

СУДОВОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

SHIP POWER EQUIPMENT

УДК 629.5.069

DOI: 10.37890/jwt.vi87.714

Разработка алгоритма самодиагностики в информационно-измерительном канале уровня

А.А. Житников

А.А. Марченко

Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация. В статье представлена разработка алгоритма самодиагностики информационно-измерительного канала уровня, применяемого в составе судовой котельной установки. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надёжности и безопасности функционирования судовых энергетических систем за счёт своевременного выявления аномалий в измерительных каналах, подверженных воздействию вибрации, температурных перепадов, влаги и электромагнитных помех. Предложенный алгоритм основан на анализе темпа изменения сигнала уровня и сравнении его с физически обоснованным пороговым значением, определяемым динамическими характеристиками котельного агрегата в штатных режимах эксплуатации. Реализация выполнена в среде MasterSCADA 4D на языке программирования Function Block Diagram в соответствии со стандартом МЭК 61131-3. Экспериментальная проверка подтвердила способность алгоритма надёжно идентифицировать резкие, физически невозможные отклонения сигнала, характерные для таких отказов, как обрыв линии связи, электромагнитные наводки, нарушение контактов или окисление соединений. При этом ложные срабатывания в нормальных условиях не наблюдались. Также отмечены ограничения алгоритма, его неспособность к диагностике медленных деградиационных процессов, таких как дрейф показаний или плавающие колебания сигнала. Показан потенциал интеграции разработанного решения в логику аварийной защиты и систем управления с целью повышения отказоустойчивости и сокращения времени на восстановление работоспособности оборудования. Предложенный подход может быть использован как базовый элемент интеллектуальной диагностики в современных судовых системах автоматизации.

Ключевые слова: система управления, датчик уровня, алгоритм, контроллер, линия связи, ложное срабатывание, автоматизация.

Development of a self-diagnostic algorithm in the information-measuring channel of the level

Aleksandr A. Zhitnikov

Aleksey A. Marchenko

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. This paper presents a comprehensive study of modern internal combustion engine control systems aimed at ensuring stable and safe operation of marine power plants. Particular attention is paid to the analysis of the protective functions implemented by these systems, as well as their ability to prevent equipment operation under abnormal or emergency conditions. The design and software features of the control systems are considered, including the architecture of controllers, the organization of interaction of communication modules and the functionality of hardware and software systems. The study

also considers aspects of reliability and fault tolerance of control systems, assesses possible risks associated with hardware and software vulnerabilities, and determines their impact on the overall efficiency and safety of marine power plants. The results obtained allow us to form an idea of the current level of development of these technologies and outline directions for further improvement of automatic control systems for internal combustion engines in the context of increasing their diagnostic information content, protective properties and operational reliability.

Keywords: internal combustion engine, control system, sensor, algorithm, controller, communication line, false alarm, automation.

Введение

В составе судовых энергетических установок особое место занимают информационно-измерительные системы, обеспечивающие сбор, преобразование и передачу данных о текущих параметрах технологических процессов. Среди них измерительные каналы уровня играют ключевую роль, поскольку информация о количестве рабочей среды в резервуарах, цистернах или котлах напрямую влияет на безопасность и эффективность эксплуатации энергетического оборудования. Надёжность функционирования таких каналов является одним из определяющих факторов корректной работы всей системы автоматического управления. [1-3].

Однако в условиях эксплуатации судовых систем информационно-измерительные каналы подвержены воздействию определенных негативных факторов: вибрация, перепады температур, агрессивная среда и электромагнитные помехи. Такие условия повышают вероятность возникновения отказов как в первичных преобразователях, так и в цепях передачи сигнала. В случае несвоевременного обнаружения неисправности возможны не только ложные срабатывания защитных устройств, но и пропуск аварийных ситуаций. Это может быть гораздо опаснее. Кроме того, недостоверные показания уровня могут привести к ошибочным действиям экипажа, увеличению времени на диагностику или некорректной настройке управляющих воздействий, что в совокупности снижает общую надёжность и безопасность судовой энергетической установки [4,5].

В настоящее время судостроительные предприятия применяют различные стратегии для повышения надёжности и достоверности данных, поступающих от информационно-измерительных каналов [6]. Наиболее традиционным решением является резервирование измерительных средств в критически важных узлах. Такой подход обеспечивает высокую отказоустойчивость, однако требует значительных затрат как на этапе постройки судна, так и в процессе эксплуатации.

