

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Научная статья

УДК 629.5.069 DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2026-75-24

EDN: OUXADX

Разработка алгоритма идентификации неисправности информационно-измерительного канала температуры

Александр Андреевич Житников¹, Алексей Александрович Марченко²,
Светлана Витальевна Чебанюк³

Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский,
Россия

¹ zhitnikov-alexandr@mail.ru, ORCID: 0009-0004-5002-8279

² Marchenko_Alx@inbox.ru

³ svchebanyuk@yandex.ru

Аннотация. Представлена разработка и внедрение алгоритма идентификации неисправностей в информационно-измерительном канале температуры. Надежность систем автоматического управления на судах критически зависит от целостности данных датчиков. Показания температуры определяют безопасные рабочие пределы для дизель-генераторов, котлов, турбин и вспомогательных систем. Однако измерительные каналы подвергаются воздействию суровых морских условий, включая вибрацию, влажность, соляной туман. Это может привести к различным неисправностям, таким как искажение сигнала, дрейбзг контактов, истирание кабеля, проникновение влаги или частичные обрывы линии. Эти аномалии могут привести к ложным аварийным отключениям или, наоборот, к пропуску обнаружения реальных неисправностей. Это создает значительные эксплуатационные риски и риски для безопасности. Для решения этой проблемы авторами представлен алгоритм, который использует физический подход и анализирует переходной процесс средства измерения температуры. В частности, он рассчитывает максимально допустимую скорость изменения температуры в секунду. Алгоритм непрерывно сравнивает абсолютную разность последовательных отсчетов температуры с этим динамическим пороговым значением. Реализованное в CODESYS 2.3 решение не требует аппаратного резервирования и создает минимальную вычислительную нагрузку на программируемые логические контроллеры. Верификация путём моделирования с использованием линейно возрастающего профиля температуры демонстрирует способность алгоритма надежно отличать нормальные рабочие переходные процессы от аномального поведения сигнала. При превышении порогового значения активируется флаг «ALARM», который может использоваться для уведомления оператора или для предотвращения ложных команд на отключение.

Ключевые слова: датчик температуры, информационно-измерительная система, система управления, алгоритм, аварийный останов, технологический процесс

Для цитирования: Житников А. А., Марченко А. А., Чебанюк С. В. Разработка алгоритма идентификации неисправности информационно-измерительного канала температуры // Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Т. 75, № 1. С. 242–252.

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2026. Vol. 75, no. 1.
P. 242–252.

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Original article

Development of an algorithm for identifying a malfunction of a temperature information-measuring channel

Aleksandr A. Zhitnikov¹, Alexey A. Marchenko², Svetlana V. Chebanyuk³

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

¹ zhitnikov-alexandr@mail.ru, ORCID: 0009-0004-5002-8279

² Marchenko_Alx@inbox.ru

³ svchebanyuk@yandex.ru

Abstract. This article presents the development and implementation of a fault identification algorithm for a temperature data channel. The reliability of automated control systems on ships critically depends on the integrity of sensor data. Temperature readings define safe operating limits for diesel generators, boilers, turbines, and auxiliary systems. However, measurement channels are exposed to harsh marine conditions, including vibration, humidity, and salt fog. This can lead to various faults, such as signal distortion, contact bounce, cable abrasion, moisture ingress, or partial line breaks. These anomalies can lead to false trips or, conversely, to missed detection of real faults. This creates significant operational and safety risks. To address this problem, the author presents an algorithm that uses a physical approach and analyzes the transient response of the temperature measurement instrument. Specifically, it calculates the maximum allowable rate of temperature change per second. The algorithm continuously compares the absolute difference of successive temperature readings with this dynamic threshold. The solution implemented in CODESYS 2.3 requires no hardware redundancy and places minimal computational load on programmable logic controllers. Simulation verification using a linearly increasing temperature profile demonstrates the algorithm's ability to reliably distinguish normal operating transients from abnormal signal behavior. When a threshold is exceeded, an "ALARM" flag is activated, which can be used to notify the operator or prevent spurious shutdown commands.

