

УДК 621.43.056
EDN TXVUEB

АНАЛИЗ РАБОТЫ ШТАТНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРОПУСКОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ В СУДОВЫХ ДВУХТОПЛИВНЫХ ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ WinGD X-DF И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

А.А. Иванченко, д-р техн. наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru
А.В. Кононов, аспирант, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: Andrey19991207@yandex.ru

В работе рассмотрена физическая природа пропусков воспламенения (misfire) в судовых двухтопливных газовых двигателях WinGD X-DF, работающих в газовом режиме по циклу Отто низкого давления на бедных метановоздушных смесях. Проанализировано влияние коэффициента избытка воздуха (λ) на стабильность воспламенения: показано, что при $\lambda \approx 2,2-2,6$ скорость распространения пламени снижается, а превышение верхнего предела устойчивости ($\lambda \approx 2,6$) приводит к резкому росту неустойчивости сгорания и пропускам воспламенения. Особое внимание уделено влиянию качки судна на неравномерность частоты вращения (RPM fluctuation) и ее взаимодействию со штатной системой диагностики пропусков воспламенения в составе ECS. На основе анализа штатной логики (подсчет пропусков за 6 циклов с порогами 3/6 после обновления 2019 г.) выявлены причины ложных срабатываний при синхронных колебаниях нагрузки, показаны необходимость дифференциальной диагностики и целесообразность повышения порога чувствительности.

Предложены методы раннего обнаружения предсбойных состояний: введение коэффициента синхронности на основе максимального давления сгорания для отличия локальных пропусков от внешних возмущений, а также мониторинг коэффициента вариации максимального давления сгорания. Разработаны алгоритмы адаптивной коррекции параметров пилотного впрыска (угол опережения и длительность) и предиктивного управления λ в переходных режимах (резкие сбросы нагрузки) с плавным закрытием газовых клапанов и форсированием пилотной порции. Все решения реализуются в виде дополнительного программного модуля, не требующего изменения аппаратной части.

Ключевые слова: WinGD X-DF, двухтопливный двигатель, пропуски воспламенения, misfire, коэффициент избытка воздуха, качка, RPM fluctuation, диагностирование, Gas Trip.

Для цитирования: Иванченко А.А. Анализ работы штатной системы контроля пропусков воспламенения в судовых двухтопливных газовых двигателях WinGD X-DF и разработка алгоритмов адаптивной коррекции рабочего процесса / А.А. Иванченко, А.В. Кононов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 2. — С. 175–189. — EDN TXVUEB.

ANALYSIS OF THE OPERATION OF THE STANDARD MISFIRE DETECTION SYSTEM IN WinGD X-DF MARINE DUAL-FUEL GAS ENGINES AND DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR ADAPTIVE CORRECTION OF THE WORKING PROCESS

A.A. Ivanchenko, DSc, Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul., 5/7, e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru
A.V. Kononov, PhD Student, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul., 5/7, e-mail: Andrey19991207@yandex.ru

This paper examines the physical nature of misfires in WinGD X-DF marine dual-fuel gas engines operating in gas mode using the low-pressure Otto cycle with lean methane-air mixtures. The effect of the excess air ratio (λ) on ignition stability is analyzed: it is shown that at $\lambda \approx 2,2-2,6$, the flame propagation velocity decreases, while exceeding the upper stability limit ($\lambda \approx 2,6$) leads to a sharp increase in combustion instability and misfires. Particular attention is paid to the effect of ship motion on RPM fluctuation and its interaction with the standard misfire diagnostic system, which is part of the ECS. Based on an analysis of the standard logic (misfire counting over 6 cycles with thresholds of 3/6 after the 2019 update), the causes of false alarms during synchronous load fluctuations were identified, the need for differential diagnostics and the feasibility of increasing the sensitivity threshold were demonstrated.

Methods for early detection of pre-malfunction conditions were proposed: introducing a synchronization coefficient based on the maximum combustion pressure to distinguish local misfires from external disturbances, as well as monitoring the coefficient of variation of the maximum combustion pressure. Algorithms were developed for adaptive correction of pilot injection parameters (advance angle and duration) and predictive λ control in transient conditions (abrupt load drops) with smooth closing of gas valves and boosting of the pilot portion. All solutions are implemented as an additional software module that does not require hardware modifications.

Key words: WinGD X-DF, dual-fuel engine, misfire, ignition failure, excess air ratio, ship motion, RPM fluctuation, diagnostics, Gas Trip.

For citation: Ivanchenko A.A., Kononov A.V. Analysis of the operation of the standard misfire detection system in WinGD X-DF marine dual-fuel gas engines and development of algorithms for adaptive correction of the working process. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 2. P. 175–189. EDN TXVUEB. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Двухтопливные двигатели WinGD X-DF [1], работающие по циклу Отто низкого давления, получили широкое распространение в морской отрасли благодаря способности работать на сжиженном природном газе, что позволяет существенно снизить выбросы оксидов серы, твердых частиц и оксидов азота, обеспечивая соответствие требованиям IMO Tier III. В газовом режиме воспламенение осуществляется за счет микропорции (~1 %) пилотного топлива, поджигающей бедную метановоздушную смесь с коэффициентом избытка воздуха $\lambda = 2,2\text{--}2,6$ [2, 3]. Такая схема обеспечивает высокую топливную экономичность и низкие выбросы, однако создает предпосылки для специфических эксплуатационных проблем, связанных с устойчивостью сгорания на бедных смесях.

Работа на газовом топливе

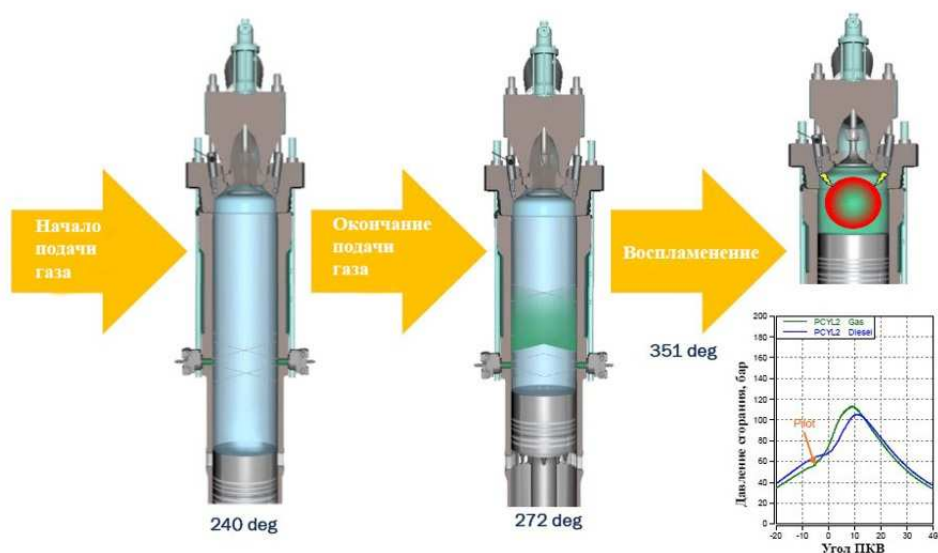


Рис. 1. Принцип работы двигателя X-DF

Одним из наиболее критических рисков для двигателей данного типа являются пропуски воспламенения. При отсутствии сгорания несгоревший метан накапливается в выпускном коллекторе, что создает опасность взрыва в выхлопном тракте при последующем воспламенении. Кроме того, пропуск воспламенения увеличивает выбросы несгоревшего метана [4], обладающего потенциалом глобального потепления в 25–30 раз выше, чем углекислый газ, и вызывает нестабильность частоты вращения главного двигателя, создавая ударные нагрузки на валопровод и кривошипно-шатунный механизм.

