

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-128-138

EDN YHOSKX

METHOD FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF MARINE DIESEL ENGINES USING MULTIDIMENSIONAL ANALYSIS

O. V. Afanaseva

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

The research focuses on developing a comprehensive method for assessing the technical condition of marine diesel engines using multidimensional analysis. In the context of tightening environmental standards and increasing reliability requirements for diesel engines, the development of comprehensive approaches that provide an integral assessment of their technical condition during the transition to predictive maintenance systems is relevant. The main problem addressed in this work is the absence of a comprehensive approach that enables the integration of disparate data from heterogeneous diagnostic systems into a single objective assessment of the technical condition of marine diesel engines. The object of the research is the processes of diagnosing marine diesel engines, and the subject is the existing methods for comprehensive assessment of their technical condition. The aim of the study is to develop a method that ensures an integral assessment and operational visualization of the technical condition of a marine diesel engine, provides a quantitative evaluation of its degree of degradation, enables objective comparison of different marine diesel engines, and formalizes decisions regarding the need for repair. To achieve this aim, the task of coordinating heterogeneous diagnostic features (parametric, vibroacoustic, oil analysis data, etc.) characterized by different units of measurement and time scales is addressed. The proposed approach is based on multidimensional analysis. The assessment procedure includes classification of diagnostic parameters, their linear normalization to a unified dimensionless scale, and transformation of the multidimensional diagnostic space into a two-dimensional visual model — a radar chart. For quantitative evaluation, the area of the chart is calculated and modified by introducing weighting coefficients that reflect the significance of each parameter; additionally, coefficients characterizing wear asymmetry and uniformity of unit degradation are introduced. The integral coefficient of technical condition is defined as the ratio of the chart area of the engine under study to the area of a reference chart constructed using reference parameter values. The developed mathematical apparatus and applied method allow calculation of the integral indicator (for example, 39.47 %, corresponding to an unsatisfactory condition) and visual identification of the most degraded units based on geometric parameters of the chart. The proposed method enables the integration of heterogeneous diagnostic parameters into a single integral indicator and supports the transition from scheduled preventive maintenance to condition-based maintenance, thereby improving safety, reliability, and economic efficiency of marine power plants and other sources of mechanical energy.

Keywords: marine diesel engine, diagnostics, comprehensive assessment, integral indicator, multidimensional analysis, radar chart, technical condition.

For citation:

Afanaseva, Olga V. "Method for comprehensive assessment of the technical condition of marine diesel engines using multidimensional analysis." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 128–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-128-138.

УДК 629.5.03:519.233

МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА

О. В. Афанасьева

ГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Россия

Проведена разработка комплексных подходов, обеспечивающих интегральную оценку их технического состояния в условиях перехода к системам прогнозного технического обслуживания, являющаяся актуальной при ужесточении экологических стандартов и требований к надежности дизельных двигателей. Основной исследуемой в работе проблемой является отсутствие комплексного подхода, позволяющего интегрировать разрозненные данные от разнородных диагностических систем в единую объективную оценку технического состояния судовых дизельных двигателей. Объектом исследования выступают процессы диагностирования судовых дизелей, предметом — существующие методы комплексной оценки их технического состояния. Целью исследования является разработка метода, обеспечивающего интегральную оценку и оперативную визуализацию технического состояния судового дизельного двигателя, количественную оценку степени его деградации, объективное сравнение технического состояния различных судовых дизельных двигателей и формализацию решений о необходимости ремонта. Для достижения поставленной цели решается задача согласования разнородных диагностических признаков (параметрических, виброакустических, данных анализа масел и др.) с различными единицами измерения и временными масштабами. В качестве основного метода решения задачи предложен подход, базирующийся на применении метода многомерного анализа. Основными этапами оценки являются: классификация диагностических параметров, их линейное нормирование для приведения к единой безразмерной шкале и преобразование многомерного диагностического пространства в двумерную визуальную модель — радарную диаграмму. Для количественной оценки технического состояния используется расчет площади этой диаграммы, модифицированный с введением весовых коэффициентов, отражающих значимость каждого параметра. Дополнительно вводятся коэффициенты, характеризующие асимметрию износа и равномерность деградации узлов. Интегральный коэффициент технического состояния судовых дизельных двигателей рассчитывается как отношение площади диаграммы исследуемого двигателя к площади эталонной диаграммы, построенной на эталонных значениях параметров двигателя. Главным результатом исследования является разработанный математический аппарат и прикладной метод, позволяющий не только рассчитывать интегральный показатель (например, в приведенном примере он составил 39,47 %, что соответствует неудовлетворительному состоянию), но и визуально идентифицировать наиболее деградирующие узлы по геометрическим параметрам диаграммы. Основной вывод заключается в том, что предложенный метод позволяет объединять разнородные диагностические параметры в единый интегральный показатель, визуализировать степень деградации различных узлов дизельного двигателя и прогнозировать его остаточный ресурс. Данный метод переход от субъективной качественной интерпретации разрозненных данных к объективному количественному анализу и может быть положен в основу перехода от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию, что повышает безопасность, надежность и экономическую эффективность эксплуатации судовых энергетических установок и других источников механической энергии.