Keywords: temperature sensor, information-measuring system, control system, algorithm, emergency stop, technological process

For citation: Zhitnikov A. A., Marchenko A. A., Chebnyuk S. V. Development of an algorithm for identifying a malfunction of a temperature information-measuring channel. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2026;75(1):242–252. (In Russ.).

Введение

Современные судовые энергетические установки представляют собой сложные технические комплексы, в которых безопасность, надёжность и эффективность эксплуатации напрямую зависят от качества функционирования систем автоматического управления. Основу таких систем составляют информационно-измерительные каналы, обеспечивающие непрерывный мониторинг ключевых параметров. Для большинства судовых систем температурный режим определяет допустимые границы работы главных и вспомогательных энергетических агрегатов. Корректное измерение температуры позволяет не только поддерживать заданные технологические условия, но и своевременно выявлять отклонения, предшествующие аварийным ситуациям [1–4].

Однако достоверность принимаемых управляющих решений напрямую обусловлена надёжностью самих измерительных каналов. В условиях морской эксплуатации измерительные каналы подвержены интенсивному воздействию внешних факторов: вибрации, повышенной влажности, солевого тумана, перепадов температур, а также сильных электромагнитных помех, генерируемых судовым электрооборудованием. Всё это может стать причиной искажения сигнала информационно-измерительного канала [5–8]. В свою очередь, система автоматики, интерпретируя искажённые данные как реальное превышение температурного порога, может инициировать необоснованную остановку энергетической установки.

Для судовых условий последствия ложного срабатывания автоматических систем защиты оборудования могут повлечь за собой значительные временные затраты. Более того, внезапное отключение основного источника энергии может нарушить работу систем жизнеобеспечения, навигации и управления движением, создавая угрозу для судна и экипажа. С другой стороны, пропуск реальной неисправности из-за недостаточной чувствительности диагностической системы может привести к еще более серьезным последствиям [9–12].

Традиционные методы диагностики, основанные на фиксированных пороговых значениях, зачастую не обеспечивают достаточной надёжности в условиях динамически изменяющихся режимов работы судовой энергетике. Кроме того, многие существующие подходы к повышению отказоустойчивости предполагают использование аппаратной избыточности: дублирование датчиков, резервирование каналов. Данный подход увеличивает массогабаритные характеристики, стоимость и сложность обслуживания систем, что нежелательно в условиях ограниченного пространства и ресурсов на борту судна.

В связи с этим возникает необходимость в разработке алгоритмов диагностики, способных в реальном времени идентифицировать неисправности измерительных каналов температуры без привлечения дополнительных аппаратных средств. Такие алгоритмы должны учитывать как динамические особенности тепловых процессов в судовых агрегатах, так и специфику типовых отказов измерительных цепей в морских условиях. Важнейшими требованиями к подобным решениям являются: минимальные вычислительные затраты, совместимость с существующими платформами промышленной автоматики и способность надёжно различать штатные технологические отклонения и аномалии, вызванные отказами измерительного оборудования [13–15].

Целью настоящей работы является разработка и обоснование алгоритма идентификации неисправностей информационно-измерительных каналов температуры, ориентированного на применение в судовых энергетических установках. Предлагаемый подход направлен на повышение достоверности диагностики за счёт анализа временных и статистических характеристик сигнала в контексте текущего режима работы объекта.

Материалы и методы

Предлагаемый метод идентификации неисправностей средств измерения температуры основан на анализе динамических характеристик, определяемых свойствами датчика температуры. Суть подхода заключается в вычислении максимально допустимой скорости изменения температуры за единицу времени. При этом система находится в режиме естественного переходного процесса, обусловленного реальными тепловыми явлениями. Это значение выступает в роли динамического порога, за пределы которого измеренный сигнал не может выходить без наличия аномалии.

В качестве материала исследования будет применяться термометр сопротивления типа А от производителя Senmatic. Выбор данного датчика обусловлен наличием у производителя сертификации на использование данного устройства в судовых условиях. Кроме того, данный производитель регламентирует показатели инерционности своих средств измерений в технической документации.