Штатная система контроля пропусков воспламенения, встроенная в систему управления двигателем (ECS), после модификации 2019 г. ведет подсчет пропусков воспламенения за 6 рабочих циклов. При превышении порогов — 3 пропуска на цилиндр или 6 на двигатель — инициируется аварийный переход в дизельный режим, называемый Gas Trip (далее — GT). Выбор данных порогов был обусловлен необходимостью исключения ложных срабатываний при качке, когда синхронные колебания частоты вращения ошибочно интерпретируются как множественные пропуски. Однако повышение порогов привело к увеличению времени накопления статистики в 1,5 раза, что означает поступление в выпускной коллектор на 50 % больше несгоревшего метана до момента срабатывания защиты, тем самым повышается риск взрыва и ухудшаются экологические показатели.

Таким образом, существует противоречие между необходимостью надежного детектирования опасных отказов и исключением ложных срабатываний при эксплуатационных возмущениях. Разрешение этого противоречия требует возврата к более чувствительным порогам (2 на цилиндр, 5 на двигатель) при одновременном внедрении методов раннего обнаружения нестабильности и адаптивной коррекции параметров рабочего процесса, позволяющих предотвращать пропуски воспламенения без ложных срабатываний [5]. Настоящая работа посвящена разработке таких методов.

Целью работы является повышение устойчивости рабочего процесса судовых двухтопливных двигателей WinGD X-DF в газовом режиме путем анализа штатной системы контроля пропусков воспламенения, выявления ее ограничений и разработки программных алгоритмов адаптивной коррекции параметров сгорания. Для достижения указанной цели предлагается использовать мониторинг коэффициента вариации максимального давления сгорания COV_p , коэффициент синхронности ($K_{синх}$), адаптивную коррекцию параметров пилотного впрыска и предиктивное управление при сбросах нагрузки. Предлагаемые решения не требуют изменения аппаратной части двигателя и сохраняют штатную логику защиты главного двигателя.

ПРИРОДА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРОПУСКОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ В ДВИГАТЕЛЯХ WinGD X-DF

Двигатели X-DF в газовом режиме работают на бедных смесях с относительно высокими значениями λ . Работа на бедной смеси является основным фактором, обеспечивающим низкие выбросы NO_x , однако она же создает предпосылки для возникновения пропусков воспламенения. При высоких значениях λ скорость распространения пламени существенно снижается [6, 7], и при определенных условиях фронт пламени может не успеть пройти через всю камеру сгорания за отведенное время. Верхний предел устойчивого воспламенения для метановоздушных смесей в условиях, характерных для двигателей X-DF, составляет $\lambda \approx 2,6$. Превышение этого предела приводит к резкому росту нестабильности и в конечном итоге к пропуску воспламенения. По мере увеличения нагрузки рабочая зона по λ сужается, и на высоких нагрузках предел пропуска воспламенения вплотную приближается к пределу детонации, что требует точного управления процессом сгорания. Штатная система управления ECS осуществляет непрерывный мониторинг сгорания и при необходимости корректирует параметры, удерживая двигатель в допустимом рабочем окне.

Пропуск воспламенения представляет собой физическое явление [8], при котором в рабочем цикле цилиндра не происходит воспламенения топливовоздушной смеси. Вследствие отсутствия сгорания тепловая энергия не выделяется, и газ не совершает полезной работы. Цилиндр в таком режиме функционирует как компрессор: поршень затрачивает энергию на сжатие воздуха в такте сжатия, а при последующем расширении лишь частично возвращает ее из-за неизбежных тепловых потерь и утечек. В результате чистая работа за цикл становится отрицательной, а среднее индикаторное давление P_i принимает нулевые значения.

Наиболее опасным последствием пропуска воспламенения является накопление несгоревшего метана в выпускном коллекторе. При превышении допустимого количества пропусков ECS автоматически переводит двигатель в дизельный режим. Кроме того, при аварийной остановке или отказе питания системы управления предусмотрена автоматическая вентиляция выпускного тракта для удаления скопившегося газа. Помимо взрывоопасности, пропуск воспламенения приводит к увеличению выбросов парниковых газов. Выброс несгоревшего метана является одним из основных недостатков двигателей X-DF, особенно выраженным на малых нагрузках, где сгорание становится менее стабильным [9, 10].

АНАЛИЗ ШТАТНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРОПУСКОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Штатная система контроля пропусков воспламенения двигателей типа X-DF реализована как составная часть системы управления двигателем ECS. Принцип ее работы схематично представлен на рис. 2, где показана логика преобразования измеряемых параметров в управляющее решение [11].

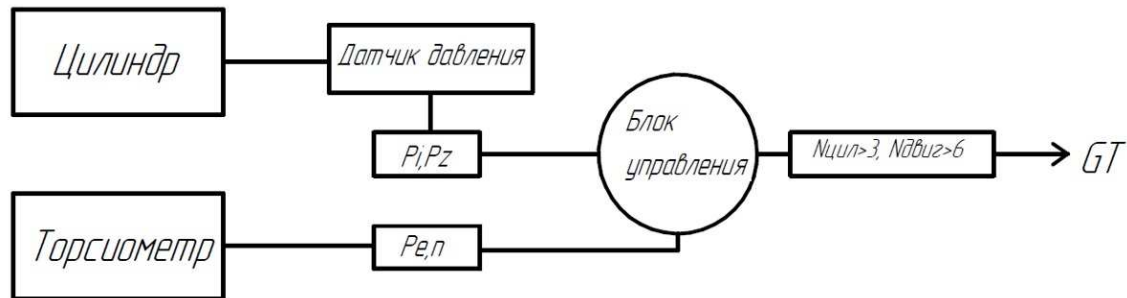


Рис. 2. Структурная схема системы обнаружения пропусков воспламенения

В основе диагностики лежит сравнение двух фундаментальных показателей работы цилиндра: среднего индикаторного давления P_i и среднего эффективного давления P_e [12].

Индикаторное давление рассчитывается интегрированием текущего давления в цилиндре по углу поворота коленчатого вала за рабочий цикл:

$$P_i = (1/V_h) \int p(\Phi) dV(\Phi), \quad (1)$$

где V_h — рабочий объем цилиндра,

$p(\Phi)$ — давление в цилиндре,

$dV(\Phi)$ — элементарное изменение объема.

Давление измеряется индивидуальными датчиками, установленными на каждом цилиндре.

