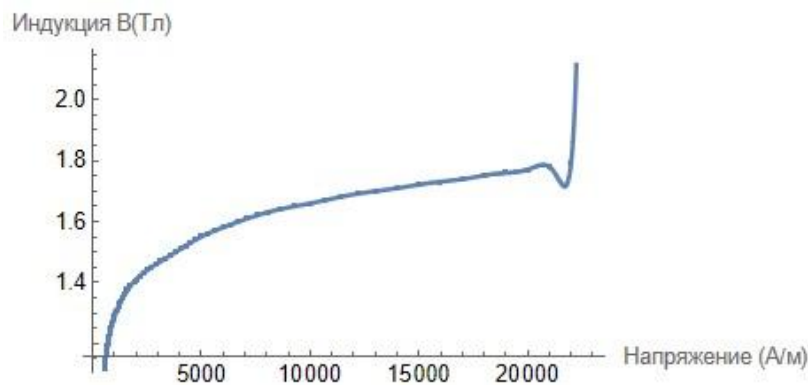


Рис. 6. Аппроксимация кривой намагничивания стали марки Э-43 (1513) при  $0,8 < B < 1,8$  (Тл)

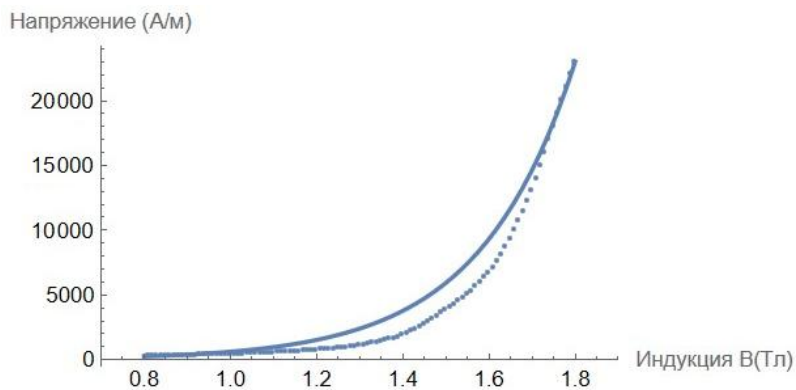


Рис. 7. Аппроксимация кривой намагничивания стали марки Э-43 (1513) гиперболическим синусом

Показанный метод показал хорошие результаты для случая в электрических машинах с прямоугольными пазы на роторе, т. е. электрических двигателей. Однако он не позволяет оценить вариации высших гармонических составляющих.

В радиотехнике для оценки степени нелинейности при больших амплитудах используется аппроксимация методом коэффициентов Берга [3]:

$$\alpha_n(\theta) = \frac{I_n}{I_{\max}}$$

где  $\theta$  – угол отсечки, угол, соответствующий изменению тока от максимального значения до нуля,  
 $I_n$  – величина  $n$  гармоники тока,  
 $I_{\max}$  – максимальная амплитуда тока.

Для первой гармоники

$$\alpha_1(\theta) = \frac{\theta - \cos\theta \sin\theta}{\pi(1 - \cos\theta)}$$

Для гармоник выше второй коэффициенты определяются как

$$\alpha_n(\theta) = \frac{2(\sin\theta \cos\theta - n \cos n\theta \sin\theta)}{\pi n(n^2 - 1)(1 - \cos\theta)}$$

Расчет зависимости коэффициентов Берга от угла отсечки показаны на рис. 8.

