

УДК 62-734

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СУДОВЫХ ЧЕТЫРЕХТАКТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Самчук Алексей Сергеевич¹, техник

e-mail: alexeisamchuk1@gmail.com

Ивановская Александра Витальевна¹, доцент, кандидат технических наук, доцент

e-mail: invkerch@yandex.ru

¹ Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к диагностике судовых четырехтактных дизелей на основе интеллектуальных методов обработки данных. Выполнен анализ существующих разработок в данной области, включая исследования российских и зарубежных авторов. Проведено сравнение точности традиционных методов диагностики с подходами, основанными на интеллектуальном анализе данных. Обоснована необходимость разработки комплекса интеллектуальной системы диагностики, позволяющей повысить достоверность оценки технического состояния и точность прогнозирования остаточного ресурса главных и вспомогательных судовых дизелей

Ключевые слова: судовой четырехтактный дизель, техническая диагностика, интеллектуальный анализ данных, нечеткая логика, экспертные системы, прогнозирование ресурса, обработка сигналов.

INTELLIGENT DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR MARINE FOUR-STROKE DIESEL ENGINES: IMPROVING THE EFFICIENCY OF TECHNICAL CONDITION ASSESSMENT AND PREDICTING RESIDUAL RESOURCE

Alexey S. Samchuk¹, The technician

e-mail: alexeisamchuk1@gmail.com

Alexandra V. Ivanovskaya¹, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: invkerch@yandex.ru

¹Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russia

Abstract. The article discusses modern approaches to the diagnostics of marine four-stroke diesel engines based on intelligent data processing methods. It analyzes existing developments in this field, including research by Russian and foreign authors. The article compares the accuracy of traditional diagnostic methods with approaches based on intelligent data analysis. It substantiates the need to



develop an intelligent diagnostic system that can improve the accuracy of technical condition assessment and the prediction of the remaining resource of main and auxiliary marine diesel engines.

Keywords: marine four-stroke diesel, technical diagnostics, intelligent data analysis, fuzzy logic, expert systems, resource forecasting, signal processing.

Условия эксплуатации судовых дизелей принципиально отличаются от условий работы стационарных энергетических установок. Бортовая, килевая и вертикальная качка, переменные влажность, температура и давление окружающей среды, необходимость частых маневров со сменой нагрузочных режимов, переход на различные сорта топлив — все эти факторы создают объективную неопределенность и неполноту информации о техническом состоянии главных и вспомогательных двигателей [4].

Анализ эксплуатационных потерь показывает, что до 90 % всех отказов судового оборудования приходится на главные дизели и обслуживающие их системы [4]. Это определяет актуальность совершенствования методов диагностики, способных обеспечить достоверную оценку текущего состояния и прогнозирование остаточного ресурса в условиях нестабильности эксплуатационных факторов.

Целью настоящей работы является обоснование подхода к повышению эффективности оценки технического состояния судовых четырехтактных дизелей за счет интеллектуальной обработки данных с измерительных приборов и прогнозирования остаточного ресурса на основе современных методов анализа информации.

1. Анализ существующих методов диагностики судовых дизелей

1.1 Традиционные подходы к оценке технического состояния

Исторически сложившиеся методы диагностики судовых дизелей базируются на измерении ограниченного набора параметров и сравнении их с эталонными значениями. Еще в начале 1980-х годов был предложен способ оценки технического состояния, основанный на измерении температуры в зоне верхнего пояса цилиндровой втулки с последующим определением отклонения от эталонного значения [3]. Однако практическое использование такого подхода показало его ограниченность: изменение теплонапряженности цилиндро-поршневой группы может быть вызвано как ухудшением собственно технического состояния этой группы, так и нарушением воздухообеспечения цилиндра, то есть изменением коэффициента избытка воздуха при сгорании.

Дальнейшее развитие традиционных методов привело к пониманию необходимости учета большего числа параметров. В работах Толщина В.И., Минаева А.Ю., Зяброва В.А. (МГАВТ) предложена система диагностики воздухообеспечения судового четырехтактного дизеля, позволяющая контролировать в реальном времени фактическое состояние компрессора и запас по помпажу. В основу расчета надежности положен усредненный показатель теплонапряженности по критерию Овсянникова [2].

Значительный пласт исследований посвящен анализу индикаторных диаграмм. В работах Мащенко В.Ю. и Гаврилова В.В. рассматривается точность регистрации индикаторной диаграммы для диагностики работоспособности поршневых колец и качества запорных поверхностей клапанов механизма газораспределения. Авторы предлагают диагностировать степень износа этих деталей по исследованию зависимости текущего показателя политропы сжатия, считая допустимым значение не менее 1.33 [6].