Эффективное давление определяется по мощности на валу двигателя:

$$P_e = \frac{N_e \cdot 60}{V_h \cdot n \cdot i}, \quad (2)$$

где N_e — эффективная мощность двигателя,

n — частота вращения,

i — число цилиндров.

Мощность может измеряться непосредственно или рассчитываться по крутящему моменту [11].

В нормальном режиме работы выполняется соотношение:

$$P_i - P_e = P_{\text{мех}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{мех}}$ — среднее давление механических потерь, величина положительная и относительно стабильная для данного режима (обычно 1–2 бар).

При возникновении пропуска воспламенения характер протекающего в цилиндре процесса изменяется. Вследствие отсутствия сгорания топлива работа газов в цилиндре за рабочий цикл становится отрицательной, что объясняется затратами энергии на сжатие воздуха в такте сжатия и лишь частичным ее возвратом при последующем расширении из-за неизбежных тепловых потерь. Среднее эффективное давление сохраняет положительные значения благодаря работе остальных цилиндров. Возникающая аномальная разница между P_i и P_e , сопровождающаяся изменением знака, служит надежным диагностическим признаком пропуска воспламенения.

Система управления не реагирует на единичный пропуск воспламенения, а накапливает статистику за определенный интервал. Согласно исходной логике, используется окно в 6 рабочих циклов. Для каждого цилиндра ведется индивидуальный счетчик $N_{\text{цил}}$, а для двигателя в целом — общий счетчик $N_{\text{двиг}}$.

Условие срабатывания защиты при пропуске воспламенения записывается как

$$N_{\text{цил}} \geq 2 \text{ или } N_{\text{двиг}} \geq 5. \quad (4)$$

Дополнительным условием является отказ датчиков давления. При отказе одного датчика система вводит ограничение нагрузки, но оставляет двигатель в газовом режиме. При отказе двух и более датчиков выполняется немедленный переход на дизельный режим, поскольку балансировка цилиндров становится невозможной. Стоит отметить, что перед впрыском дизельного топлива двигатель должен совершить один полный цикл с целью удаления оставшихся продуктов несгоревшего метана.

Вероятность ложного срабатывания при случайных возмущениях можно оценить, если предположить, что вероятность ошибочной регистрации пропусков воспламенения в одном цикле равна p . Тогда вероятность Gas Trip за 6 циклов составит:

$$P_{trip} = 1 - P_{(0)} - P_{(1)} = 1 - (1 - p)^6 - 6p(1 - p)^5. \quad (5)$$

Для типичных значений $p = 0,2$ (что может соответствовать сильной качке) эта вероятность составляет около 0,35, то есть 35 % за 6 циклов, что неприемлемо много.

Эксплуатация выявила проблему ложных срабатываний при качке, когда синхронные колебания частоты вращения ошибочно интерпретировались как множественные пропуски воспламенения. В ноябре 2019 г. были изменены пороговые значения:

$$N_{цил} \geq 3 \text{ или } N_{двиг} \geq 6. \quad (6)$$

Вероятность ложного срабатывания при новых порогах:

$$P_{GT} = 1 - P_{(0)} - P_{(1)} - P_{(2)}, \quad (7)$$

где, P_{GT} — вероятность того, что произойдет Gas Trip, $P_{(0)}$, $P_{(1)}$, $P_{(2)}$ — вероятности, что за 6 циклов произойдет 0, 1 или 2 пропуска воспламенения. Используем формулу Бернулли для расчета вероятности $P_{(2)} = C_6^2 p^2 (1 - p)^4$. Для того же значения $p = 0,2$ получаем $P_{trip} \approx 0,1$, то есть снижение примерно в 3,5 раза. Однако это привело к увеличению времени реакции на реальную неисправность. Если пропуски воспламенения возникают с частотой r на один цилиндр, среднее время до срабатывания пропорционально порогу:

$$T \approx N_{цил} / r. \quad (8)$$

Таким образом, увеличение порога обнаружения пропусков воспламенения с 2 до 3 позволило снизить вероятность ложных GT при внешних возмущениях с 0,35 до 0,1, однако это означает, что за время накопления статистики в выпускной коллектор поступит на 50 % больше несгоревшего метана, что повышает риск детонации. Указанное обстоятельство делает целесообразным переход к исходным пороговым значениям $N_{цил} \geq 2$ или $N_{двиг} \geq 5$ для повышения безопасной эксплуатации судовой энергетической установки. Такой возврат возможен при условии низкой вероятности ложных срабатываний, что требует введения дополнительных алгоритмов дифференциальной диагностики.

Основные недостатки рассмотренной системы:

- 1) реактивный характер — система констатирует уже свершившийся пропуск воспламенения, но не пытается его предотвратить на начальной стадии;
- 2) отсутствие дифференциальной диагностики — система не отличает локальные неисправности от синхронных внешних возмущений, что и стало причиной ложных срабатываний при качке;
- 3) слепая фильтрация — повышение порогов снижает чувствительность к реальным пропускам, что потенциально опасно;
- 4) фиксированные пороги — не учитывают текущий режим работы, нагрузку, степень износа двигателя.

МЕТОДЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПРОПУСКОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДИАГНОСТИКИ

Проведенный анализ физической природы пропусков воспламенения и ограничений штатной системы контроля позволяет перейти к разработке методов, направленных на повышение устойчивости сгорания в газовом режиме и улучшение качества диагностики. Предлагаемые решения можно разделить на две группы: методы раннего обнаружения и дифференциальной диагностики, позволяющие отличать истинные пропуски воспламенения от внешних возмущений, и методы адаптивного управления параметрами рабочего процесса, направленные на предотвращение пропусков до их возникновения.

Методы дифференциальной диагностики

Ключевое отличие истинного пропуска воспламенения от ложных срабатываний, вызываемых качкой, заключается в характере распределения возмущений по цилиндрам. При качке, как было описано ранее, колебания нагрузки и частоты вращения действуют на двигатель синхронно, затрагивая одновременно все цилиндры. Изменения давления сгорания, индикаторного давления и других параметров происходят согласованно по всем цилиндрам с коэффициентом корреляции, близким к единице. При истинном пропуске, вызванном локальной неисправностью конкретного цилиндра, изменения носят локальный характер и проявляются преимущественно на одном или двух проблемных цилиндрах. Это фундаментальное различие может быть положено в основу дифференциального диагностического признака, который предлагается называть **коэффициентом синхронности**. Для его расчета необходимо располагать значениями некоторого параметра, характеризующего качество сгорания в каждом цилиндре за рабочий цикл. Наиболее информативным таким параметром является максимальное давление сгорания P_z , поскольку оно непосредственно отражает энергию, выделившуюся в цилиндре, и легко измеряется штатными датчиками давления. Альтернативой может служить значение индикаторного давления P_i или прирост частоты вращения после ВМТ, но эти параметры требуют более сложной обработки.

Предположим, что для каждого i -го цилиндра за данный цикл зарегистрировано среднее значение максимального давления сгорания P_z . Рассчитаем среднее значение по всем цилиндрам:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_z, \quad (9)$$

где n — число цилиндров,
 P_z — максимальное давление сгорания.