Широкое распространение получили интеллектуальные датчики, оснащённые встроенными функциями самодиагностики и передающие данные в цифровом виде [7,8]. Несмотря на их эффективность, диагностика в таких устройствах охватывает преимущественно внутренние компоненты самого датчика и не позволяет оценить состояние всего измерительного канала.

Перспективным, но пока недостаточно зрелым направлением считается применение методов машинного обучения [9,10]. Их потенциал ограничивается необходимостью обширных обучающих выборок, требованием к значительным вычислительным ресурсам и отсутствием прозрачности в механизме принятия решений, что затрудняет их внедрение в системы, где критичны предсказуемость и верифицируемость работы [11,12].

В этой связи актуальной задачей становится разработка алгоритмов диагностики и идентификации неисправностей в информационно-измерительных каналах уровня, способных в реальном времени выявлять аномалии.

Представленная работа направлена на создание такого алгоритма, основанного на анализе динамических характеристик сигнала и его отклонений от ожидаемого поведения в штатных режимах работы судовых энергетических установках.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования был выбран информационно-измерительный канал датчика уровня в судовом паровом котле. Выбор данного участка обоснован тем, что к нему предъявляются серьезные требования. Показания информационно-измерительного канала уровня используются в алгоритмах системы управления для подачи команд на исполнительные механизмы. Недостоверность получаемых данных может в значительной степени снизить эффективность работы агрегата или даже стать причиной аварии.

Для разработки и реализации алгоритма идентификации неисправностей использовалась среда разработки MasterSCADA 4D. Выбор указанной системы обусловлен несколькими ключевыми факторами. Во-первых, MasterSCADA 4D является отечественной SCADA-системой, что соответствует современным требованиям к импортнезависимости и информационной безопасности. Во-вторых, платформа предоставляет встроенную среду разработки, совместимую с промышленными языками программирования, стандартизированными в МЭК 61131-3. Это обеспечивает высокую степень гибкости при реализации логики диагностики и её последующей интеграции с контроллерами автоматики.

В рамках работы модель информационно-измерительного канала уровня состояла из: первичного датчика с аналоговым выходным сигналом 4–20 мА, линии связи, аналогового входа программируемого логического контроллера. Алгоритм диагностики был реализован в виде программы, интегрированной в проект MasterSCADA 4D на языке программирования Function Block Diagram. Разработанная программа осуществляет непрерывный мониторинг значения получаемого сигнала, с целью выявления аномальных режимов работы.

Результаты

В основе алгоритма идентификации неисправностей лежит анализ динамика темпа изменения параметра уровня воды в барабане котла. В штатном режиме работы уровень изменяется плавно и предсказуемо, что обусловлено инерционностью процессов в котле. Следовательно, существует физически обоснованное ограничение на величину наибольшего допустимого изменения уровня в единицу времени.

Данная величина может быть определена на основе анализа эксплуатационных данных при различных нагрузках котельного агрегата и с учётом его конструктивных особенностей. Полученное значение ложится в основу алгоритма, как пороговый критерий для выявления аномального поведения сигнала. Превышение этого порога в условиях, когда резкие изменения уровня физически невозможны, должны интерпретироваться системой управления как признак неисправности в информационно-измерительном канале уровня. Также стоит отметить, что в данную величину необходимо закладывать ряд метрологических характеристик элементов информационно-измерительного канала от датчика уровня до программируемого логического контроллера с учётом условий эксплуатации. Общий вид структурной схемы алгоритма представлена на рис. 1.

Предлагаемый алгоритм может быть реализован как дополнительный функциональный блок внутри программируемого логического контроллера, так и в общей системе диспетчеризации и управления технологическими процессами. Выбор того или иного варианта не отразится на процессе работы алгоритма. Реализация алгоритма на языке Function Block Diagram представлена на рис. 2.