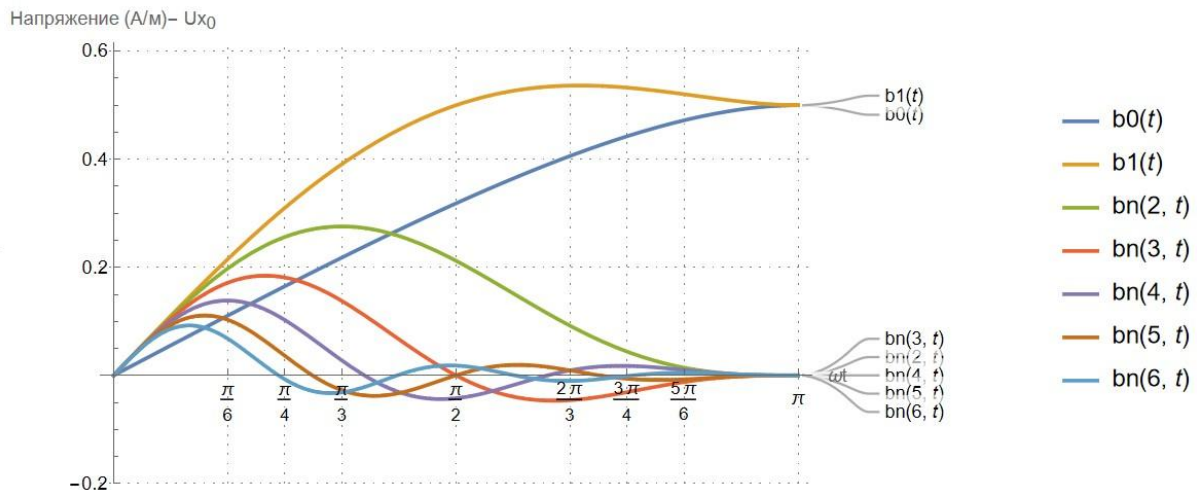


Рис. 8. Зависимость коэффициентов Берга от угла отсечки

Из характера изменения коэффициентов Берга следует, что вторая гармоника велика по амплитуде и изменяется достаточно быстро, что свидетельствует о ее значительной зависимости от режима нелинейного элемента, т. е. трансформатора, и делает ее непригодной для использования в наших целях. Восьмая гармоника обладает малым уровнем, что снижает точность диагностики при наличии шумов.

Проведенное сопоставление различных способов аппроксимации кривых намагничивания стали сердечников трансформатора показал наибольшую эффективность аппроксимации по Бергу.

Наиболее подходящими для диагностики ГИТ в высоковольтных линиях электропередач являются четвертая и шестая гармоники тока.

### Литература

1. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А. Методика расчёта высших гармоник токов намагничивания понижающих трансформаторов // Электричество. – 1998. – № 3.
2. Касьяненко М.Г., Матюхов В.Ф., Ваганов М.А. Аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей при проектировании электрических машин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – № 9.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для высших учебных заведений. – М.: Радио и связь, 1986.

УДК 629.5.062:51-74

**Г.В. Фотченко, О.А. Белов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: kletn@yandex.ru*

### **ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

В процессе эксплуатации судовой энергетической установки возникает необходимость прогнозирования ее технического состояния на определенный период времени. Точность такого прогноза позволяет определить эффективность эксплуатации судна как с экономической точки зрения, так и в вопросах обеспечения безопасности мореплавания. Это определяет актуальность разработки и использования адекватных методов прогнозирования технического состояния как отдельных элементов, так и судовой энергетической установки в целом. Теория надежности предлагает апробированный математический аппарат для определения показателей надежности технической системы. Однако в большинстве случаев на практике реализация математических методов оказывается достаточно сложной и вызывает затруднения при их использовании. В связи с этим возникает задача адаптации численных методов под конкретные судовые условия и требуется разработка специальных алгоритмов вычислений применительно к судовой энергетической установке. В статье предлагается алгоритм численной оценки основных показателей надежности на примере невосстанавливаемых элементов судовой энергетической установки.

**Ключевые слова:** техническая эксплуатация, математический аппарат, численные методы, надежность, эффективность, безопасность, вероятность отказа, наработка до отказа.

**G.V. Fotchenko, O.A. Belov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: kletn@yandex.ru*

### **NUMERICAL METHODS FOR ASSESSING SOME INDICATORS OF MARINE POWER PLANT RELIABILITY**

During the operation of a ship's power plant, it becomes necessary to forecast its technical condition for a certain period of time. The accuracy of such a forecast allows us to determine the efficiency of vessel operation both from an economic point of view and in matters of ensuring navigation safety. This determines the relevance of developing and using adequate methods for forecasting the technical condition of both individual elements and the ship's power plant as a whole. Reliability theory offers a proven mathematical apparatus for determining the reliability indicators of a technical system. However, in most cases, the implementation of mathematical methods turns out to be quite complex and causes difficulties in their use. In this regard, the problem of adapting numerical methods to specific ship conditions arises and it is necessary to develop special calculation algorithms applicable to the ship's power plant. The algorithm for numerically assessing the main reliability indicators using the example of non-recoverable elements of the ship's power plant is proposed.

**Key words:** technical operation, mathematical apparatus, numerical methods, reliability, efficiency, safety, probability of failure, time to failure.

Как известно, событие, которое приводит объект из исправного или работоспособного состояния в неработоспособное, называется отказом. Согласно теории надежности, независимо от классификационного признака отказа, все они имеют случайную природу возникновения. С точки зрения эксплуатации судовой энергетической установки требуется аргументация этого события, так как основной задачей эксплуатации является обеспечение работоспособного состояния технической системы. Для определения периодичности технического обслуживания, необходи-

мых материалов и запасных частей финансовых затрат необходимо понимание вероятности возникновения отказа в определенный период времени [1, 2].

Таким образом, для качественного решения задач технической эксплуатации СЭУ требуется информация двух типов:

1. Время исправной работы технического объекта до отказа (средняя наработка до отказа)  $T$ .
2. Возможное число отказов за конкретный временной интервал  $N [t_{i-1}, t_i]$ .

Учитывая, что обе эти величины также носят случайный характер, для решения практической задачи необходимо использовать законы распределения случайных величин, как наиболее полной их характеристики. Функция распределения случайной величины  $T$ , или функция ненадежности, имеет вид [3]:

$$Q(t) = P\{T < t\}, \quad (1)$$

где  $Q(t)$  – вероятность отказа.