Затем определим среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}. \quad (10)$$

Коэффициент синхронности определим как отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению:

$$K_{\text{синх}} = \sigma/P. \quad (11)$$

Физический смысл этого коэффициента заключается в следующем. При синхронном изменении давления во всех цилиндрах (например, при качке) значения P_z изменяются пропорционально, их разброс относительно среднего остается малым, и коэффициент $K_{\text{синх}}$ принимает небольшие значения, характерные для нормальной работы (обычно 0,02–0,05). При возникновении локального пропуска воспламенения на одном цилиндре давление в этом цилиндре резко падает, в то время как в остальных остается нормальным. Это приводит к резкому росту среднеквадратического отклонения и, соответственно, увеличению $K_{\text{синх}}$ до значений 0,15–0,25 и более.

Рис. 3. Отношение времени протекания процессов сгорания к давлениям P_z и P_c

Таблица 1

Анализ событий, показанных на рис. 3

Событие	Описание	Реакция системы
1 (7 ч 40 мин)	Падение P_z 2-го цилиндра до значения 83 бара	Не реагирует
2 (7 ч 42 мин)	Синхронное падение P_z и P_c , система управления не реагирует на изменения и считает это как ложное возмущение во время качки	Не реагирует
3 (7 ч 44 мин)	Падение P_z 5-го цилиндра до значения 86 бар	Не реагирует
4 (7 ч 46 мин)	Падение P_z 2, 3 и 5-го цилиндров до значения 70 бар, при среднем давлении 130 бар	Оповещение о пропуске воспламенения 5-го цилиндра. Оповещение о пропусках воспламенения в ≥ 3 цилиндрах. Gas Trip, переход на дизельное топливо
5 (7 ч 46 мин)	Работа на дизельном топливе	Система безопасности перевела двигатель в режим работы на дизельном топливе
6 (7 ч 54 мин)	Переход на газовое топливо	Система АПСИЗ в нормальном режиме, работа двигателя стабильна, перевод оператором на газовое топливо

При пропусках воспламенения во 2-м и 4-м событиях возникает ярко выраженный провал, резко увеличивающий коэффициент синхронности. Для практической реализации дифференциальной диагностики предлагается описанный ниже алгоритм, дополняющий штатную систему балансировки давления цилиндров.

Шаг 1. В каждом рабочем цикле для каждого цилиндра регистрируется максимальное давление сгорания P_z или, если доступно, значение P_i .

Шаг 2. Рассчитываются среднее значение P_z и коэффициент синхронности $K_{\text{синх}}$ для данного цикла.

Шаг 3. Если штатная система обнаруживает признаки пропуска воспламенения (падение P_i ниже порога) для какого-либо цилиндра, но при этом $K_{\text{синх}}$ остается ниже критического значения $K_{\text{крит}}$, событие классифицируется как ложное срабатывание, вызванное внешним синхронным возмущением, и не засчитывается в счетчик пропусков воспламенения.

Шаг 4. Если штатная система обнаруживает признаки пропусков и при этом $K_{\text{синх}}$ превышает $K_{\text{крит}}$, событие классифицируется как истинный локальный пропуск воспламенения и учитывается в счетчике для принятия решения о Gas Trip.

Шаг 5. Критическое значение $K_{\text{крит}}$ должно быть определено эмпирически для конкретного типа двигателя и режима работы. Ориентировочно может быть принято в диапазоне 0,07–0,10.

Эффективность такого подхода может быть оценена следующим образом. Пусть при качке амплитуда синхронных колебаний давления составляет ΔP . Тогда относительное изменение давления $\delta = \Delta P/P$ может достигать 0,1–0,15. Однако поскольку это изменение синхронно по всем цилиндрам, среднеквадратическое отклонение σ остается малым — оно определяется лишь разбросом характеристик цилиндров и погрешностью измерений. При локальном пропуске это изменение затрагивает только один цилиндр, что приводит к резкому росту σ . Таким образом, коэффициент $K_{\text{синх}}$ является надежным дискриминатором, позволяющим разделить эти два типа событий.

Адаптивное управление параметрами пилотного впрыска

Предлагаемая система адаптивного управления параметрами пилотного впрыска основана на непрерывном мониторинге стабильности сгорания и индивидуальной коррекции угла опережения и длительности впрыска для каждого цилиндра [13, 14]. В качестве критерия для оценки состояния цилиндра используется коэффициент вариации максимального давления сгорания, рассчитываемый по скользящему окну из 10–20 последовательных циклов:

$$COV_p = \sigma_p / \bar{P}, \quad (12)$$

где COV — Coefficient of Variation, коэффициент вариации,

σ_p — среднеквадратическое отклонение максимального давления,

$\bar{P}$ — среднее значение максимального давления сгорания за период наблюдения.

Этот показатель начинает расти задолго до возникновения первого пропуска воспламенения, что позволяет перейти от реактивного детектирования к предиктивному предотвращению пропуска воспламенения. На основе полученных данных с системы мониторинга главного двигателя во время пропуска воспламенения был составлен график (рис. 4), иллюстрирующий работу блока управления топливоподачи при нагрузке 70 %.

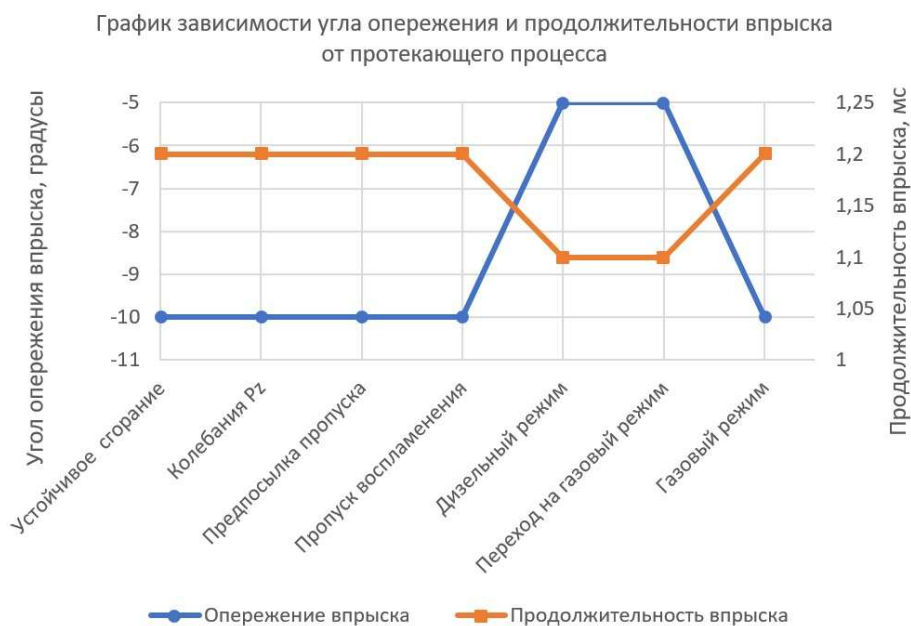


Рис. 4. Реальные параметры пилотного впрыска в зависимости от протекания процесса сгорания в цилиндре при нагрузке 70 %

Логика адаптивной коррекции, представленная на рис. 5, разработана на основе анализа реальных эксплуатационных данных и полностью соответствует физическим закономерностям процесса сгорания.