Для верификации работоспособности и оценки эффективности предложенного подхода использована программная реализации и отладка в промышленной среде разработки CODESYS 2.3.

Результаты

Переходной процесс термометра сопротивления, при изменении измеряемого параметра температуры, может быть описан следующим выражением:

$$\frac{T_f - T}{T_f - T_0} = e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

где T_f – конечная температура переходного процесса;

T – измеряемый параметр температуры во время переходного процесса;

T_0 – начальная температуры переходного процесса;

t – время переходного процесса;

τ – показатель инерционности датчика температуры.

На основании данного уравнения построим графики зависимости скорости изменения температуры от времени переходного процесса (рис. 1). За начальное и конечное значения переходного процесса будут приняты верхний и нижний пределы измерения датчика. Показатель тепловой инерционности регламентирован производителем средства измерения $\tau = 40$ с.



Рис. 1. Переходной процесс термометра сопротивления. Составлено авторами
Fig. 1. Transient process of a resistance thermometer. Compiled by the authors

Выразим значение T для моментов $t = 0$ с и $t = 1$, найдем показания термометров сопротивления в эти моменты времени, используя формулу

$$T = -1 \times (e^{\frac{-t}{\tau}}) \times (T_f - T_0) - T. \quad (2)$$

$$T_1 = -1 \times (e^{\frac{0}{40}}) \times (260 - (-50)) - 260 = -50. \quad (3)$$

$$T_2 = -1 \times (e^{\frac{1}{40}}) \times (260 - (-50)) - 260 = -42,346. \quad (4)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = -42,346 - (-50) = 7,654. \quad (5)$$

Основу метода составляет регулярный опрос значения температуры с заданной дискретностью, после чего вычисляется абсолютная разность между последовательными измерениями. Эта разность сопоставляется с заранее определённым пороговым значением максимально допустимой скорости изменения температуры. Данный параметр рассчитывается на основе математической модели переходного процесса для конкретного средства измерения температуры (рис. 2).