Обратная ей функция надежности имеет вид:

$$R(t) = 1 - Q(t) = P\{T \geq t\}, \quad (2)$$

где  $R(t)$  – вероятность безотказной работы.

Частота отказов в технической системе является экспериментальной величиной и определяется как

$$Q^*(t) = \frac{n(t)}{m(0)}, \quad (3)$$

где  $n(t)$  – число отказавших невосстанавливаемых элементов технической системы;

$m(0)$  – общее число однотипных невосстанавливаемых элементов на начало эксплуатации.

Точечная оценка определяет искомый параметр одним числом и в большинстве случаев является недостаточной характеристикой элементов судовой энергетической установки. Это вызывает необходимость интервального оценивания параметров надежности.

Для исключения возможных ошибок принято обозначать доверительную вероятность и уровень значимости одностороннего интервала через  $\delta_1$  и  $\gamma_1$ , а для двустороннего –  $\delta_2$  и  $\gamma_2$ . Согласно [4] значения  $\delta_1$  и  $\gamma_1$  определяются выражениями:

$$\delta_1 = 1 - \gamma_1 = \frac{1 + \delta_2}{2} = 1 - \frac{\gamma_2}{2}, \quad (4)$$

$$\gamma_1 = 1 - \delta_1 = \frac{\gamma_2}{2} = \frac{1 - \delta_2}{2}. \quad (5)$$

Для определения значения нижнего доверительного предела  $Q_n$  и верхнего доверительного предела  $Q_b$  используем выражения:

$$Q_n = \frac{Q_{n0} Q_{n1}}{Q_{n0} u + Q_{n1} (1 - u)}, \quad (6)$$

$$Q_b = \frac{Q_{b0} Q_{b1}}{Q_{b0} u + Q_{b1} (1 - u)}. \quad (7)$$

где  $u$  – коэффициент интерполяции.

Наиболее простым и доступным, при этом достаточно точным, является способ вычислений по приближенной формуле Муавра – Лапласа:

$$Q_{\text{н}} \approx \frac{2n+1+z_{\delta_1}^2 - \sqrt{z_{\delta_1}^4 + (4n - \frac{4n^2}{m} + 2 - \frac{4n}{m} - \frac{1}{m})z_{\delta_1}^2}}{2(m+z_{\delta_1}^2)}, \quad (8)$$

$$Q_{\text{в}} \approx \frac{2n+1+z_{\delta_1}^2 + \sqrt{z_{\delta_1}^4 + (4n - \frac{4n^2}{m} + 2 - \frac{4n}{m} - \frac{1}{m})z_{\delta_1}^2}}{2(m+z_{\delta_1}^2)}, \quad (9)$$

где  $z_{\delta_1}$  – аргумент функции нормального распределения.

Важным параметром оценки надежности элементов судовой энергетической установки является значение средней наработки до отказа  $T$ . При нормальном законе распределения точечной оценкой средней наработки до отказа будет выражение [4]:

$$\bar{T} = T = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i}{m}, \quad (10)$$

где  $\tau_i$  – время безотказной работы  $i$ -го изделия.

Для повышения точности вычислений при малых значениях  $m$ , что является характерным для элементов судовой энергетической установки, целесообразно использование поправки Бесселя. Тогда несмещенная и состоятельная точечная оценка дисперсии примет вид:

$$\tilde{D}[T] = \frac{\sum_{i=1}^m (\tau_i - \bar{T})^2}{m-1} = \frac{mD^*(T)}{m-1}. \quad (11)$$

Если случайная величина  $T$  подчиняется нормальному закону распределения с параметрами  $\bar{T}$ ,  $\sigma$ , то и ее математическое ожидание как величина случайная, изменяющаяся от одной выборки к другой, также подчиняется нормальному закону распределения с параметрами:

$$M(\tilde{T}) = \bar{T} \quad \text{и} \quad D(\tilde{T}) = \frac{1}{m} \tilde{D}(T). \quad (12)$$

Полагая ошибку при оценке средней наработки одинаковой в обе стороны, нижнюю и верхнюю доверительные границы можно выразить через величину этой ошибки.

$$\bar{T}_{\text{н}} = \bar{T}^* - \varepsilon_{\delta_2} = \bar{T}^* - z^2 \sigma_{\bar{T}}, \quad (13)$$

$$\bar{T}_{\text{в}} = \bar{T}^* + \varepsilon_{\delta_2} = \bar{T}^* + z^2 \sigma_{\bar{T}}, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_{\delta_2}$  – ошибка при оценке средней наработки;

$z_2$  – аргумент нормирования функции Лапласа.