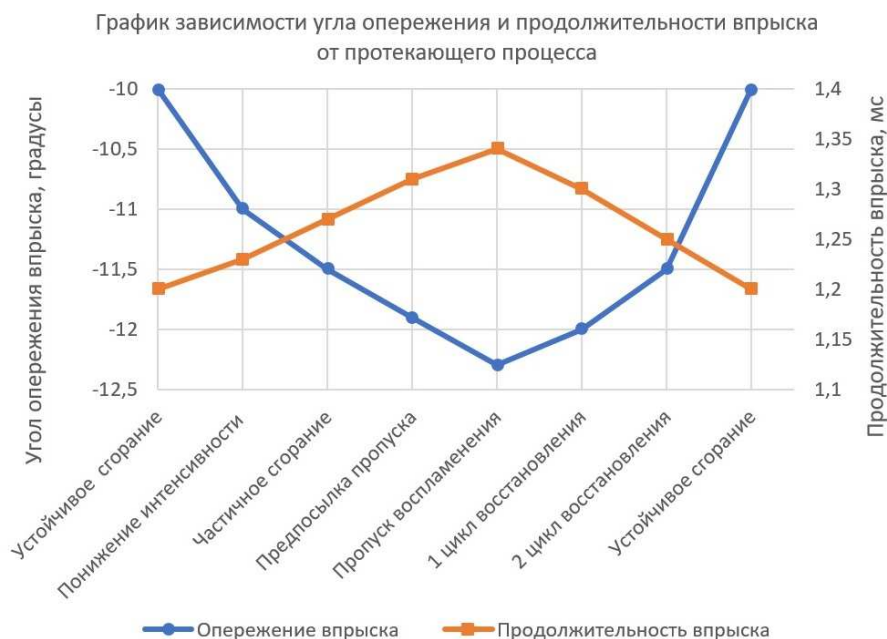


Рис. 5. Предложенная концептуальная коррекция параметров пилотного впрыска в зависимости от протекания процесса сгорания в цилиндре при нагрузке в 70 %

Как следует из рис. 5, при ухудшении сгорания угол опережения последовательно увеличивается (становится более отрицательным): от $-10,0^\circ$ при нормальной работе до $-12,5^\circ$ при зафиксированном пропуске воспламенения. Одновременно длительность впрыска возрастает от 1,20 мс до 1,42 мс. Такое разнонаправленное изменение параметров физически обосновано: увеличение угла опережения компенсирует растущую задержку воспламенения, а увеличение длительности повышает энергию пилотной порции, обеспечивая более надежный поджиг основной смеси [8, 9]. При нормальной работе, когда $COV_p < 0,03$, система удерживает параметры на базовых значениях $-10,0^\circ$ и 1,20 мс, соответствующих данным при нагрузке 70 %. При повышении COV_p до 0,03–0,05, что классифицируется как состояние слабого сгорания, система увеличивает угол опережения до $-11,2^\circ$ и длительность до 1,23 мс. Если нестабильность сохраняется и COV_p достигает 0,05–0,07 (частичное сгорание), коррекция усиливается: угол опережения устанавливается на $-11,5^\circ$, длительность — на 1,28 мс. При дальнейшем росте COV_p до 0,07–0,09 (предвестник пропуска) параметры становятся $-11,8^\circ$ и 1,35 мс соответственно. В том случае, если, несмотря на принятые меры, происходит пропуск воспламенения и COV_p превышает 0,09, система переходит в режим максимальной защиты с углом $-12,5^\circ$ и длительностью 1,42 мс, что соответствует увеличению энергии пилотной порции примерно на 18 % относительно базового уровня. Важно отметить, что значения параметров в этом состоянии ($-12,5^\circ$, 1,42 мс) являются логическим продолжением ряда, заданного предыдущими состояниями, и обеспечивают максимально ранний впрыск с максимальной энергией для гарантированного восстановления сгорания.

После того как пропуск воспламенения зафиксирован и отработан, система не возвращается к базовым настройкам мгновенно, а снижает параметры ступенчато, контролируя реакцию цилиндра. В первом цикле восстановления, когда COV_p снижается до 0,05–0,07, угол устанавливается на $-11,5^\circ$, длительность — на 1,38 мс. Во втором цикле восстановления, при снижении COV_p до 0,03–0,05, параметры составляют $-10,8^\circ$ и 1,28 мс. И только после устойчивого возвращения (COV_p ниже 0,03) система окончательно возвращает базовые настройки $-10,0^\circ$ и 1,20 мс. Такая ступенчатая нормализация предотвращает перерегулирование и исключает ситуацию, когда резкое изменение параметров само становится причиной новой нестабильности.

Предложенный алгоритм реализуется индивидуально для каждого цилиндра, что позволяет учитывать их индивидуальные особенности: разброс характеристик форсунок, неравномерность распределения газа по цилиндрам, локальные отклонения в компрессии. При этом все коррекции вводятся плавно, с ограничением скорости изменения параметров, чтобы не создавать дополнительных возмущений в работе двигателя. Пороговые значения COV_p могут уточняться по мере накопления статистики для конкретного двигателя, что позволяет адаптировать систему к его индивидуальным особенностям и степени износа.