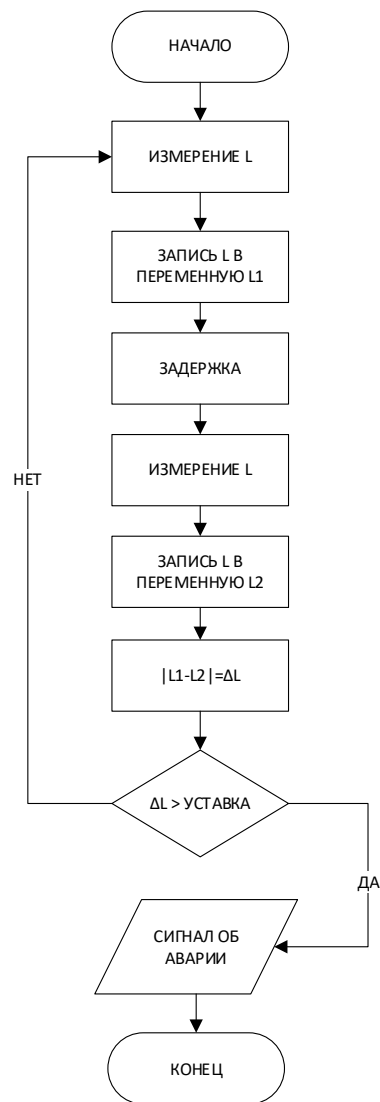


Рис. 1. Структурная схема алгоритма

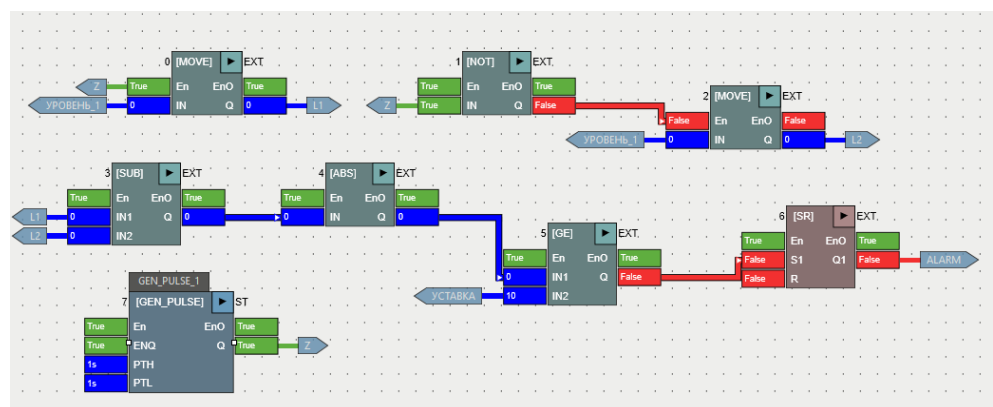


Рис. 2. Алгоритм идентификации неисправности информационно-измерительного канала уровня

Представленная реализация алгоритма состоит из нескольких взаимосвязанных блоков. Во-первых, для снятия показаний переменной «УРОВЕНЬ_1» с определенным временным интервалом и записью полученных значений в переменные «L1» и «L2» используются блоки «MOVE». Порядок активации данных блоков определяется переменной «Z». Для второго блока «MOVE» сигнал с переменной «Z» поступает через логический блок «NOT», который инвертирует значение переменной «Z». В свою очередь, переменная «Z» является выходом блока генерации прямоугольного сигнала «GEN_PULSE». Данный блок поочередно выдает положительный и отрицательный сигналы продолжительностью одну секунду.

Блок «SUB» производит операцию вычитания между полученными переменными «L1» и «L2» и подает полученное значение на выход блока «ABS». Данный блок производит операцию взятия модуля числа и подает полученное значение на вход блока «GE». Блок «GE» производит операцию сравнения полученного значения с переменной «УСТАВКА». В тех случаях, когда полученное значение превысит или будет равно значению переменной «УСТАВКА», блок сравнения «GE» сгенерирует выходной сигнал на блок установки выходного значения «SR». В случае активации входа блока «SR» на выход будет подан положительный сигнал на переменную «ALARM».

Значение переменной «ALARM» можно использовать для вывода сообщения в систему диспетчеризации о неисправности в информационно-измерительном канале уровня. На рис. 3, в качестве примера, представлена мнемосхема судовой котельной установки с журналом регистрации событий. В результате формирования неисправности в журнале дополнительно отображается информация о неисправности информационно-измерительного канала. Кроме того, данный алгоритм может быть использован для формирования команд в основную программу управления котельным агрегатом с целью предотвращения подачи неверных предупреждающих сигналов на исполнительные механизмы.