Практическое использование методов численной оценки средней наработки до отказа позволяет определить количество запасных элементов для восстановления работоспособности установки на заданный период эксплуатации. Например, в период эксплуатации судовой энергетической установки в результате наблюдения за подшипниками электрокомпрессорных агрегатов в количестве  $m = 10$  штук произошло  $n = 2$  отказа. Необходимо определить доверительный интервал вероятности отказа  $Q^*(t, \Delta t)$  с коэффициентом доверия  $\delta_2 = 0,95$ . Определить верхнюю доверительную границу  $Q_{\delta_1}(t, \Delta t)$  при  $\delta_1 = 0,95$ .

Точечная оценка вероятности отказа вычисляется по формуле (3):

$$Q^*(t) = \frac{n(t)}{m(0)} = \frac{2}{10} = 0,2.$$



Найдем коэффициент доверия одностороннего доверительного интервала  $\delta_1$  и уровень значимости  $\gamma_1$  по формулам (4) и (5):

$$\delta_1 = \frac{1 + \delta_2}{2} = \frac{1 + 0,95}{2} = 0,975; \quad \gamma_1 = 1 - \delta_1 = 0,025.$$

По табл. 5.2 [5] для  $\delta_1 = 0,975$  находим строку для  $n = 2$  и два соседних столбца с величиной  $v_0 = 9$ , для которой  $Q_{v_0} = 0,518$  и  $Q_{n0} = 0,023$ , а для  $v_1 = 10$  имеем  $Q_{v_1} = 0,484$  и  $Q_{n1} = 0,021$ .

Поскольку число  $v = m - n = 8$ , в нашем случае применим интерполяцию с коэффициентом

$$u = \frac{v - v_0}{v_1 - v_0} = \frac{8 - 9}{10 - 9} = -1$$

и найдем по формулам (6) и (7) значения верхнего и нижнего доверительного предела:

$$Q_B = \frac{Q_{v_0} Q_{v_1}}{Q_{v_0} u + Q_{v_1} (1 - u)} = \frac{0,518 \cdot 0,484}{0,518 \cdot (-1) + 0,484 \cdot 2} = \frac{0,2507}{0,45} = 0,557;$$

$$Q_H = \frac{Q_{n0} Q_{n1}}{Q_{n0} u + Q_{n1} (1 - u)} = \frac{0,023 \cdot 0,021}{0,023 \cdot (-1) + 0,021 \cdot 2} = \frac{0,000483}{0,019} = 0,025$$

Аналогично верхняя граница для одностороннего интервала при  $\delta_1 = 0,95$  будет  $Q_{v\delta_1} = 0,507$ .

Доверительный интервал по приближенным формулам Муавра - Лапласа (8) и (9) будет иметь следующие границы:

$$Q_B = \frac{2n + 1 + z_{\delta_1}^2 + \sqrt{z_{\delta_1}^4 + (4n - \frac{4n^2}{m} + 2 - \frac{4n}{m} - \frac{1}{m})z_{\delta_1}^2}}{2(m + z_{\delta_1}^2)} = \frac{5 + (1,96)^2 + 1,96\sqrt{(1,96)^2 + (10 - \frac{25}{10})}}{2(10 + (1,96)^2)} =$$

$$= \frac{15,4423}{27,6832} = 0,5578$$

$$Q_H = \frac{2n + 1 + z_{\delta_1}^2 - \sqrt{z_{\delta_1}^4 + (4n - \frac{4n^2}{m} + 2 - \frac{4n}{m} - \frac{1}{m})z_{\delta_1}^2}}{2(m + z_{\delta_1}^2)} = \frac{5 + (1,96)^2 - 1,96\sqrt{(1,96)^2 + (10 - \frac{25}{10})}}{2(10 + (1,96)^2)} =$$

$$= \frac{2,2409}{27,6832} = 0,081$$

$$Q_{v\delta_1} = \frac{2n + 1 + z_{\delta_1}^2 + \sqrt{z_{\delta_1}^4 + (4n - \frac{4n^2}{m} + 2 - \frac{4n}{m} - \frac{1}{m})z_{\delta_1}^2}}{2(m + z_{\delta_1}^2)} = \frac{5 + (1,645)^2 - 1,645\sqrt{(1,645)^2 + (10 - \frac{25}{10})}}{2(10 + (1,645)^2)} =$$

$$= \frac{12,962}{25,412} = 0,51$$

где  $z_{\delta_1} = \Phi^{-1}(\delta_1)$  - аргумент функции нормального распределения, при котором функция нормального распределения  $\Phi(z_{\delta_1}) = \delta_1$ .

Часто используемые коэффициенты доверия  $\delta_1$  соответствуют аргументам, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Соответствие коэффициентов доверия аргументам функций

Коэффициент доверия	$\delta_1$	0,900	0,950	0,975
Аргумент функции	$z_{\delta_1}$	1,282	1,645	1,960

Результаты показывают, что в сравнении со значением нижней границы двустороннего интервала, определенного по формулам (6) и (7), формулы (8) и (9) сужают доверительный интервал. Односторонняя граница при коэффициенте доверия  $\delta_1 = 0,95$  сужает интервал, так как  $\delta_1 = 0,95 < 0,975 = \delta_1$  при  $\delta_2 = 0,95$ .

