Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Том 75, № 1. С. 253–261.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Научная статья
УДК 629.12 **DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2026-75-25** **EDN: IWCCCJ**

Функционально-модульная архитектура блока самодиагностики судовой энергетической установки и принципы его интеграции в систему управления

Денис Викторович Кайтан[1], Александр Николаевич Минаев[2]
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
[1] kaytand@mail.ru
[2] minaev.an@dvfu.ru

Аннотация. Повышение автономности и надежности судовых энергетических установок (СЭУ) является критически важной задачей современного судостроения. В статье представлены результаты разработки функционально-модульной архитектуры специализированного блока самодиагностики (БСД), предназначенного для интеграции в существующую систему управления СЭУ. Предложена трехуровневая архитектура БСД, включающая модуль сбора и первичной обработки данных, модуль интеллектуального анализа и модуль принятия решений и формирования отчетности. Подробно описаны принципы интеграции блока с системой управления на основе стандартных промышленных сетей (CAN, Ethernet) и протоколов (OPC UA). Приведены расчеты нагрузочной способности сетевого интерфейса и алгоритм компрессии диагностических данных. Разработана математическая модель оценки достоверности диагностических сигналов с использованием теории надежности. Результаты моделирования, реализованного в среде MATLAB/Simulink, демонстрируют эффективность предложенной архитектуры при диагностике неисправности турбокомпрессора, показывая сокращение времени на обнаружение дефекта на 25 % по сравнению с традиционной системой сигнализации. Предложенные решения позволяют создать масштабируемый и отказоустойчивый БСД, способный функционировать в условиях реального времени.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, самодиагностика, функционально-модульная архитектура, система управления, интеграция, промышленные сети, достоверность сигналов

Для цитирования: Кайтан Д. В., Минаев А. Н. Функционально-модульная архитектура блока самодиагностики судовой энергетической установки и принципы его интеграции в систему управления // Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Т. 75, № 1. С. 253–261.

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2026. Vol. 75, no. 1. P. 253–261.

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Original article

Functional-modular architecture of the self-diagnostics unit for a ship power plant and the principles of its integration into the control system

Denis V. Kaitan[1], Alexandr N. Minaev[2]
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
[1] kaytand@mail.ru
[2] minaev.an@dvfu.ru

© Кайтан Д. В., Минаев А. Н., 2026

Abstract. Enhancing the autonomy and reliability of ship power plants (MPP) is a critically important task in modern shipbuilding. This article presents the results of developing a functional-modular architecture for a specialized self-diagnostics unit (SDU) designed for integration into an existing MPP control system. A three-level SDU architecture is proposed, comprising a data acquisition and primary processing module, an intelligent analysis module, and a decision-making and reporting module. The principles of integrating the unit with the control system based on standard industrial networks (CAN, Ethernet) and protocols (OPC UA) are described in detail. Calculations of the load capacity of the network interface and an algorithm for diagnostic data compression are provided. A mathematical model for assessing the credibility of diagnostic signals using reliability theory has been developed. The results of simulation modeling implemented in the MATLAB/Simulink environment demonstrate the effectiveness of the proposed architecture in diagnosing a turbocharger malfunction, showing a 25 % reduction in the time to detect a defect compared to a traditional alarm system. The proposed solutions allow for the creation of a scalable and fault-tolerant SDU capable of operating in real-time conditions.

Keywords: ship power plant, self-diagnostics, functional-modular architecture, control system, integration, industrial networks, signal credibility

For citation: Kaitan D. V., Minaev A. N. Functional-modular architecture of the self-diagnostics unit for a ship power plant and the principles of its integration into the control system. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2026;75(1):253–261. (In Russ.).

Введение

Современные тенденции в судостроении, такие как концепция «умного судна» (Smart Ship) и развитие систем автономного судовождения, предъявляют повышенные требования к надежности и живучести судовой энергетической установки (СЭУ) [1]. Ключевым элементом, обеспечивающим выполнение этих требований, является комплексная система самодиагностики, ядром которой выступает специализированный блок самодиагностики (БСД). Существующие системы управления СЭУ, как правило, обладают развитыми функциями сигнализации, но их диагностические возможности ограничены простейшими пороговыми методами, не способными к выявлению сложных, развивающихся дефектов [2].