Тепловые методы диагностики развиваются в исследованиях Безюкова О.К. и Шаршавина С.В., где на примере клапанного механизма показана возможность систематизации поиска неисправностей путем обработки и анализа инфракрасных тепловых изображений элементов двигателя. Эксперименты на дизеле 4Ч 8,5/11 выявили



зоны, тепловое состояние которых контрастирует на фоне идентичных деталей других цилиндров — например, температура патрубка выхлопного коллектора неисправного цилиндра оказалась на 40-50 % ниже по сравнению с остальными [5].

1.2 Исследования в области интеллектуальной диагностики

Среди российских исследователей, работающих в направлении интеллектуализации диагностики судовых дизелей, следует отметить Надеева А.И., Буй Хай Нгока и Свирипова Ф.В. В их работах обосновывается целесообразность использования аппарата нечеткой логики при разработке баз знаний и механизмов вывода экспертных систем. Предложенная модель экспертной системы учитывает объективно существующую неопределенность и неполноту информации об объекте в условиях морской эксплуатации [4].

Епихин А.И., Кондратьев С.И. и Хекерт Е.В. предложили систему диагностики судовых двигателей на основе вейвлет анализа и сканирования изображений с использованием программируемых логических интегральных схем. Вейвлет-пакетная декомпозиция позволяет проводить локальный частотно-временной анализ, последовательно уточняя сигнал на различных масштабах, что дает преимущество в точности диагностики при различных уровнях шумов [1].

Зарубежные исследования также демонстрируют высокую эффективность подобных подходов. Так, в работе R. Varbanets и соавторов разработана портативная система параметрической диагностики реального времени, использующая комбинацию датчика давления газов в рабочем цилиндре и виброакустического датчика, что расширяет диагностические возможности в эксплуатационных условиях [7].

Хорватские исследователи из Сплитского университета представили результаты виртуальной модели пропульсивного комплекса, используемой для диагностики и прогнозирования потенциальных незапланированных остановок системы. Эти системы интегрируются с системами управления техническим обслуживанием, автоматически генерируя наряды на работы для устранения выявленных проблем.

2. Сравнительный анализ точности традиционных и интеллектуальных методов диагностики

Для оценки эффективности различных подходов к диагностике судовых дизелей необходимо рассмотреть их точность и достоверность анализа технического состояния.

Традиционные методы основаны на сравнении параметров со значениями с максимально допустимыми и подразделяются на следующие методы:

- Метод теплотрирования — данный позволяет выявить отклонения в параметрах, но не дифференцирует причины их изменений. Так, например повышение теплонапряженности может быть следствием как износа цилиндро-поршневой группы, так и нарушений в системе воздухообеспечения [3];
- Анализ индикаторных диаграмм — точность метода зависит от правильного определения положения ВМТ и погрешности в ее определении приводят к существенным ошибкам в расчете индикаторной мощности и показателя политропы [7];
- Тепловизионный контроль — данный метод эффективен для обнаружения отклонения температуры относительно всего двигателя, однако количественная интерпретация результатов требует учета множества различных факторов. [5].

Методы на основе интеллектуального анализа данных демонстрируют более высокие точностные характеристики:

- Нечеткие экспертные системы — позволяют обрабатывать качественную и неточную информацию, характерную для условий морской эксплуатации. Лингвистические переменные типа «высокая температура», «пониженное давление» и нечеткие правила



вывода обеспечивают более адекватное описание связей между признаками и диагнозами [4];

- Вейвлет-анализ в комбинации с классифицирующими алгоритмами — обладает преимуществом в точности диагностики при различных уровнях шумов, поскольку много масштабное разложение сигнала позволяет выделять информативные компоненты на фоне помех [1];

- Методы анализа множества последовательных рабочих циклов — использование дисперсионной оценки отклонений основных параметров и разработанного критерия СИ (cycle irregularity index) позволяет оценивать неравномерность работы двигателя и прогнозировать развитие неисправностей на ранней стадии [7].

Количественное сравнение точности методов представлено в таблице 1, составленной на основе анализа литературных данных.