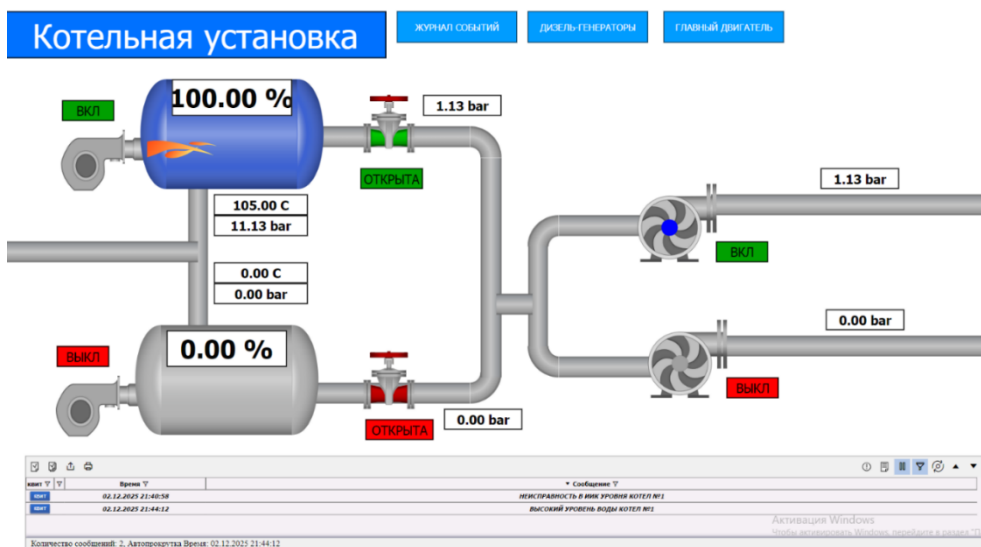


Рис. 3. Мнемосхема с журналом событий системы диспетчеризации

Процедура проверки работоспособности алгоритма проводилась программным методом. Для этого переменная «УРОВЕНЬ_1» изменялась скачкообразно с разными значениями шагов при разных значениях переменной «УСТАВКА». Результаты проведения проверки представлены в таблице.

Таблица

Результаты проведения проверки

Скачкообразное изменение, %	Значение переменной «УСТАВКА»	Начальное значение уровня, %	Активация алгоритма
2	5	30	нет
4	5	35	нет
6	5	40	да
8	10	45	нет
10	10	50	да
13	15	60	нет
17	15	65	да

Критерием активации алгоритма считался переход переменной «ALARM» из состояния логического нуля в логическую единицу (рис. 4). Анализ представленных данных свидетельствует о высокой точности и устойчивости реакции алгоритма на ступенчатые возмущения входного параметра. Во всех случаях, когда амплитуда скачка переменной «УРОВЕНЬ_1» превышала установленное пороговое значение, фиксировалась своевременная активация алгоритма, что подтверждает корректность реализации условий срабатывания. При этом ложные срабатывания в условиях отсутствия превышения уставки не наблюдались, что указывает на корректность разработанного алгоритма. Таким образом, можно заключить, что предложенный метод идентификации аварийных отклонений обеспечивает строгое и однозначное распознавание заданных типов нештатных ситуаций в рамках принятой модели.