Управление коэффициентом избытка воздуха в переходных режимах

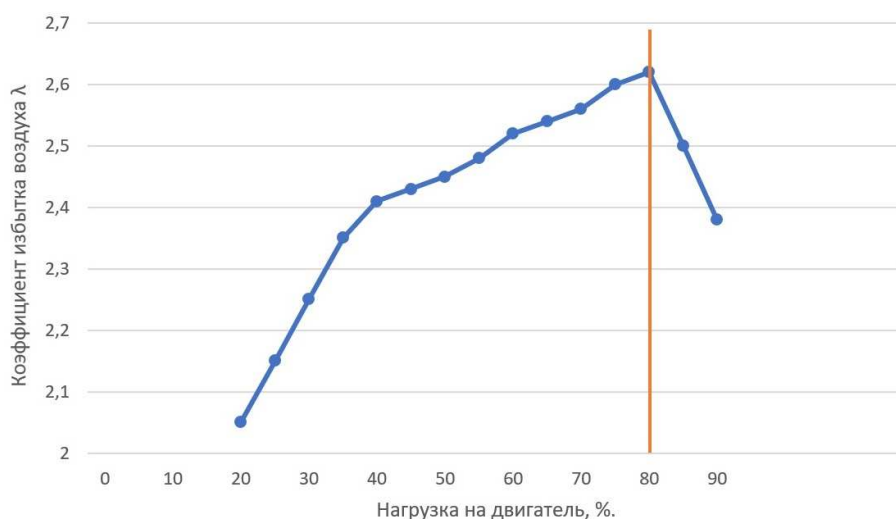


Рис. 6. Зависимость коэффициента избытка воздуха от нагрузки

График зависимости коэффициента избытка воздуха от нагрузки, представленный на рис. 6, иллюстрирует стратегию управления рабочим процессом в газовом режиме двигателя X-DF [2, 3]. Поскольку устойчивый переход и работа на газе обеспечиваются при нагрузке свыше 20 %, в области малых нагрузок система управления целенаправленно снижает λ до 2,0–2,1, работая на более богатых смесях, чтобы гарантировать воспламенение при пониженных давлении и температуре в конце сжатия. В диапазоне средних нагрузок λ плавно повышается до 2,4–2,6, достигая наиболее оптимального режима работы. Из-за обеднения смеси температура сгорания уменьшается, тем самым, по механизму Зельдовича, снижая выбросы NO_x и риски неконтролируемой детонации топливовоздушной смеси. В области высоких нагрузок λ достигает максимального значения 2,65 и начинает постепенно снижаться. Это связано с ограничением производительности турбокомпрессора. Вертикальная линия на рисунке обозначает границу, после которой величина λ в установившемся режиме определяется уже возможностями системы наддува. Таким образом, на высоких нагрузках двигатель работает в зоне, где дальнейшее увеличение подачи топлива сопровождается уменьшением воздушного избытка, а запас по наддуву становится ограничивающим фактором устойчивости рабочего процесса.

Такая стратегия управления наддувом создает уязвимость в переходных режимах, особенно при резких сбросах нагрузки. При качке или резких изменениях нагрузки возникает рассогласование между подачей воздуха и газа из-за инерционности турбокомпрессора. В момент резкого сброса нагрузки давление наддува остается высоким, а подача газа уже уменьшена системой регулирования. В результате λ резко возрастает, выходя за пределы устойчивого воспламенения, что и провоцирует пропуск. Для решения этой проблемы предлагается дополнить штатную систему предиктивным управлением λ , основанным на мониторинге скорости изменения нагрузки.

Пусть $N = dN/dt$ — скорость изменения нагрузки, отрицательная при сбросе, где N — нагрузка, dN — изменение нагрузки за малый промежуток времени, dt — малый промежуток времени. Если $|N| > N_{\text{крит}}$ система распознает ситуацию как резкий сброс нагрузки и переходит в специальный режим защиты от обеднения.

В этом режиме реализуются следующие меры.

1. Плавное закрытие газовых клапанов. Вместо мгновенного уменьшения подачи газа пропорционально падению нагрузки длительность открытия газовых клапанов снижается по экспоненциальному закону:

$$\tau_{GAV}(t) = \tau_{GAV} e^{-t/T}, \quad (13)$$

где T — постоянная времени, выбираемая таким образом, чтобы снижение подачи газа соответствовало инерционному снижению давления наддува. Оптимальное значение T составляет 2–3 секунды для малооборотных судовых двигателей.

2. Форсирование пилотного впрыска. На время переходного процесса (5–10 циклов) увеличивается длительность пилотного впрыска для всех цилиндров:

$$\tau_{\text{впрыска}} = \tau_{\text{нач.впрыска}} \cdot (1 + \Upsilon), \quad (14)$$

где $\Upsilon = 0,1-0,15$ — коэффициент форсирования. Это повышает энергию воспламенения и компенсирует возможное обеднение смеси.

3. Временное смещение рабочей точки по λ . Система на короткое время (до стабилизации режима) допускает работу при несколько более низком λ , чем предписано базовой стратегией, но в пределах, исключающих детонацию.

Эффективность предлагаемого подхода иллюстрируется на рис. 7.

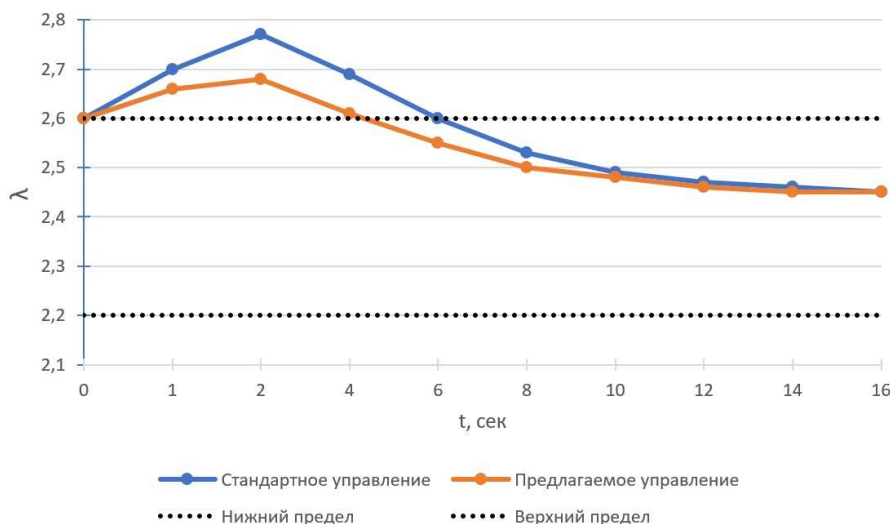


Рис. 7. Зависимость λ от t при резком сбросе нагрузки

Рис. 7 показывает изменение коэффициента избытка воздуха λ во времени при снижении нагрузки двигателя с 75 % до 60 % в газовом режиме. При стандартном алгоритме управления возникает кратковременный выброс λ выше рекомендуемой области 2,2–2,6, что обусловлено рассогласованием между быстрым уменьшением подачи газа и более медленной перестройкой воздушного тракта. Основными причинами этого являются время реакции газовых клапанов, инерционность турбокомпрессора, запаздывание изменения давления наддувочного воздуха и динамика работы перепускного клапана турбокомпрессора. При предлагаемом алгоритме величина выброса λ уменьшается за счет более согласованного управления подачей газа и воздухом: ограничения скорости закрытия газовых клапанов, корректировки пилотного впрыска и более плавного управления перепускным клапаном. Это позволяет сократить время пребывания смеси в обедненной области и уменьшить вероятность пропуска воспламенения.

Интеграция предложенных методов в штатную систему

Предложенные методы не требуют замены штатной системы управления, а могут быть реализованы в виде дополнительного программного модуля, работающего параллельно с ECS и использующего те же входные сигналы от штатных датчиков. Структурная схема такой интегрированной системы представлена на рис. 8.

Усовершенствованная логика работает следующим образом. Сигналы от штатных датчиков поступают одновременно в ECS и дополнительный модуль. Модуль рассчитывает коэффициент синхронности $K_{\text{синх}}$ и коэффициент вариации COV_p , анализирует динамику изменения нагрузки и при обнаружении признаков, описанных выше, формирует корректирующие сигналы, которые передаются в ECS через штатные интерфейсы (например, по шине CAN или Modbus). ECS, получив эти сигналы, модифицирует параметры управления для отдельных цилиндров или для двигателя в целом. При этом все штатные защитные функции остаются активными и имеют высший приоритет. Такой подход позволяет повысить надежность диагностики и устойчивость сгорания без вмешательства в штатное программное обеспечение и без замены аппаратной части, что особенно важно для уже эксплуатирующихся судов с двигателями X-DF.