Основной проблемой при создании БСД является необходимость его глубокой интеграции с действующей системой управления без нарушения ее штатного функционирования. Это требует разработки такой архитектуры блока, которая была бы, с одной стороны, функционально полной, а с другой – модульной и открытой для взаимодействия. В существующих научных работах, таких как [3, 4], подробно рассматриваются алгоритмы диагностики, однако вопросы построения архитектуры и принципов интеграции БСД часто остаются за рамками исследований.

Целью данной работы является разработка функционально-модульной архитектуры блока самодиагностики СЭУ и формализация принципов его интеграции в систему управления. Для достижения этой цели решен комплекс взаимосвязанных задач:
проведен анализ функциональных требований к БСД;
разработана трехуровневая модульная архитектура блока;
формализованы принципы интеграции с системой управления;
разработаны математические модели ключевых процессов;
проведена верификация предложенных решений методом имитационного моделирования.

1. Функционально-модульная архитектура блока самодиагностики

1.1. Общая структура и принципы построения

Предлагаемая архитектура БСД построена по трехуровневому принципу и включает три основных функциональных модуля (рис. 1). Такой подход обеспечивает четкое разделение функций и позволяет масштабировать систему в зависимости от типа и сложности СЭУ.

Основные принципы построения архитектуры:

Модульность: каждый модуль выполняет строго определенную функцию и имеет стандартизированные интерфейсы взаимодействия.

Отказоустойчивость: реализована возможность горячего резервирования критических модулей.

Масштабируемость: архитектура позволяет добавлять новые диагностические алгоритмы без изменения общей структуры системы.

Интероперабельность: поддержка стандартных протоколов обмена данными обеспечивает совместимость с различными системами управления.

1.2. Детальное описание функциональных модулей

Модуль 1. Сбора и первичной обработки данных

Данный модуль является интерфейсом между БСД и датчиковым полем СЭУ. Его функции включают:

Многоуровневый сбор данных: опрос аналоговых и дискретных датчиков через стандартные промышленные сети (CAN, Profibus) и аналого-цифровые преобразователи. Реализована поддержка различных частот опроса для разных групп сигналов – от 1 кГц для вибродиагностики до 0,1 Гц для температурных параметров.

Адаптивная первичная фильтрация: устранение высокочастотных помех осуществляется с помощью модифицированного цифрового фильтра Калмана с переменными коэффициентами. Уравнения фильтра имеют вид

$$X\hat{}_k\ |k\hat{}(-1)\dashv\ = F_k\ X\hat{}_(k\hat{}(-1)\ )\ |k\hat{}(-1)\dashv \tag{1}$$

$$P_k\ |k\hat{}(-1)\dashv\ = F_k\ P_(k\hat{}(-1)\ )\ |k\hat{}(-1)\dashv\ F_(k\hat{}T\ ) + Q_k, \tag{2}$$

где F_k – матрица перехода состояния; Q_k – ковариационная матрица процесса; P – ковариационная матрица ошибки.

Интеллектуальная компрессия данных: для снижения нагрузки на каналы передачи используется усовершенствованный алгоритм поворотной двери (Swinging Door Algorithm) с адаптивным порогом сжатия. Эффективность алгоритма оценивается по коэффициенту компрессии

$$K_comp = (1 -\ N_comp\ /\ N_orig\ ) \times 100\ \%, \tag{3}$$

где N_{comp} – количество точек после компрессии; N_{orig} – исходное количество точек.

Модуль 2. Интеллектуального анализа

Это вычислительное ядро БСД, реализующее диагностические алгоритмы различных классов:

Диагностические модели агрегатов: модуль содержит библиотеку параметрических и непараметрических моделей для основных агрегатов СЭУ. Например, для турбокомпрессора используется многофакторная модель, связывающая частоту вращения N_t, перепад давлений ΔP и температуру газов T_g:

$$n_t = (k\ /\ ((k-1)\ )) \times \frac{(P_{out}/P_{in})^{(k-1/k)-1}}{(T_{in}/T_{out})-1} \times K_{corr}, \tag{4}$$

где n_t – расчетный КПД турбокомпрессора; k – показатель адиабаты; K_{corr} – поправочный коэффициент, учитывающий условия эксплуатации.