Таблица 1 — Сравнительная характеристика точности методов диагностики судовых дизелей

Метод диагностики	Объект диагностики	Точность/Достоверность	Ограничения
Теплометрирование цилиндровых втулок	Цилиндро-поршневая группа	Качественная оценка	Не дифференцирует причины отклонений
Анализ индикаторных диаграмм (традиционный)	Рабочий процесс в целом	Зависит от точности измерений	Чувствителен к погрешностям синхронизации
Тепловизионный контроль	Клапанный механизм, выпускной тракт	Выявление аномалий с контрастом 40-50%	Полуколичественный метод
Экспертные системы на нечеткой логике	Комплексная оценка	Повышение обоснованности решений	Требует формализации знаний экспертов
Вейвлет-анализ	Различные системы	Высокая при различных уровнях шума	Требует обучающих выборок
Параметрическая диагностика с анализом цикловой неравномерности	Топливная аппаратура, газораспределение	Количественная оценка неравномерности	Требует высокоскоростных каналов сбора данных

Таким образом, методы, основанные на интеллектуальной обработке данных, обеспечивают более высокую достоверность диагностики за счет учета многомерных связей между параметрами, возможности работы с нечеткой информацией и выделения информативных признаков на фоне помех.

Проведенный анализ позволяет сформулировать основные требования к перспективной системе диагностики судовых четырехтактных дизелей и обосновать необходимость

разработки интеллектуального комплекса, интегрирующего различные методы обработки данных.

Специфика морской эксплуатации создает ряд объективных трудностей для традиционных систем диагностики:

- нестационарность режимов работы, связанная с маневрированием, волнением, изменением загрузки судна;
- неопределенность и неполнота информации о текущем состоянии вследствие ограниченного набора штатных измерительных приборов;
- необходимость учета влияния внешних условий (температура забортной воды, забортного воздуха, влажность) на параметры рабочего процесса;
- работа на различных сортах топлив с меняющимися физико-химическими характеристиками [4].

В этих условиях традиционные методы, основанные на сравнении с жесткими эталонными значениями, не могут обеспечить требуемую достоверность диагностики.

Переход от жёстко регламентированных планово-предупредительных ремонтов к гибкой стратегии, основанной на реальном техническом состоянии агрегатов, позволяет существенно снизить вероятность внезапных отказов. Благодаря применению многомерных адаптивных моделей, учитывающих изменчивость внешних условий и вариативность характеристик топлива, достигается повышение достоверности прогнозных оценок. В совокупности это ведёт к оптимизации операционных затрат, сокращению простоев и предотвращению аварийных ситуаций.

Заключение

Результаты проведённого исследования свидетельствуют о недостаточной эффективности классических диагностических подходов, базирующихся на жёсткой привязке к эталонным значениям параметров, в условиях динамичной морской эксплуатации. Переменная нагрузка, воздействие волнения, нестабильность физико-химических свойств применяемого топлива формируют комплекс помех, которые традиционные алгоритмы не способны надёжно фильтровать.

Современные научные работы, выполненные как отечественными, так и зарубежными специалистами, указывают на перспективность гибридных интеллектуальных решений. Наиболее продуктивным вектором развития представляется синергия вейвлет-анализа для предобработки зашумлённых сигналов, нечёткой логики для формирования диагностических заключений и методов оценки цикловой неравномерности для раннего обнаружения деградиационных процессов. Разработка и практическая имплементация подобных систем является актуальной научно-технической задачей, решение которой обеспечит качественный скачок в показателях надёжности и экономической эффективности судовых энергетических комплексов.

Список литературы:

1. Epikhin, A. I., Kondratiev, S. I., & Khekert, E. V. Diagnostics of Ship Engines Based on Wavelet Neural Network and Image Scanning Using Programmable Logic Circuit. World of Transport and Transportation, 2024, № 6, pp. 110-118.
2. 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.



3. Кузькин, В. Г., Глясман, Э. С. Способ оценки технического состояния судового дизеля. А.С. СССР № 1015275, 1983.

4. Надеев, А. И., Буй Хай Нгок, Свирепов, Ф. В. Диагностика технического состояния судовых дизелей на основе интеллектуального анализа данных // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. С. 139-146.

5. Безюков, О. К., Шаршавин, С. В. Тепловая диагностика состояния клапанов судового четырехтактного дизеля // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Вып. 4. С. 160-164.

6. Машенко, В. Ю., Гаврилов, В. В. Исследование показателя политропы процесса сжатия при анализе индикаторных диаграмм судового дизеля // Труды СПбГМТУ. 2024.

7. Varbanets, R., et al. Methods of Real-Time Parametric Diagnostics for Marine Diesel Engines // Polish Maritime Research. 2024. Vol. 31, No. 3, pp. 71-84.

8. Varbanets, R., et al. Implementation of Expert Knowledge in the Development of Diagnostic Systems for High-Speed Marine Diesel Engines // 9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech). 2024. pp. 1-5.