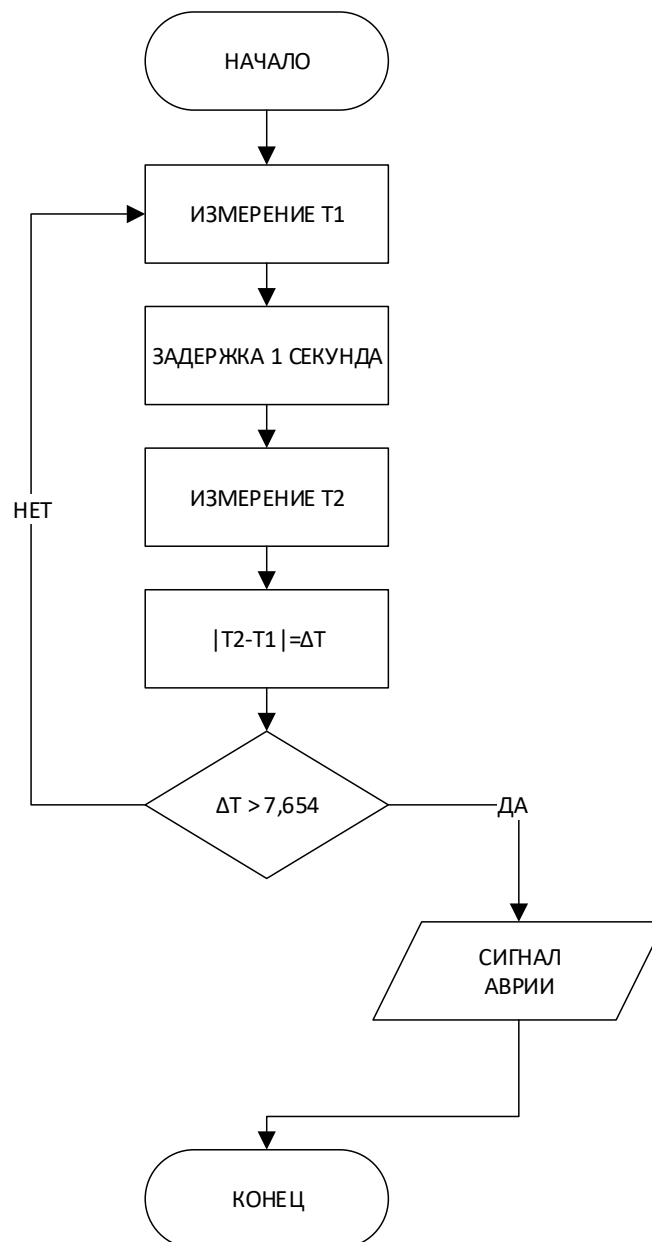


Рис. 2. Алгоритм идентификации неисправности. Составлено авторами
Fig. 2. Fault identification algorithm. Compiled by the authors

В случае если наблюдаемое изменение превышает вычисленный порог, алгоритм интерпретирует данное событие как признак аномального поведения сигнала. При фиксации подобного события система генерирует диагностическое сообщение о вероятной неисправности информационно-измерительного канала температуры. Данное сообщение может быть передано в верхний уровень автоматизированной системы управления для оперативного реагирования персонала или дальнейшего логического анализа.

Реализация разработанного алгоритма идентификации неисправностей информационно-измерительного канала температуры была выполнена в промышленной среде программирования CODESYS 2.3, соответствующей стандарту МЭК 61131-3 и широко применяемой для конфигурирования программируемых логических контроллеров в составе систем автоматического управления. Программная структура алгоритма построена на базе функциональных блоков, обеспечивающих последовательное выполнение операций измерения, временного хранения, вычисления разности и сравнения с пороговым значением (рис. 3).