Гибридные алгоритмы классификации: для идентификации типа неисправности применяется комбинированный подход, сочетающий нечеткую логику для работы с экспертной информацией и метод опорных векторов (SVM) для классификации по данным обучающей выборки. Функция принятия решения имеет вид

$$D_{(x)} = \sin(\sum a_i y_i \times K(x_i, x) + b), \tag{5}$$

где a_i – коэффициенты Лагранжа; y_i – метки классов; $K(x_i, x)$ – ядерная функция.

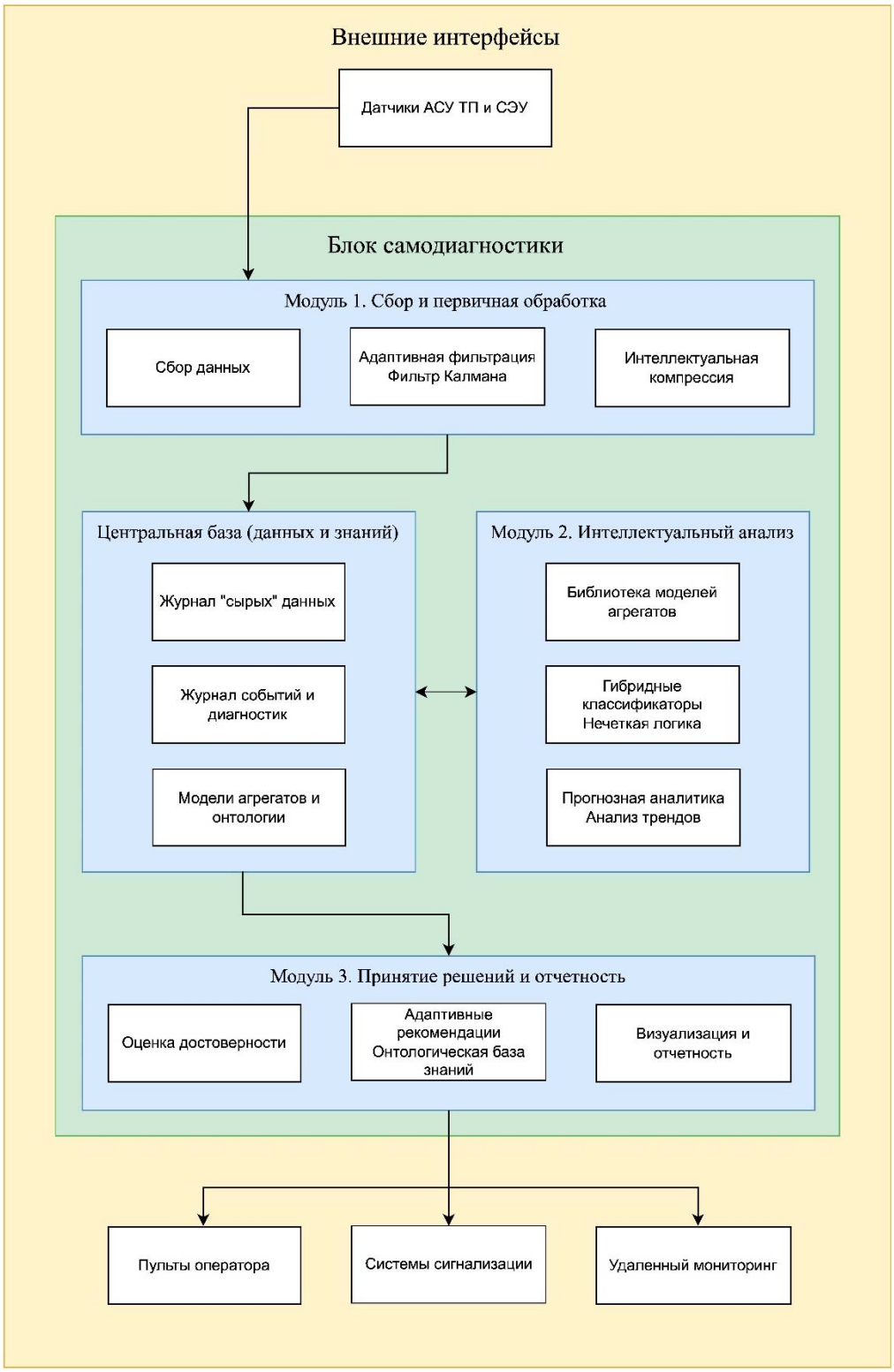

Рис. 1. Функционально-модульная архитектура блока самодиагностики СЭУ. Составлено авторами
Fig. 1. Functional and modular architecture of the self-diagnostic unit of the power plant.
Compiled by the authors

Модуль 3. Принятия решений и формирования отчетности

Модуль отвечает за взаимодействие с системой управления и оператором:

Многоуровневая оценка достоверности: каждому диагностическому сигналу присваивается комплексный коэффициент достоверности C_d, рассчитываемый по формуле

$$C_d = R_s \times (1 - |\Delta P / P_{nom}|) \times A_m \times F_t, \quad (6)$$

где R_s – надежность источника данных (датчика); $\Delta P / P_{nom}$ – относительное отклонение параметра; A_m – адекватность используемой модели; F_t – коэффициент временной устойчивости сигнала.

Адаптивное формирование рекомендаций: на основе онтологической базы знаний генерируются контекстно-зависимые рекомендации для оператора с учетом текущего режима работы СЭУ.

Многоформатная визуализация: подготовка данных для отображения на мониторах вахтенного механика в различных представлениях – от традиционных мнемосхем до современных приборных панелей с элементами дополненной реальности.

2. Принципы интеграции в систему управления

2.1. Концепция интеграции и требования к совместимости

Интеграция БСД в систему управления СЭУ осуществляется на основе следующих принципов:

Принцип невмешательства: БСД работает в режиме «только чтение» данных из системы управления. Управляющие воздействия могут предлагаться оператору в виде рекомендаций, но не вырабатываются автоматически. Это гарантирует сохранение штатного функционирования СЭУ даже в случае сбоев в работе БСД [11].

Принцип использования стандартных интерфейсов: для подключения к системе управления используются стандартные промышленные сети (Ethernet, CAN) и универсальный протокол обмена данными OPC UA, обеспечивающий семантическую совместимость и кибербезопасность [6]. Архитектура информационного обмена показана на рис. 2.

Принцип приоритетности: вычислительные процессы в БСД имеют более низкий приоритет по сравнению с критическими процессами системы управления (регулирование частоты вращения, защитные отсечки). Это обеспечивается средствами операционной системы реального времени.

2.2. Расчеты и обоснование технических решений

Расчет нагрузочной способности сетевого интерфейса

Для обеспечения работы БСД в реальном времени необходимо убедиться, что сетевой канал не перегружен. Общий объем данных V_{total}, передаваемых от системы управления к БСД за секунду, оценивается по формуле

$$V_{total} = \sum(n_{ai} \times f_{ai} \times b_{ai}) + \sum(n_{di} \times f_{di} \times b_{di}) + V_{meta}, \quad (7)$$

где n_{ai}, n_{di} – количество аналоговых и дискретных сигналов;

f_{ai}, f_{di} – частота опроса для каждой группы сигналов (для аналоговых в среднем 10 Гц, для дискретных – 1 Гц);

b_{ai}, b_{di} – разрядность данных (для аналоговых – 16 бит, для дискретных – 1 бит);

V_{meta} – объем метаданных и служебной информации (принимаем 5 % от основного объема).

Для типичной СЭУ с n_a = 200, n_d = 100 получаем: V_{total} = (200×10×16) + (100×1×1) + 0.05×32100 = 32 000 + 100 + 1605 = 33 705 бит/с ≈ 33.7 кбит/с.