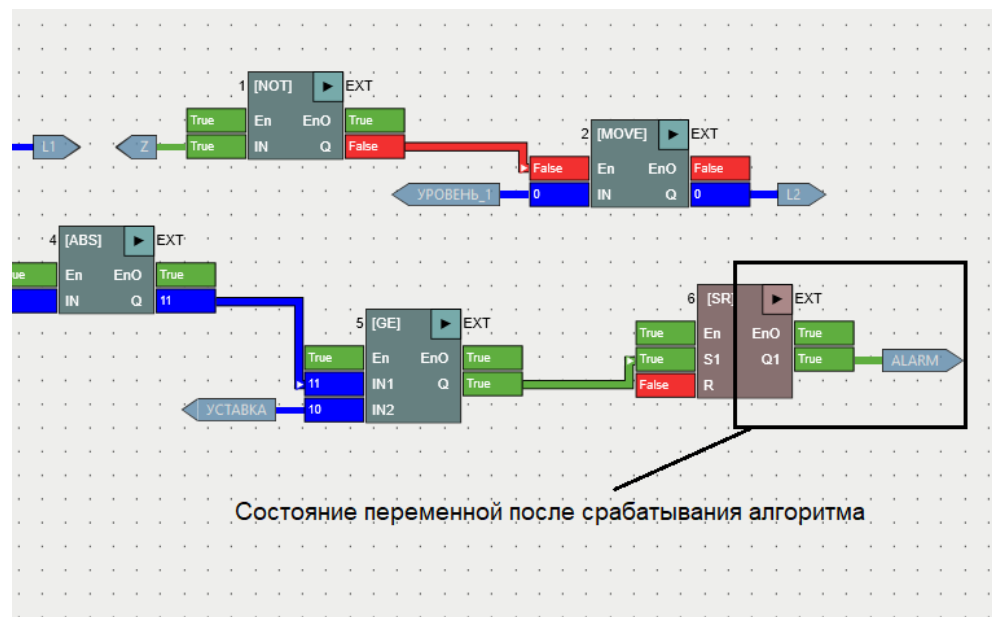


Рис. 4. Состояние переменной после срабатывания алгоритма

Также стоит отметить, что для реализации данного решения можно выбирать различные временные интервалы, в рамках которых будет производиться запись значения переменной «УРОВЕНЬ_1» в значения переменных «L1» и «L2». В первую очередь выбор должен быть обусловлен динамикой изменения показаний. Чем быстрее меняется значение, тем меньше должен быть временной интервал. При этом

необходимо учесть, что данный интервал не должен быть слишком коротким, так как при уменьшении времени необходимо также уменьшать значение переменной «УСТАВКА». Если данная переменная будет достаточно мала, тогда определенного рода шумы и систематические погрешности измерительного устройства могут привести к ложному срабатыванию алгоритма.

Обсуждение

Разработанный алгоритм самодиагностики информационно-измерительного канала уровня представляет собой эффективный инструмент повышения надёжности и безопасности функционирования судовых энергетических установок. Его практическая значимость заключается не только в способности своевременно фиксировать аномальные отклонения, но и в том, что он непосредственно влияет на оперативность реакции экипажа при возникновении нештатных ситуаций. Благодаря раннему выявлению недостоверности измерительной информации персонал получает возможность исключить ложные срабатывания защитных систем и сосредоточить внимание на реальных неисправностях. Так как диагностика начинается не с момента проявления последствий, а сразу после регистрации подозрительного поведения сигнала, такой подход позволяет сократить время для локализации и устранения отказов. Таким образом, снижаются как временные, так и ресурсные затраты на восстановление работоспособности оборудования. Это особенно критично в условиях ограниченного состава судовой команды и удалённости от береговой инфраструктуры.

Следует отметить, что предложенный алгоритм обладает определёнными функциональными ограничениями и не предназначен для выявления всех возможных типов неисправностей в информационно-измерительном канале уровня. В частности, он не способен диагностировать отказы, проявляющиеся в виде постепенного дрейфа показаний или плавающих отклонений сигнала. Такие аномалии, как правило, обусловлены старением чувствительного элемента датчика, изменением его метрологических характеристик после длительной эксплуатации или старения электронных компонентов, и не сопровождаются резким изменением скорости сигнала, превышающим пороговое значение.

Алгоритм, представленный в работе, ориентирован исключительно на идентификацию резких, импульсных искажений сигнала. К таким отказам относятся: электромагнитные помехи, наводимые на линии связи, обрыв или короткое замыкание, а также нарушения контакта в разъёмах и клеммных соединениях, вызванные вибрацией, окислением токопроводящих поверхностей или попаданием влаги. Все эти виды неисправностей проявляются в виде скачкообразных выбросов или провалов измеряемого параметра. Это позволяет алгоритму надёжно их идентифицировать по превышению порогового значения темпа изменения уровня. Предложенный алгоритм следует рассматривать как специализированный инструмент раннего обнаружения внезапных нарушений целостности измерительного канала. Данный инструмент может дополнять, но не заменять другие методы технической диагностики.

Перспективы дальнейшего развития предложенного подхода связаны с его интеграцией в более сложные иерархические структуры управления. В частности, сигнал о недостоверности измерений, формируемый разработанным алгоритмом, может быть использован не только для информирования оператора, но и в качестве управляющего воздействия для модификации логики работы смежных подсистем. Например, в случае подтверждённой неисправности измерительного канала уровня целесообразно автоматически деактивировать аварийные защиты, завязанные на этот параметр, либо перевести систему в резервный режим с использованием резервного датчика или расчётной модели уровня. Подобная адаптация алгоритмов защиты позволяет избежать необоснованных остановок оборудования и сохранить

работоспособность энергетической установки на приемлемом уровне до завершения ремонтных работ.