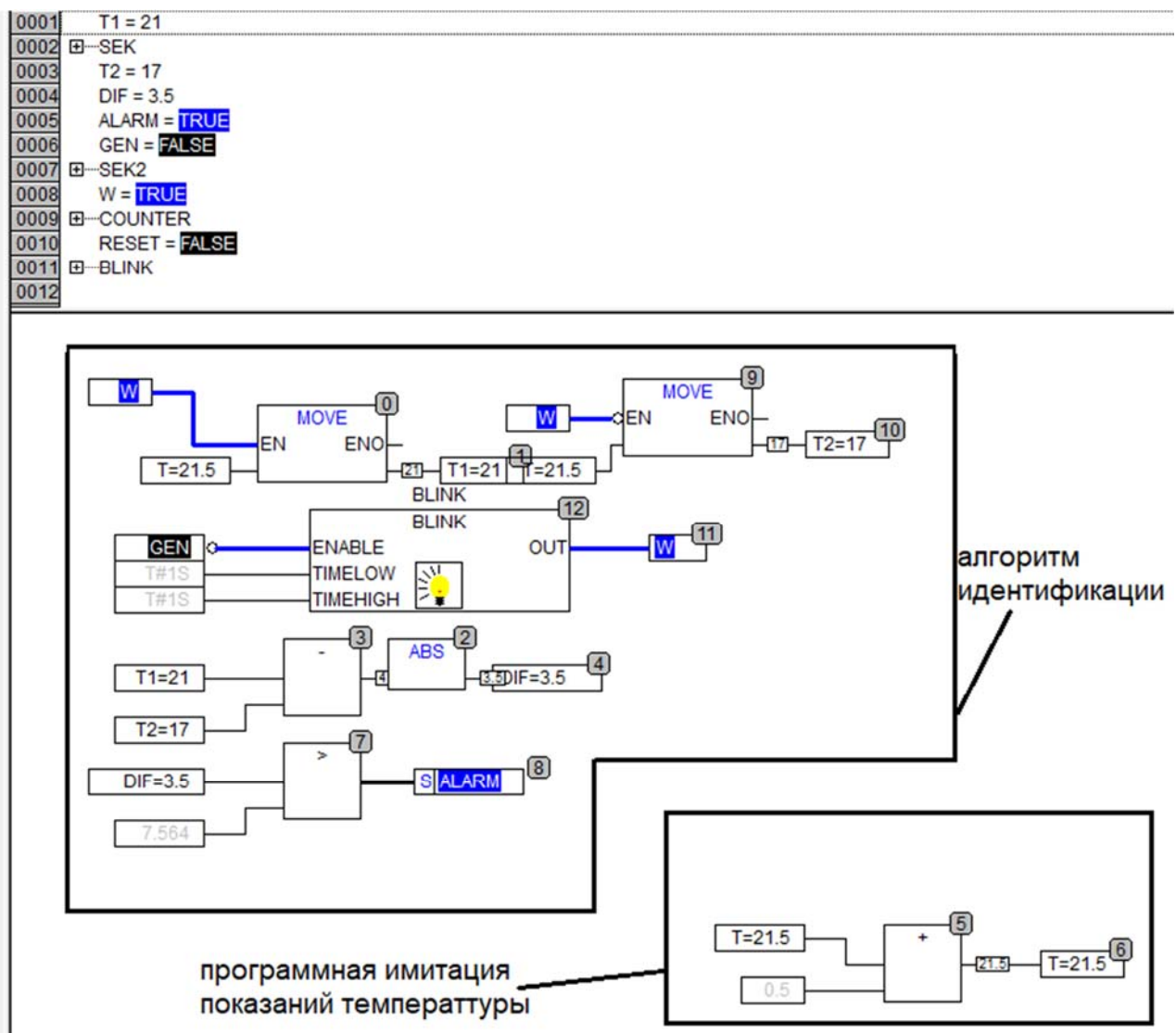


Рис. 3. Программа идентификации неисправности измерительного канала температуры.
Составлено авторами

Fig. 3. Temperature measuring channel fault identification program. Compiled by the authors

Центральным элементом логики является организация дискретного опроса температурного сигнала с фиксированным интервалом в одну секунду. Для этого в программе задействованы два экземпляра функционального блока «MOVE», каждый из которых отвечает за копирование текущего значения измеряемой температуры из входного регистра измерительного канала в соответствующие внутренние переменные «T1» и «T2». Активация этих блоков осуществляется поочередно, что обеспечивает фиксацию двух последовательных значений сигнала с временным сдвигом, равным одному секундному интервалу. Управление чередованием активных фаз реализовано с помощью генератора тактового сигнала – функционального блока «BLINK», настроенного на период 2 секунды и скважность 50 %. Выходной сигнал данного блока, представленный булевой переменной «W», попеременно разрешает выполнение одного из двух блоков «MOVE», тем самым обеспечивая строгую синхронизацию процесса выборки.

После получения двух последовательных значений температуры T1 и T2 вычисляется их абсолютная разность. Данная операция реализуется последовательным применением арифметического блока вычитания «-» и блока вычисления модуля «ABS», что позволяет получить скалярную величину изменения температуры за одну секунду независимо от направления её динамики. Результат записывается в переменную «DIF», которая далее используется в качестве входного параметра для диагностического сравнения.

Сравнение осуществляется с помощью реляционного блока «>», которому на второй вход подаётся заранее определённое пороговое значение – максимально допустимая скорость изменения температуры. Она рассчитана для конкретного типа термометра сопротивления с учётом его динамических характеристик и условий эксплуатации. В случае превышения порога переменная «ALARM» устанавливается в логическое состояние TRUE, сигнализируя о вероятной неисправности в измерительном канале.

Для верификации корректности работы алгоритма в процессе разработки была реализована программная имитация входного температурного сигнала. С этой целью использовался арифметический блок «+», увеличивающий значение переменной «T» на 0,5 единицы измерения в каждом цикле выполнения программы. При типичной частоте цикла программируемого логического контроллера 10–100 мс такой подход моделирует плавный, линейно возрастающий переходный процесс.

Таким образом, программная реализация в среде CODESYS 2.3 обеспечивает полную функциональность предложенного метода диагностики с минимальными вычислительными затратами и без необходимости в дополнительном аппаратном обеспечении, что подтверждает его пригодность для внедрения в реальные судовые и промышленные системы автоматизации.