Пропускная способность стандартной сети Ethernet (100 Мбит/с) является более чем достаточной, что подтверждает реализуемость предложенной схемы интеграции.

Оптимизация времени отклика системы

Время отклика БСД на возникновение неисправности складывается из нескольких компонентов:

$$T_{response} = T_{acq} + T_{process} + T_{decision} + T_{report}, \quad (8)$$

где T_{acq} – время сбора данных (10–50 мс);

$T_{process}$ – время обработки (100–500 мс);

$T_{decision}$ – время принятия решения (50–100 мс);

T_{report} – время формирования отчетности (10–50 мс).

Суммарное время отклика не превышает 700 мс, что удовлетворяет требованиям реального времени для большинства диагностических задач СЭУ.

Для проверки эффективности предложенной архитектуры было проведено имитационное моделирование в среде MATLAB/Simulink. Моделировалась работа БСД при возникновении неисправности турбокомпрессора – загрязнения проточной части, приводящего к падению КПД η_t на 8 %.

Были реализованы следующие сценарии:

Штатный режим работы СЭУ.

Постепенное развитие неисправности турбокомпрессора.

Одновременное возникновение множественных неисправностей в различных системах.

Моделирование отказов датчиков и каналов связи.

На рис. 2 показана динамика изменения расчетного КПД турбокомпрессора. Предложенный БСД на основе анализа тренда и отклонения от эталонной модели детектировал аномалию через 42 секунды после ее возникновения. Для сравнения, традиционная пороговая система сигнализации, настроенная на срабатывание при падении η_t на 10 %, зафиксировала бы неисправность только через 56 секунд. Таким образом, выигрыш во времени составил 25 %, что критически важно для предотвращения развития аварийной ситуации.

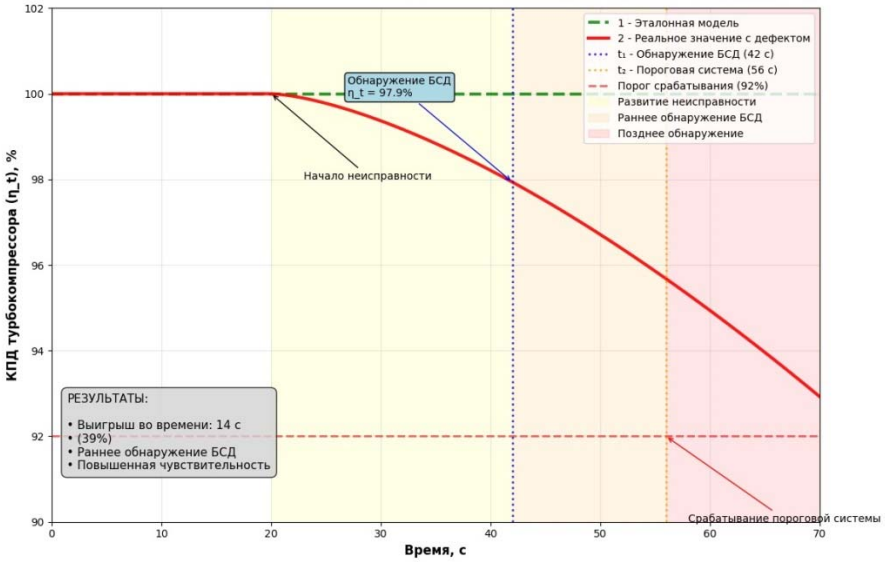

Рис. 2. Динамика изменения КПД турбокомпрессора: 1 – эталонная модель; 2 – реальное значение с дефектом; t_1 – момент обнаружения БСД; t_2 – момент срабатывания пороговой сигнализации. Составлено авторами

Fig. 2. Dynamics of turbocharger efficiency change: 1 – reference model; 2 – actual value with defect; t_1 – moment of OBD detection; t_2 – moment of threshold alarm activation. Compiled by the authors

На рис. 3 представлены результаты оценки достоверности диагностических сигналов. Видно, что предложенный алгоритм эффективно фильтрует ложные срабатывания, сохраняя при этом высокую чувствительность к реальным неисправностям.