Важно отметить, что реализация подобных расширенных функций требует комплексного подхода, включающего как модернизацию программного обеспечения контроллеров и систем диспетчеризации, так и обновление регламентирующих документов по эксплуатации. Тем не менее, даже в базовом варианте предложенный алгоритм демонстрирует высокий потенциал для практического применения и может служить основой для создания интеллектуальных систем самодиагностики, ориентированных на обеспечение безаварийной и энергоэффективной работы судовых энергетических установок.

Заключение

В ходе выполнения исследования разработан алгоритм самодиагностики информационно-измерительного канала уровня, применяемого в составе судовой котельной установки. Основу алгоритма составляет анализ темпа изменения измеряемого параметра и его сравнение с физически обоснованным пороговым значением, полученным на основе динамических характеристик котельного агрегата в штатных режимах работы. Реализация выполнена в среде MasterSCADA 4D с использованием языка программирования Function Block Diagram, что обеспечивает совместимость с промышленными контроллерами и соответствие требованиям стандарта МЭК 61131-3.

Экспериментальная проверка показала, что алгоритм надёжно идентифицирует резкие, физически невозможные изменения уровня, характерные для таких отказов, как обрыв линии связи, электромагнитные помехи, нарушение контактов или воздействие внешних агрессивных факторов. При этом ложные срабатывания в условиях нормальной эксплуатации не наблюдались, что подтверждает корректность выбранных критериев диагностики.

Практическая ценность предложенного решения заключается в снижении времени на выявление и устранение неисправностей, предотвращении ложных активаций защит и повышении общей надёжности управления энергетической установкой. Перспективы развития связаны с интеграцией сигнала диагностики в логику аварийной защиты и перехода на резервные режимы работы, что позволит создать более адаптивные и отказоустойчивые системы автоматики. Таким образом, разработанный алгоритм представляет собой вклад в обеспечение безопасной и эффективной эксплуатации судовых энергетических комплексов в условиях повышенных требований к автономности и надёжности.

Список литературы

1. Коновалов П. О., Иванченко А. А., Ларионов Г. Л. Опыт развития и применения в эксплуатации систем мониторинга технического состояния судовых ДВС // Наука в современном информационном обществе. 2023. С. 92–101.
2. Бурков Д. Е. Применение судовой информационной системы для контроля и мониторинга технического состояния судового оборудования // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала Макарова. 2023. Т. 15, №. 5. С. 893–902.
3. Валов Д. С., Валгин С. А. Системы управления судовыми энергетическими установками автономных судов // Актуальные исследования. 2023. №. 5(135). С. 19–28.
4. Sánchez-Beaskoetxea J. et al. Human error in marine accidents: Is the crew normally to blame? // Maritime Transport Research. – 2021. – Т. 2. – С. 100016.
5. Zhang R. G., Liu J., Gu Z. Research on crew-level maintenance strategy for ship equipment based on risk-based decision // 2021 14th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). – IEEE, 2021. – С. 87-90.

6. Dionysiou K., Bolbot V., Theotokatos G. A functional model-based approach for ship systems safety and reliability analysis: Application to a cruise ship lubricating oil system //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. – 2022. – Т. 236. – №. 1. – С. 228–244.
7. Du T. et al. A self-powered and highly accurate vibration sensor based on bouncing-ball triboelectric nanogenerator for intelligent ship machinery monitoring //Micromachines. – 2021. – Т. 12. – №. 2. – С. 218.
8. Zhang P. et al. Marine systems and equipment prognostics and health management: a systematic review from health condition monitoring to maintenance strategy //Machines. – 2022. – Т. 10. – №. 2. – С. 72.
9. Диагностика работы датчиков контрольно-измерительных приборов на основе моделей автоассоциативных нейронных сетей / А. В. Николаева, А. В. Литышев, В. В. Астахов, С. И. Пантюшин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2024. – № 4. – С. 38–48. – EDN MGLBZZ.
10. Клячкин, В. Н. Диагностика состояния технического объекта с помощью классификации методами машинного обучения / В. Н. Клячкин, Ю. Е. Кувайскова, Н. А. Ломовцева // Программные продукты и системы. – 2021. – № 4. – С. 572–578. – DOI 10.15827/0236-235X.136.572-578. – EDN BGPQEJ.
11. Клячкин, В. Н. Прогнозирование состояния технического объекта с применением методов машинного обучения / В. Н. Клячкин, Д. А. Жуков // Программные продукты и системы. – 2019. – № 2. – С. 244–250. – EDN VBAGKR.
12. Система диагностики прогнозирования состояния судовых энергетических установок на основе нейронных сетей / А. С. Самчук, А. В. Ивановская, В. И. Ухин, Д. В. Афицеров // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия: Морские технологии. – 2025. – № 2. – С. 66–73. – EDN GNMBBX.