При небольшом числе опытов  $m$  частота отказов  $Q^*(t)$  является случайной величиной. С увеличением числа опытов частота  $Q^*(t)$  стабилизируется, и ее принимают за точечную оценку вероятности отказа.

Таким образом, чем больше однотипных элементов судовой энергетической установки составляют исходную выборку, тем точнее результаты расчетов. Также имея достаточную выборку элементов с данными наработки до отказа  $\tau_i$ (ч) каждого  $i$ -го элемента можно численно оценить среднюю наработку до отказа и построить доверительные интервалы с заданным коэффициентом доверия  $\delta_2$  (табл. 2).

Таблица 2

Пример случайной выборки элементов

$i$	$\tau_i$	$i$	$\tau_i$	$i$	$\tau_i$	$i$	$\tau_i$
1	4 300	6	5 238	11	14 909	16	11 754
2	9 007	7	129	12	16 323	17	9 778
3	10 235	8	10 501	13	9 592	18	13 380
4	12 101	9	15 560	14	7 607	19	6 920
5	5 603	10	8 806	15	18 403	20	13 108

Точечную оценку средней наработки до отказа, ее дисперсии и среднего квадратичного отклонения находим по формулам (10)–(12):

$$\bar{T} = T^* = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i}{m} = \frac{203254}{20} \approx 10163 \text{ ч};$$

$$\bar{D}[T] = \frac{m}{m-1} D^*[T] = \frac{\sum_{i=1}^m (\tau_i - \bar{T})^2}{m-1} = \frac{383731378}{19} \approx 20196388 \text{ ч}^2;$$

$$\sigma[T] = \sqrt{\bar{D}[T]} = \sqrt{20196388} \approx 4494 \text{ ч}.$$

По формулам (13) и (14) определим границы двустороннего доверительного интервала при  $\delta_2 = 0,95$ , т. е. при  $z_2 = 1,96$ :

$$\bar{T}_n = \bar{T}^* - \varepsilon_{\delta_2} = \bar{T}^* - z_2 \sigma_{\bar{T}} = 10163 - 1,96 \cdot 1005 \approx 8193 \text{ ч};$$

$$\bar{T}_g = \bar{T}^* + \varepsilon_{\delta_2} = \bar{T}^* + z_2 \sigma_{\bar{T}} = 10163 + 1,96 \cdot 1005 \approx 12133 \text{ ч};$$

Приближенное построение границ доверительного интервала для дисперсии представляет собой более трудоемкую задачу и в практике расчетов показателей надежности встречается значительно реже.

Таким образом, практическое использование численных методов оценки показателей надежности элементов судовой энергетической установки позволяет спрогнозировать этапы технической эксплуатации, скорректировать объемы и периодичность технического обслуживания, а также рассчитать необходимое количество запасных частей и расходных материалов на рассматриваемый период эксплуатации. В совокупности предлагаемый подход позволяет повысить качество эксплуатации морских судов и обеспечить необходимую безопасность мореплавания.

### Литература

1. Белов О.А. Техническое обеспечение морских судов как фактор эффективной и безопасной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Четвертой междунар. науч.-техн. конф. (25–26 ноября 2021 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2022. – С. 5–9.
2. Белов О.А. Аналитический обзор факторов эффективной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-техн. конф. (17–19 октября 2018 г.). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2019. – С. 5–9.
3. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1971.
4. Рябинин И.А., Парфенов Ю.М. Надежность, живучесть и безопасность корабельных электроэнергетических систем. – СПб., 1997.
5. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983.

УДК 372.881.1:378

**Е.В. Шаповалова, В.С. Волков**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: meian@mail.ru*

**ОБ ОПЫТЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАНДАРТНОГО МОРСКОГО РАЗГОВОРНИКА ИМО  
В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ  
В МОРСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗАХ**

В статье проведен обзор опыта использования стандартного морского разговорника ИМО в учебном процессе в морских технических вузах. В обзоре изложен материал методик и подходов, применяемых в обучении с целью освоения стандартных морских фраз, утвержденных в рамках разговорника Ассамблеи ИМО 29 ноября 2001 года.

**Ключевые слова:** морской английский, ИМО, стандартный морской разговорник ИМО.

**E.V. Shapovalova, V.S. Volkov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006  
e-mail: meian@mail.ru*

**TO THE EXPERIENCE OF USING THE IMO STANDARD MARINE PHRASEBOOK  
IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF SPECIALIST TRAINING  
IN MARITIME TECHNICAL UNIVERSITIES**

The article provides an overview of the experience of using the IMO Standard Marine Phrasebook in the educational process in maritime technical universities. The review presents the material of methods and approaches applied in training with the purpose of mastering the phrases within the frame of the phrasebook adopted by the IMO Assembly on November 29, 2001.