Процедура проведения проверки производилась с использованием оборудования от производителя «Овен». Разработанный алгоритм идентификации неисправности загружался в программируемый логический контроллер, который был соединен по протоколу RS-485 с модулем аналогового ввода. Для имитации показаний датчика использовался генератор аналогового сигнала, который имитировал показания унифицированного сигнала от -1 до 1 В. Питание оборудование получало через блок питания 24 В (рис. 4). Результаты проведения проверки представлены в таблице.

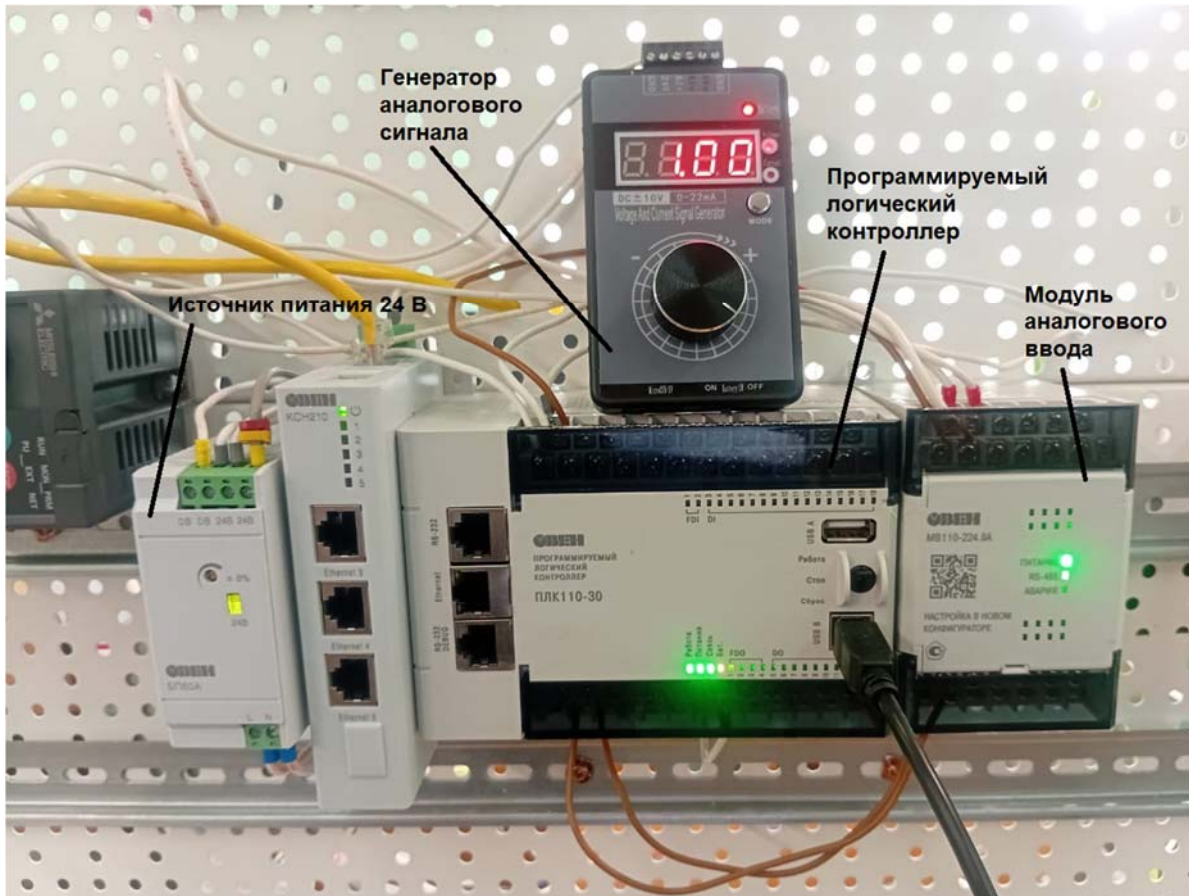


Рис. 4. Процедура проверки работоспособности алгоритма. Составлено авторами
 Fig. 4. Procedure for checking the algorithm's performance. Compiled by the authors