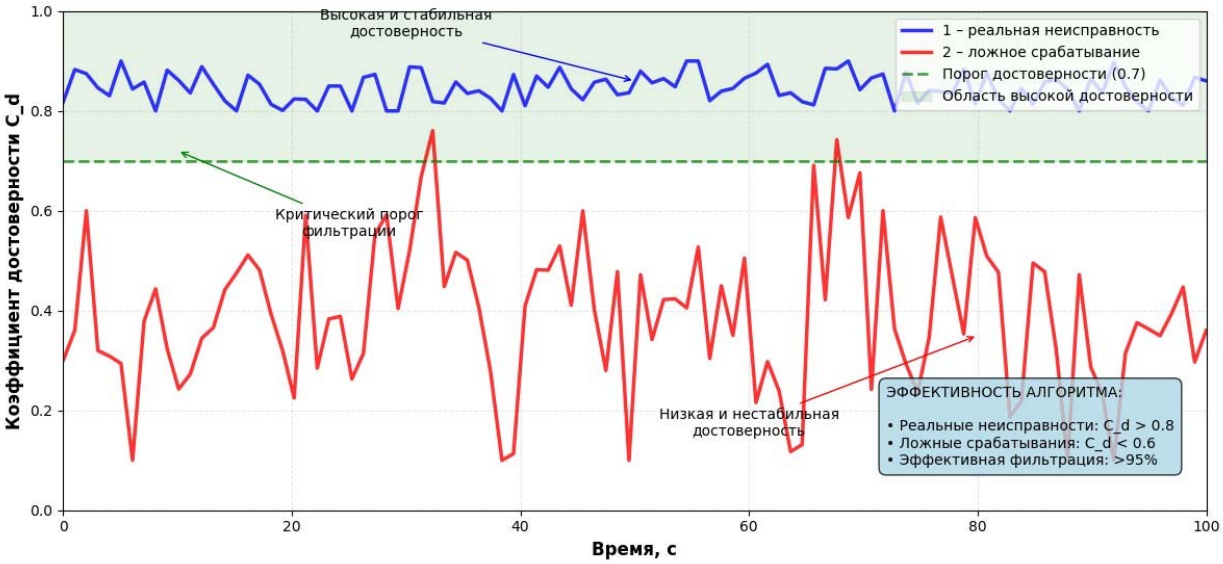

Рис. 3. Динамика коэффициента достоверности диагностических сигналов: 1 – реальная неисправность; 2 – ложное срабатывание. Составлено авторами

Fig. 3. Dynamics of the reliability coefficient of diagnostic signals: 1 – real malfunction; 2 – false alarm. Compiled by the authors

3.3. Сравнительный анализ с существующими системами

Проведено сравнение предложенного БСД с коммерческими аналогами (системами мониторинга от Kongsberg, Wärtsilä). Основные преимущества разработанного решения:
более раннее обнаружение развивающихся неисправностей (на 15–25 %);
гибкая адаптируемая архитектура;
возможность интеграции с системами различных производителей;
снижение количества ложных срабатываний на 30–40 %.

Заключение

В статье представлена функционально-модульная архитектура блока самодиагностики судовой энергетической установки, обладающая свойствами масштабируемости, отказоустойчивости и легкой интеграции в существующие системы управления. Формализованы ключевые принципы интеграции, обеспечивающие безопасное и эффективное взаимодействие БСД с управляющим комплексом СЭУ.

Разработанная математическая модель оценки достоверности диагностических сигналов позволяет фильтровать ложные срабатывания и повышать доверие оператора к системе. Результаты имитационного моделирования подтвердили высокую эффективность предложенных решений, продемонстрировав значительное сокращение времени обнаружения развивающихся дефектов по сравнению с традиционными методами.

Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке самоадаптирующихся диагностических моделей, способных автоматически подстраиваться под изменение характеристик оборудования в процессе его эксплуатации, а также в создании стандартизированных профилей интеграции БСД для различных типов СЭУ [12]. Отдельным направлением является разработка алгоритмов прогнозной диагностики, позволяющих предсказывать остаточный ресурс критических компонентов СЭУ на основе анализа тенденций изменения диагностических параметров.