**Key words:** maritime English, IMO, IMO Standard Marine Phrasebook.

В профессиональной деятельности специалистов морской отрасли английский язык приобрел статус международного рабочего языка, являясь инструментом общения в интернациональных коллективах (экипажах судов, строительных корпораций и проч.). Ввиду расширяющегося международного сотрудничества в морской отрасли определяется необходимость повышения уровня языковой подготовки будущих специалистов морских специальностей, а также для реализации этой цели пересмотра применяемых методик преподавания английского языка и содержания учебных программ в морских вузах [1].

В процессе обучения студентов морских специальностей вузов одной из важных приобретенных компетенций учащегося является овладение языковой коммуникацией не только на русском языке, но и на английском языке. Однако, принимая во внимание недостаточность аудиторного времени, выделяемого для изучения языка, преподавание иностранного языка должно быть профессионально ориентированным уже с первых курсов в рамках содержания общеязыковой дисциплины «Иностранный язык» [2].

Для достижения данной цели изучение английского языка в КамчатГТУ распределяется на протяжении всего периода обучения студентов морских специальностей в рамках преподаваемых дисциплин «Иностранный язык», «Профессиональный английский», «Деловой английский», «Морской английский язык», «Ведение радиопереговоров на английском языке». Программы дисциплин предусматривают различные подходы к освоению языкового материала, формирующие у студентов профессиональные компетенции согласно Федеральному государст-

венному образовательному стандарту (ФГОС). В соответствии с ФГОС специалисты морских специальностей должны приобрести следующие профессиональные компетенции: способность использовать стандартный морской разговорник Международной морской организации (ИМО) и английский язык в письменной и устной форме; знать английский язык на уровне, позволяющем лицу командного состава пользоваться картами и другими навигационными пособиями, понимать метеорологическую информацию и сообщения относительно безопасности и эксплуатации судна, поддерживать связь с другими судами, береговыми станциями и центрами Системы управления движением судов; уметь выполнять обязанности лица командного состава в многоязычном экипаже, включая способность использовать и понимать «Стандартный морской разговорник ИМО» [3].

Учебные программы конвенциональных специальностей реализуются с учетом требований «Международной конвенции ИМО» о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты (ПДНВ-78), поскольку большая часть компетенций, о которых указывается в ПДНВ-78, требуют знания английского языка [4]. Кроме того, одна из важных составляющих эффективной профессиональной коммуникации на море, согласно правилам и процедурам ПДНВ-78, являются недвусмысленность и краткость речи членов экипажа, особенно при возникновении чрезвычайных ситуаций.

С целью реализации коммуникативной задачи и принимая во внимание требования, предъявляемые ПДНВ-78 к подготовке специалистов морских специальностей в учебном процессе, необходимо уделить должное внимание изучению фраз из «Стандартного морского разговорника ИМО» [5]. Данный морской разговорник разработан Международной морской организацией в 1997 г. (International Maritime Organization). Знание фраз является одним из требований для сертификации специалистов в морской сфере. В настоящее время обязательное знание стандартных фраз контролируется положениями ПДНВ-78.

Тем не менее, как считает С.Н. Вохмянин, во ФГОС неверно представлена роль данного разговорника в обучении морскому английскому языку [1]. Автор предлагает, чтобы в морском вузе изучались не только фразы из раздела «On-Board Communications». Будущим судоводителям необходимо также освоить весь информативный объем сборника, с рекомендацией изучать его после прохождения базового курса английского языка. Однако при этом можно поставить вопрос, насколько целесообразно изучение всего материала обучающимися по другим морским специальностям? Следовательно, на данный момент стоит актуальная задача языкового анализа международного морского разговорника с целью дифференциации содержания морского разговорника согласно каждой морской специальности по отдельности. Например, как утверждают некоторые авторы, для судоводителей английский язык является более важным по сравнению с другими членами экипажа [6], в то время как судомеханикам и электромеханикам требуется освоение только материала, затрагивающего более узкую терминологию с учетом их должностных обязанностей.

Анализируя опыт педагогической деятельности в области преподавания иностранного языка в морских вузах следует отметить предложенное многими авторами применение предметно-языкового интегрированного обучения с целью освоения обучающимися профессиональных языковых компетенций. Так, например, в Морском государственном университете им. адм. Г.И. Невельского после прохождения базового курса английского языка следующим разделом в освоении дисциплины «Иностранный язык» является курс «Введение в специальность», преподаваемый на английском языке [7]. В ходе его изучения у обучающихся развиваются не только навыки и умения общения на английском языке, но усваивается и профессиональный материал, т. е. на основе предметно-ориентированных учебных материалов изучается собственно английский язык. При этом занятия проводятся в специально оборудованных лабораториях, оснащенных современными ТСО. Изучению подлежат также фразы из «Стандартного морского разговорника ИМО». Авторами отмечается, что уже на первом курсе обучения студенты-судоводители начинают изучать фразы из данного разговорника [8]. Стоит отметить также, что в издательстве Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского опубликовано учебное пособие с рекомендациями к использованию «Стандартного морского разговорника ИМО» при ведении радиотелефонных переговоров на море [9]. В пособии приведены примеры и упражнения для изучения в рамках профессиональной подготовки морских специалистов, имеющих отношение к радиосвязи.