Результаты проверки работоспособности алгоритма

Results of the algorithm performance test

Подаваемое значение с генератора, В	Эквивалент в значениях температуры, °С	Значение скачкообразного изменения сигнала, В	Обнаружение неисправности
-1	-50	+0,08	Да
-0,5	27,5	+0,07	Да
0	105	+0,06	Да
0	105	-0,06	Да
0,5	182,5	-0,07	Да
1	260	-0,08	Да

Обсуждение

Большинство современных судовых энергетических комплексов оснащены значительным количеством автоматизированных систем управления. Это обстоятельство делает особенно актуальной проблему ложных срабатываний защитных функций, предназначенных для контроля технологического оборудования, агрегатов и вспомогательных узлов. Подобные ложные срабатывания могут приводить к необоснованному нарушению нормальных режимов работы, вводить в заблуждение обслуживающий персонал и даже инициировать развитие серьёзной аварийной ситуации, если остановка агрегата произойдёт в критический момент.

Внедрение специализированных алгоритмов диагностики информационно-измерительных каналов позволит значительно снизить вероятность ложных срабатываний, связанных с отказами датчиков температуры. Такой подход особенно эффективен при возникновении типовых неисправностей, таких как нарушение целостности клеммных соединений, проникновение влаги под защитную крышку датчика, механическое повреждение изоляции проводов, а также появление электромагнитных помех и наводок в линиях связи. Все эти явления способны исказить или полностью заблокировать передачу сигнала, что приводит к формированию недостоверной информации на входе системы управления.

Разработанный алгоритм обнаружения неисправностей должен быть интегрирован непосредственно в программную логику автоматизированной системы управления. После интеграции требуется выполнить модификацию структуры аварийно-предупредительной сигнализации внутри программируемого логического контроллера. Эта модификация предполагает разделение единого аварийного сигнала на два независимых канала. Первый канал должен указывать на отклонения в самом технологическом процессе, такие как превышение допустимой температуры в рабочей зоне. Второй канал предназначен исключительно для сигнализации о неисправности самого измерительного средства.

Для исключения необоснованной остановки оборудования, вызванной отказом датчика, необходимо внести изменения в программу управления. Алгоритм должен предусматривать проверку состояния информационно-измерительного канала перед выполнением команды на аварийное отключение. Если одновременно с аварийным сигналом поступает подтверждение неисправности, команда на остановку должна быть заблокирована. Это позволит избежать простоя агрегата по ложной причине и сохранить устойчивость технологического процесса.

Следует отметить, что предложенный алгоритм не способен выявлять медленно развивающиеся метрологические отклонения, такие как дрейф нулевого значения или потеря точности измерений в результате старения чувствительного элемента. Эти виды неисправностей носят скрытый характер и не сопровождаются резкими изменениями сигнала. Для их обнаружения и устранения требуется регулярное техническое обслуживание измерительных средств, включающее калибровку, поверку и юстировку с использованием аттестованных эталонных приборов. Только комплексный подход, сочетающий как программную диагностику, так и метрологический контроль, обеспечивает полную надёжность информационно-измерительных каналов в условиях длительной эксплуатации на судне.

Заключение

В ходе проведённого исследования разработан и реализован в виде программы алгоритм идентификации неисправностей информационно-измерительных каналов температуры, ориентированный на применение в условиях судовых энергетических установок. Предложенный подход основан на анализе динамической характеристики измерительного сигнала с физически возможными температурными изменениями, определяемыми инерционными характеристиками конкретного средства измерения. Использование математической модели переходного процесса позволило обоснованно определить максимально допустимую скорость изменения температуры за одну секунду, которая служит порогом для диагностики неисправности.

Алгоритм реализован в промышленной среде программирования CODESYS 2.3, что обеспечивает его совместимость с существующими платформами программируемых логических контроллеров и возможность внедрения без модернизации аппаратной части. Программная структура включает последовательный опрос сигнала, вычисление абсолютной разности между соседними измерениями и сравнение результата с расчётным порогом. При превышении допустимого значения генерируется диагностический сигнал «ALARM», который может использоваться как для информирования оператора, так и для блокировки ложных команд аварийной остановки агрегата.