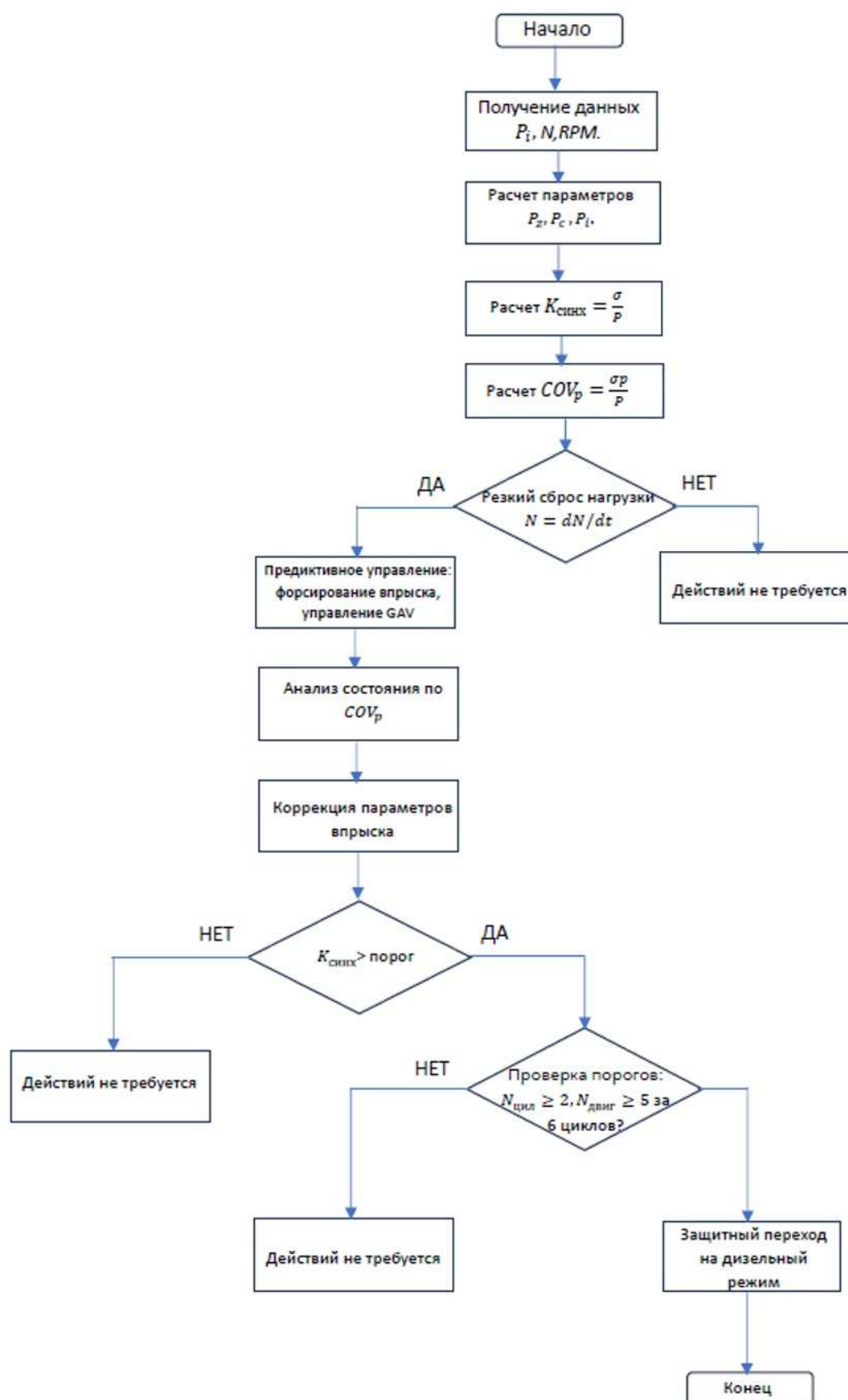


Рис. 8. Блок-схема усовершенствованной системы контроля пропусков воспламенения

ОЦЕНКА ОЖИДАЕМОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Предложенные методы позволяют достичь следующих улучшений по сравнению со штатной системой.

1. Снижение количества ложных срабатываний. За счет использования коэффициента синхронности $K_{\text{синх}}$ для фильтрации событий, вызванных качкой, количество ложных переходов с газового режима на дизельный может быть снижено на 70–80 % по сравнению с системой после обновления программного обеспечения 2019 г. При этом чувствительность к реальным пропускам воспламенения сохраняется на исходном уровне.

2. Увеличение времени упреждающего реагирования. Мониторинг коэффициента вариации COV_p позволяет обнаружить приближение к зоне неустойчивости за 10–20 циклов до возникновения первого пропуска. Это дает системе время для плавной коррекции параметров и предотвращения срыва сгорания.

3. Снижение количества пропусков воспламенения. Адаптивная коррекция параметров пилотного впрыска при обнаружении роста неустойчивости позволяет предотвратить до 50–60 % потенциальных пропусков воспламенения, которые могли бы возникнуть без такой коррекции.

4. Уменьшение выбросов метана. Предотвращение пропусков непосредственно снижает количество несгоревшего метана, поступающего в выпускной тракт и атмосферу.

5. Снижение нагрузки на валопровод. Предотвращение резких перепадов крутящего момента, вызываемых пропусками воспламенения, уменьшает амплитуду крутильных колебаний и снижает усталостные нагрузки на коленчатый вал и гребной вал.

Количественная оценка эффективности может быть выполнена на основе математического моделирования или по результатам опытной эксплуатации. В табл. 2 приведены сравнительные характеристики штатной системы после обновления программного обеспечения 2019 г. и предлагаемой системы для типичных условий эксплуатации.

Таблица 2

Сравнение эффективности различных систем контроля пропусков воспламенения

Показатель	Штатная система	Предлагаемая система
Пороги срабатывания (цилиндр/двигатель)	3/6 за 6 циклов	2/5 за 6 циклов + дифференциальная диагностика
Вероятность ложного GT при качке	0,1	0,02
Среднее время реакции на развивающуюся неисправность циклов	3–4	10–15 (предупреждение оператора), 2–3 GT
Возможность предиктивного предотвращения пропуска воспламенения	Отсутствует	Вероятность до 60 %
Индивидуальная коррекция параметров впрыска по цилиндрам	Присутствует для балансирования рабочего давления в цилиндрах, но не эффективна при пропусках	Присутствует (изменения угла впрыска пилотного топлива + длительность)
Дифференциальная диагностика	Отсутствует	Присутствует (добавлен коэффициент синхронности $K_{\text{синх}}$)
Предиктивное управление при резких сбросах нагрузки	Отсутствует	Присутствует (плавное закрытие GAV + форсирование пилотного впрыска)
Использование штатных датчиков мониторинга	Присутствует	Присутствует
Необходимость изменения аппаратной части	Не требуется	Не требуется