Методику интегрированного обучения применяют также в Военно-морской академии им. адм. Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова. Е.В. Зимица утверждает, что ввиду того, что предметно-языковое интегрированное обучение способствует созданию условий для практического овладения курсантами английским языком, то целесообразнее будет применять данную методику при обучении правил использования учащимися Стандартного морского разговорника ИМО [10]. Тем не менее, на наш взгляд, в работах указанных авторов недостаточно раскрыта тема эффективности применения интегрированного обучения с целью освоения стандартных фраз ИМО в учебном процессе.

Специалисты Государственного морского университета им. адм. Ф.Ф. Ушакова С.А. Калинина и О.В. Цепордей, проведя анализ зарубежных источников по теме преподавания английского языка для морских специальностей, приходят к выводу, что, несмотря на то, что большинство зарубежных методистов и педагогов сходятся на общем мнении о том, какими компетенциями должны обладать будущие моряки по окончании обучения, вместе с тем ни в одну работу не включено обязательное овладение стандартными фразами для общения на море [11]. Специалисты Государственного морского университета им. адм. Ф.Ф. Ушакова предлагают для закрепления материала из стандартного морского разговорника учебное пособие “Students’ Teaching English Programme” Version 10 (STEP V.10) [12]. Авторы утверждают, что применение компьютерных технологий в учебном процессе способствуют усвоению информационных единиц и использованию их в профессиональной деятельности.

Изучив материалы российских авторов, исследующих тему преподавания английского языка для морских технических специальностей вузов, можно сделать вывод, что на данный момент отсутствует проверенная и эффективная методика обучения овладения стандартными фразами ИМО в процессе языковой подготовки студентов морских специальностей. Ввиду того, что фразы данного сборника представляют собой короткие языковые единицы на уровне слова, словосочетания и предложения, целесообразно вводить освоение определенных тем уже на первых курсах обучения, системно добавляя в дальнейшем необходимые разделы из морского разговорника, отобранные для конкретной специальности. Также важно разработать методически обоснованную систему заданий и упражнений, которые будут способствовать эффективному усвоению материала Стандартного морского разговорника ИМО и развитию коммуникативных умений. Принимая во внимание, что использование данных фраз в многоязычном коллективе характеризуется лаконичностью речи и отсутствием двусмысленности понимания, важно определить основные методики для закрепления материала студентами и осуществлять обучение на основе конкретных ситуаций.

Помимо этого, на данный момент фактически отсутствуют учебные пособия, предлагающие структурированную информацию по закреплению материала Стандартного морского разговорника ИМО. Тем не менее большинство авторов придерживаются общего мнения, что фиксированные фразы не должны заучиваться без опоры на определенную ситуацию.

В связи с вышеизложенным возникает закономерный вопрос, в достаточной ли мере в процессе обучения курсантов конвенциональных специальностей уделяется внимание изучению фраз «Стандартного морского разговорника ИМО», причем в объеме, который требуется для формирования профессиональных компетенций, соответствующих ПДНВ? Ответ на него может быть только отрицательный. И это показывает насущную необходимость скорейшей разработки соответствующих учебных материалов, использование которых в учебном процессе позволило бы сформировать в полном объеме профессиональные компетенции для эффективной работы в море выпускников российских морских вузов.

## Литература

1. *Вохмянин С.Н.* Содержание дисциплин по морскому английскому языку для судоводителей специальности 26.05.05 // Актуальные проблемы обучения иностранным языкам в неязыковом вузе: Материалы VI Всерос науч.-практ. конф. (Москва, 16 мая 2024 г.). – М.: Московский политех. ун-т, 2024. – С. 86–97. – EDN CUOAMQ.
2. *Волков В.С.* Общие рекомендации к написанию учебно-методического пособия по профессиональному английскому языку для морских специальностей // Вестник КРАУНЦ, серия «Гуманитарные науки». – Петропавловск-Камчатский, 2024. – № 2 (44). – С. 46–60.

3. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – специалитет по специальности 26.05.05 «Судовождение». Утвержден приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 15 марта 2018 г., № 191.

4. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты. Изд. 2011 г. Публикация ИМО. – Лондон: CPI Books Ltd., 2013. – 425 с.

5. Издания для моряков на русском и английском языках Вып. № 9: Стандартные фразы ИМО для общения на море = IMO Standard Marine Communication Phrases. Серия «Судовладельцам и капитанам»: Стандарт. Морской разговорник ИМО (на рус. и англ. языках). – 4-е изд. – СПб.: Изд-во ЗАО ЦНИИМФ, 2015. – 376 с.