Верификация работоспособности алгоритма проведена на испытательном стенде. Разработанное решение позволяет своевременно выявлять аномалии, минимизируя риск как ложных срабатываний, так и пропуска реальных аварийных ситуаций.

Таким образом, предложенный алгоритм обеспечивает повышение надёжности и безопасности эксплуатации судовых энергетических комплексов за счёт диагностики состояния измерительных каналов без применения аппаратной избыточности. Его низкие вычислительные затраты, простота интеграции и ориентация на реальные условия морской эксплуатации делают его перспективным для практического внедрения в существующие системы автоматического управления.

Список источников

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. Kang Y. J. et al. Hierarchical level fault detection and diagnosis of ship engine systems // Expert Systems with Applications. 2023. Т. 213. С. 118814.
3. Kougiatsos N., Reppa V. A distributed cyber-physical framework for sensor fault diagnosis of marine internal combustion engines // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2024. Т. 32, №. 5. С. 1718–1729.
4. Orhan M., Celik M. A literature review and future research agenda on fault detection and diagnosis studies in marine machinery systems // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2024. Т. 238, №. 1. С. 3–21.
5. Velasco-Gallego C., Lazakis I. RADIS: A real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery // Expert Systems with Applications. 2022. Т. 204. С. 117634.
6. 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.
7. Жидков Н. А., Новикова О. В. Повышение экономической и энергетической эффективности судовых двигателей внутреннего сгорания в условиях ужесточения экологических требований // Цифровая трансформация экономических систем: проблемы и перспективы (ЭКОПРОМ-2022). 2022. С. 274–277.
8. Валов Д. С., Валгин С. А. Системы управления судовыми энергетическими установками автономных судов // Актуальные исследования. 2023. №. 5(135). С. 19–28.
9. Vrvilo P. et al. Methods and equipment for analysis and diagnosis of marine engines during navigation // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2024. Vol. 46, №. 1. P. 15808–15824.
10. Pagonis D. N. Sensors and Measurement Systems for Marine Engineering Applications // Applied Sciences. 2024. Т. 14, №. 9. С. 3761.
11. Kougiatsos N., Reppa V. A distributed cyber-physical framework for sensor fault diagnosis of marine internal combustion engines // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2024. Т. 32, №. 5. С. 1718–1729.
12. Kim D. et al. Explainable anomaly detection framework for maritime main engine sensor data // Sensors. 2021. Т. 21, №. 15. С. 5200.
13. Liu B. et al. Research on fault early warning of marine diesel engine based on CNN-BiGRU // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Т. 11, №. 1. С. 56.
14. Jovanović I. et al. Combined Fault Tree Analysis and Bayesian Network for Reliability Assessment of Marine Internal Combustion Engine // Journal of Marine Science and Application. 2025. С. 1–20.

15. Yaqin R. I. et al. Failure analysis of fuel system main engine fishing vessel (case study: KM. Sumber Mutiara) // Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan. 2023. Т. 20, №. 1. С. 34–43.

Сведения об авторах

А. А. Житников – аспирант кафедры «Системы управления».

А. А. Марченко – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Системы управления».

С. В. Чебанюк – доцент кафедры «Системы управления».

Information about the authors

A. A. Zhitnikov – Graduate student of the Department of Control Systems.

A. A. Marchenko – PhD in Engineering Sciences, Head of the Department of Control Systems.

S. V. Chebanyuk – Associate Professor of the Department of Control Systems.

Статья поступила в редакцию 21.01.2026; одобрена после рецензирования 13.02.2026; принята к публикации 20.02.2026.

The article was submitted 21.01.2026; approved after reviewing 13.02.2026; accepted for publication 20.02.2026.

© Житников А. А., Марченко А. А., Чебанюк С. В., 2026.

«Разработка алгоритма идентификации неисправности информационно-измерительного канала температуры» [Житников А. А., Марченко А. А., Чебанюк С. В.] распространяется под лицензией Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).