References

1. Konovalov P. O., Ivanchenko A. A., Larionov G. L. Experience in the Development and Application of Systems for Monitoring the Technical Condition of Marine Internal Combustion Engines // Science in the Modern Information Society. 2023. pp. 92–101.
2. Burkov D. E. Application of a Shipboard Information System for Monitoring and Controlling the Technical Condition of Ship Equipment // Bulletin of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2023. Vol. 15, no. 5. pp. 893–902.
3. Valov D. S., Valgin S. A. Control Systems for Marine Power Plants of Autonomous Vessels // Current Research. 2023. no. 5(135). pp. 19–28.
4. Sánchez-Beaskoetxea J. et al. Human Error in Marine Accidents: Is the Crew Normally to Blame? //Maritime Transport Research. – 2021. – Т. 2. – P. 100016.
5. Zhang R. G., Liu J., Gu Z. Research on crew-level maintenance strategy for ship equipment based on risk-based decision /2021 14th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). – IEEE, 2021. – pp. 87-90.
6. Dionysiou K., Bolbot V., Theotokatos G. A functional model-based approach for ship systems safety and reliability analysis: Application to a cruise ship lubricating oil system //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. – 2022. – Т. 236. – №. 1. – pp. 228-244.
7. Du T. et al. A self-powered and highly accurate vibration sensor based on a bouncing-ball triboelectric nanogenerator for intelligent ship machinery monitoring // Micromachines. – 2021. – Vol. 12. – No. 2. – P. 218.
8. Zhang P. et al. Marine systems and equipment prognostics and health management: a systematic review from health condition monitoring to maintenance strategy // Machines. – 2022. – Vol. 10. – No. 2. – P. 72.
9. Diagnostics of instrument sensors operation based on autoassociative neural network models / А. В. Николаева, А. В. Литышев, В. В. Астахов, С. И. Пантюшин // Issues of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors. – 2024. – No. 4. – P. 38–48. – EDN MGLBZZ.
10. Klyachkin, V. N. Diagnostics of the state of a technical object using classification methods of machine learning / V. N. Klyachkin, Yu. E. Kuvaiskova, N. A. Lomovtseva // Software

products and systems. – 2021. – No. 4. – Pp. 572–578. – DOI 10.15827/0236-235X.136.572-578. – EDN BGPQEJ.

11. Klyachkin, V. N. Forecasting the state of a technical object using machine learning methods / V. N. Klyachkin, D. A. Zhukov // Software products and systems. – 2019. – No. 2. – Pp. 244–250. – EDN VBAGKR.
12. Diagnostic system for forecasting the state of ship power plants based on neural networks / A. S. Samchuk, A. V. Ivanovskaya, V. I. Ukhin, D. V. AfiseroV // Bulletin of the Kerch State Marine Technological University. Series: Marine Technologies. - 2025. - No. 2. - P. 66-73. - EDN GNMBBX.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Житников Александр Андреевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет», 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский, ул. Виллойская, 56/1, e-mail: zhitnikov-alexandr@mail.ru

Aleksandr A. Zhitnikov, postgraduate student, “Kamchatka State Technical University”, 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky, Vilyuyskaya St., 56/1, e-mail: zhitnikov-alexandr@mail.ru

Марченко Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет», 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский, ул. Виллойская, 56/1, e-mail: Marchenko_Alx@inbox.ru

Aleksey A. Marchenko, candidate of technical sciences, associate professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kamchatka State Technical University”, 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky, Vilyuyskaya St., 56/1, e-mail: Marchenko_Alx@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 27.04.2026; принята к публикации 25.05.2026; опубликована онлайн 20.06.2026. Received 27.04.2026; published online 20.06.2026.