6. *Зими́на Е.В., Голованева Н.М., Лебедева Л.Н.* Предметно-языковое интегрированное обучение на занятиях по иностранному языку в военно-морском вузе // Наука сегодня: проблемы и пути решения: Материалы междунар. науч.-практ. конф. (Вологда, 25 марта 2020 г.). – Вологда: ООО «Маркер», 2020. – С. 71–73. – EDN PLXKNA.

7. *Степаненко Н.А.* Особенности конвенционной языковой подготовки моряков // Вестник Морского государственного университета. – 2014. – № 67. – С. 52–57. – EDN ZNLMTX.

8. *Ефанова Л.П.* Современные технологии, приемы обучения курсантов-судоводителей морскому профессиональному английскому языку // Вестник Морского государственного университета. – 2014. – № 67. – С. 57–66. – EDN VERVGG.

9. *Казинская О.Я., Пузачев А.Н., Бузикова С.А.* Стандартный морской разговорник ИМО: Учебное пособие / Федеральное агентство морского и речного транспорта, Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2022. – 299 с.

10. *Зими́на Е.В., Голованева Н.М., Лебедева Л.Н.* Особенности обучения английскому морскому языку // Проблемы модернизации современного высшего образования: лингвистические аспекты. Лингвометодические проблемы и тенденции преподавания иностранных языков в неязыковом вузе: Материалы IV Междунар. науч.-метод. конф. (Омск, 25 мая 2018 г.). – Омск: ООО «Изд-во Ипполитова». Омский автобронетанковый инженерный институт, 2018. – С. 109–113. – EDN UOLWSD.

11. *Калинина С.А., Цепордей О.В.* Стратегии изучения стандартных фраз ИМО на занятиях по английскому языку в морском университете // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2023. – № 4(45). – С. 140–143. – EDN FHZUDJ.

12. Особенности организации процесса подготовки специалистов морскому техническому английскому языку в рамках национального и международного законодательства / *Т.П. Аванесова, Л.С. Шверова, Л.К. Груздева, Д.Ю. Груздев* // Вестник Майкопского государственного технологического университета. – 2018. – № 4. – С. 66–72. – EDN YXBNKP.

**СПИСОК ОРГАНИЗАЦИЙ – УЧАСТНИКОВ КОНФЕРЕНЦИИ И ИХ АДРЕСА**

**ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»**

690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

Тел.: +7 (423) 265-24-29; +7 (423) 243-34-72, факс: +7 (423) 243-23-15

E-mail: rectorat@dvfu.ru

**ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**

115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31

Тел.: +7 (495) 788-56-99, +7 (499) 324-77-77

E-mail: info@mephi.ru

**ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»**

603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5

Тел.: +7 (831) 419-47-56

E-mail: otd\_o@vsuwt.ru

**ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»**

198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7

Тел.: +7 (812) 748-96-92, +7 (812) 748-96-93

E-mail: otd\_o@gumrf.ru

**ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»**

286123, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2

Тел.: +7 (856) 343-70-33

E-mail: mailbox@donnasa.ru

**ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»**

283001, г. Донецк, ул. Артема, д. 58

Тел.: +7 (856) 301-07-69

E-mail: donntu.info@mail.ru

**ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»**

291034, г. Луганск, квартал Молодежный, д. 20А

Тел.: +7 (8572) 34-48-28, факс: +7 (8572) 34-48-28

E-mail: dahl.univer@yandex.ru

**ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»**

690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а

Тел.: +7 (423) 230-12-51

E-mail: office@msun.ru

**ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»**

603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

Тел.: +7 (831) 436-63-07

E-mail: nntu@nntu.ru

**ФГБУН «Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН»**

683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9

Тел.: +7 (4152) 20-20-52, +7 (4152) 20-21-03; факс: +7 (4152) 29-79-82

E-mail: volcano@kscnet.ru



**ФГБУН «Тихоокеанский институт географии ДВО РАН», Камчатский филиал**  
683000, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Партизанская, д. 6  
Тел.: +7 (415-2) 42-34-57; факс: +7 (415-2) 41-24-64  
E-mail: kftigkamchatka@mail.ru

**УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого»**  
246029, Республика Беларусь, г. Гомель, пр-кт Октября, д. 48  
Тел.: (+375 232) 22-46-36  
E-mail: rector@gstu.by

**УО «Государственный институт повышения квалификации и переподготовки кадров в области газоснабжения “ГАЗ-ИНСТИТУТ”»**  
220037, Республика Беларусь, г. Минск, пер. Твердый 1-й, д. 8  
Тел.: (+375 017) 364-65-11; факс: (+375 017) 284-31-18  
E-mail: minsk@gazinstitut.by

**АО «Сетевая компания»**  
420094, г. Казань, ул. Бондаренко, д. 3  
Тел.: 8 (800) 200-08-78  
E-mail: office@gridcom-rt.ru

**ООО «Научно-производственный центр беспилотных авиационных систем и робототехнических комплексов»**  
601910, г. Ковров, ул. Маяковского, д. 19  
Telegram: @UAS\_development