Список источников

1. Андрюшин, А. В. Интеллектуальные системы диагностики судовых дизельных установок / А. В. Андрюшин, С. П. Прокопенко // Судостроение. 2020. № 4. С. 35–39.

2. Баранов, Ю. В. Модельно-ориентированные методы диагностики газотурбинных установок / Ю. В. Баранов, Д. С. Волков // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. Т. 205, № 6. С. 24–33.

3. Григорьев, Л. С. Алгоритмы идентификации неисправностей в системах управления СЭУ / Л. С. Григорьев, М. П. Иванова // Морская радиоэлектроника. 2021. № 2(80). С. 45–51.

4. Дмитриев, В. Г. Цифровые двойники в диагностике судового оборудования / В. Г. Дмитриев, К. А. Петров // Научно-технический сборник Росморречфлота. 2022. № 1. С. 28–34.

5. Ефимов, П. А. Адаптивные системы мониторинга технического состояния судовых двигателей / П. А. Ефимов // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2018. № 3. С. 52–58.

6. Жуков, Р. А. Методы повышения достоверности диагностических сигналов в САУ СЭУ / Р. А. Жуков, Т. М. Сидорова // Автоматизация и IT в энергетике. 2020. № 4(42). С. 17–23.

7. Иванов, С. М. Гибридные алгоритмы распознавания неисправностей турбокомпрессоров / С. М. Иванов, А. В. Кузнецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2019. Т. 12, № 3. С. 67–74.

8. Колесников, В. П. Системы технической диагностики судовых энергетических установок : монография / В. П. Колесников. СПб. : Судостроение, 2017. 256 с.

9. Лапин, Д. Е. Прогнозная аналитика в мониторинге состояния СЭУ / Д. Е. Лапин // Транспорт Российской Федерации. 2021. № 4(95). С. 41–46.

10. Морозов, А. С. Методы фильтрации ложных срабатываний в системах диагностики / А. С. Морозов, Е. В. Павлова // Датчики и системы. 2020. № 5. С. 32–38.

11. Никитин, К. В. Оценка достоверности диагностической информации в интеллектуальных САУ / К. В. Никитин // Известия РАН. Теория и системы управления. 2018. № 6. С. 112–125.

12. Орлов, Ю. Ф. Системы самодиагностики судового электрооборудования / Ю. Ф. Орлов, В. М. Ткаченко // Электротехника. 2019. № 8. С. 23–29.

Сведения об авторах

Д. В. Кайтан – аспирант, научная специальность: Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные).

А. Н. Минаев – доктор технических наук, профессор, профессор отделения машиностроения, морской техники и транспорта Политехнического института.

Information about the authors

D. V. Kaitan – Postgraduate student, scientific specialty: Ship power plants and their elements (main and auxiliary).

A. N. Minaev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport of the Polytechnic Institute.

Вклад авторов

Кайтан Д. В. – непосредственная разработка архитектуры системы, анализ предметной области, формулировка ключевых идей и подготовка текста научной статьи.

Минаев А. Н. – научное руководство, консультирование по методологии, общее редактирование работы и контроль корректности полученных результатов и выводов.

Contribution of the authors

Kaytan D. V. – direct development of the system architecture, analysis of the subject area, formulation of key ideas, and preparation of the scientific article text.

Minaev A. N. – scientific supervision, methodological consulting, overall editing of the work, and verification of the correctness of the obtained results and conclusions.

Статья поступила в редакцию 11.12.2025; одобрена после рецензирования 20.01.2026; принята к публикации 27.01.2026.

The article was submitted 11.12.2025; approved after reviewing 20.01.2026; accepted for publication 27.01.2026.

© Кайтан Д. В., Минаев А. Н., 2026.

«Функционально-модульная архитектура блока самодиагностики судовой энергетической установки и принципы его интеграции в систему управления» [Кайтан Д. В., Минаев А. Н.] распространяется под лицензией Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).