Таким образом, предложенные методы позволяют существенно повысить надежность работы двигателей типа X-DF в газовом режиме без затрат на модернизацию оборудования, только за счет совершенствования алгоритмов обработки сигналов и управления. Особенно важно, что эти методы сохраняют и даже повышают чувствительность к реальным опасным отказам, одновременно исключая ложные срабатывания при эксплуатационных возмущениях, что полностью соответствует целям настоящего исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования предложены методы повышения надежности работы двухтопливных двигателей WinGD X-DF в газовом режиме путем совершенствования системы диагностики и предотвращения пропусков воспламенения. Проведен анализ физической природы пропусков воспламенения. Установлено, что ключевым параметром, определяющим устойчивость сгорания, является коэффициент избытка воздуха λ . Показано, что при резких сбросах нагрузки из-за инерционности турбокомпрессора возникает временное рассогласование между подачей воздуха и газа, приводящее к критическому росту λ до 2,7 и возникновению пропусков. Исследован механизм ложных срабатываний штатной системы при качке. Выявлено, что синхронные колебания частоты вращения ошибочно интерпретируются как множественные пропуски. Предложен метод дифференциальной диагностики на основе коэффициента синхронности $K_{\text{синх}}$, позволяющий отличать истинные пропуски от синхронных внешних возмущений. Предложена система адаптивной коррекции параметров пилотного впрыска на основе мониторинга коэффициента вариации COV_p . Разработана таблица коррекции, предусматривающая увеличение угла опережения и возрастание длительности впрыска при ухудшении сгорания. Для защиты от пропусков воспламенения в переходных режимах предложен алгоритм предиктивного управления с плавным закрытием газовых клапанов и форсированием пилотного впрыска, ограничивающий пиковые значения λ . Предложена структурная схема усовершенствованной системы в виде дополнительного модуля, работающего параллельно со штатной ECS и использующего те же сигналы датчиков. Все решения могут быть реализованы обновлением программного обеспечения, без изменения аппаратной части. Практическая значимость заключается в возможности модернизации действующего флота, повышении взрывобезопасности, снижении выбросов метана и сохранении экономических преимуществ газового топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ REFERENCES

1. Пунда А.С. Исследование рабочего процесса двухтактных двухтопливных судовых дизелей для крупнотоннажных морских судов / А.С. Пунда, Ю.Г. Гурьев // Двигателестроение. — 2018. — № 2(272). — С. 29–34. — EDN XRF SOL. = Punda A.S. Issledovanie rabocheho protsessa dvukhtaknykh dvukhtoplivnykh sudovykh dizelei dlya krupnotonnazhnykh morskikh sudov [Investigation of the operating process of two-stroke dual-fuel marine diesel engines for large-tonnage vessels] / A.S. Punda, Yu.G. Gur'ev // Dvigatelistroenie [Engine Building]. — 2018. — No. 2(272). — P. 29–34. EDN XRF SOL.
2. Choi M. Effects of intake air conditions and micro-pilot injection timing on micro-pilot dual fuel combustion characteristics / M. Choi, S. Park // Energy Conversion and Management. — 2022. — Vol. 254. — P. 115281. — DOI 10.1016/j.enconman.2022.115281.
3. Yu H. The impact of scavenging air state on the combustion and emission performance of marine two-stroke dual-fuel engine / H. Yu, J. Gao, P. Zhang, F. Ju. Han et al. // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14, No. 1. — P. 15776. — DOI 10.1038/s41598-024-66826-z. — EDN PQAFDY.
4. Nsaif O. Reducing methane emissions from lean burn natural gas engines with prechamber ignited mixing-controlled combustion / O. Nsaif, S. Kokjohn, R. Hessel, A. Dempsey // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2024. — Vol. 146, No. 6. — DOI 10.1115/1.4064454. — EDN YHBHMF.
5. Gan J. A new method of intelligent fault diagnosis of ship dual-fuel engine based on instantaneous rotational speed / J. Gan, H. Jin, Q. Shang, C. Sheng // Journal of Marine Science and Engineering. — 2024. — Vol. 12, No. 11. — P. 2046. — DOI 10.3390/jmse12112046.
6. Kiouranakis K. Heat release behavior in a natural gas lean-burn SI marine engine: Exploring the impact of bowl-in and squish combustion on performance and emissions / K. Kiouranakis, P. de Vos, R. Willems, H. Sapra, R. Geertsma. — [Электронный ресурс] URL: <https://ssrn.com/abstract=5211263>.
7. Xia Ch. Experimental study of stratified lean burn characteristics on a dual injection gasoline engine / Ch. Xia, T. Zhao, Ju. Fang, L. Zhu, Zh. Huang // Frontiers in Energy. — 2022. — Vol. 16, No. 6. — P. 900–915. — DOI 10.1007/s11708-021-0812-6. — EDN WPCOWK.
8. Schleef K. Combustion control strategies for dual-fuel marine engines operated with fluctuating LNG qualities / K. Schleef, B. Henke, S. Cepelak, M. Glauner et al. // SAE Technical Paper Series. SAE International, 2022. — DOI 10.4271/2022-01-1058.
9. Liu H. Numerical investigation on performance optimization and GHG emissions reduction of marine two-stroke natural gas dual-fuel engines / H. Liu, D. Lu, H. Shen, L. Chang, H. Gan // Applied Thermal Engineering. — 2026. — DOI 10.1016/j.applthermaleng.2026.129768.
10. Gavrilov V. Spontaneous combustion of pilot fuel in dual-fuel engine / V. Gavrilov, D. Bogachev, V. Medvedev // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2021. — Vol. 1258. — P. 361–374. — DOI 10.1007/978-3-030-57450-5_31. — EDN UWKKCW.
11. Jung D. Development of misfire detection algorithm using quantitative FDI performance analysis / D. Jung, L. Eriksson, E. Frisk, M. Krysander // Control Engineering Practice. — 2015. — Vol. 34. — P. 49–60. — DOI 10.1016/j.conengprac.2014.10.001.

12. Патент на изобретение № 2774129. Система автоматического выбора топливных режимов для судовых двухтопливных двигателей внутреннего сгорания: заявл. 23.11.2021, опубл. 15.06.2022, БИ № 17 / А.И. Епихин; патентообладатель ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова». — EDN BCBTUG. = Patent for invention No. 2774129. Automatic fuel selection system for marine dual-fuel internal combustion engines: appl. 23.11.2021, publ. 15.06.2022, bul. No. 17 / A.I. Epikhin; patentee Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Admiral F.F. Ushakov State Maritime University". — EDN BCBTUG.
13. Jin W. Performance optimization and knock investigation of marine two-stroke pre-mixed dual-fuel engine based on RSM and MOPSO / W. Jin, H. Gan, Y. Cong, G. Li // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10, No. 10. — P. 1409. — DOI 10.3390/jmse10101409.
14. Guo H. A numerical study on the pilot injection conditions of a marine 2-stroke lean-burn dual fuel engine / H. Guo, S. Zhou, J. Zou, M. Shreka // Processes. — 2020. — Vol. 8, No. 11. — P. 1396. — DOI 10.3390/pr8111396.

Статья поступила в редакцию 12.05.2026.

Принята к публикации 31.05.2026.