Ключевые слова: судовой дизельный двигатель, диагностика, диагностические параметры, многомерное диагностическое пространство, комплексная оценка, интегральный показатель, многомерный анализ, диаграмма, техническое состояние, классификация технического состояния.

Для цитирования:

Афанасьева О. В. Метод комплексной оценки технического состояния судовых дизельных двигателей с использованием многомерного анализа / О. В. Афанасьева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 128–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-128-138. — EDN YHOSKX.

Введение (Introduction)

Современные двигатели внутреннего сгорания функционируют в условиях постоянно ужесточающихся требований к надежности, экономичности и экологической безопасности [1–3]. Значимость своевременного обнаружения неисправностей в работе и конструкции двигателя заключается прежде всего в повышении безопасности его эксплуатации, предотвращении повреждений и продлении срока службы, что, в свою очередь, снижает затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание двигателя.

Особый интерес представляют системы, предназначенные для обнаружения неисправностей в работе двигателя, основанные на анализе сигналов вибрации [4–6] или акустических сигналов [7, 8], создаваемых двигателем. Используемые в них методы включают: анализ сигналов в частотной области с использованием быстрого преобразования Фурье; анализ сигналов с использованием вейвлет-преобразования; методы разложения сигналов, такие как разложение

по эмпирическим, вариационным модам и анализ главных компонент [8, 9]. В последнее время все больший интерес вызывают системы, построенные на основе нейронных сетей, позволяющих обнаруживать неисправности в судовых системах и узлах [2, 10].

Основной проблемой современной диагностики дизельных двигателей является разрозненность оценок различных систем двигателя [11, 12]. При этом традиционные подходы к технической диагностике, основанные на анализе отдельных параметров, часто демонстрируют свою недостаточную информативность. Существующие методы позволяют с высокой точностью определять состояние отдельных узлов, но не обеспечивают комплексного представления о техническом состоянии двигателя в целом [13, 14]. Субъективность интерпретации разрозненных диагностических данных приводит к значительной вариативности оценок различных специалистов и, как следствие, к ошибкам в прогнозировании остаточного ресурса [15–17]. Необходимость интегрированной оценки многопараметрического состояния дизельных двигателей становится особенно острой при переходе к системам технического обслуживания по фактическому состоянию, где требуется оперативное принятие решений на основе комплексного анализа большого количества разнородных диагностических признаков.

Современная практика диагностирования дизельных двигателей базируется на применении специализированных методов анализа отдельных систем [12, 17], к которым относятся следующие.

1. Параметрические методы, основанные на анализе рабочих параметров, получаемых за счет совместного анализа нескольких параметров:

- метод сравнения с эталонными характеристиками, при котором оценка формируется по совокупности степени отклонения текущих параметров двигателя, например, мощности, расхода топлива, температуры выпускных газов по цилиндрам, давления сжатия, от паспортных данных или от характеристик, снятых при вводе двигателя в эксплуатацию;

- балансировый метод, основанный на составлении энергетического и материального балансов (теплового, воздушного, газового);

- метод параметров-признаков, основанный на комплексном анализе главных параметров, наиболее чутко реагирующих на изменение состояния (например, равномерности распределения нагрузок по цилиндрам, температуры выпускных газов перед турбиной, давления наддува).

2. Виброакустические методы, являющиеся мощным инструментом неразрушающего контроля, позволяющего оценить состояние скрытых элементов. К ним относятся:

- вибродиагностика, основанная на оценке изменений спектра вибраций двигателя (например, появлении новых гармоник и росте амплитуд на определенных частотах);

- акустическая эмиссия, при которой регистрируются высокочастотные упругие волны, возникающие при зарождении и развитии трещин, а также трении изношенных поверхностей.

3. Методы анализа рабочих жидкостей (трибодиагностика):

- спектральный анализ масла, при котором по концентрации элементов износа оценивают интенсивность износа конкретных пар трения, правильность работы системы очистки масла, остаточный ресурс масла;

- анализ феррографии, основанный на выделении и классификации частиц износа из масла по их размеру и форме.

4. Экспресс-методы и методы оперативного контроля:

- анализ дымности отработавших газов, который позволяет быстро и интегрально оценить качество смесеобразования и сгорания топлива, так как повышенная дымность является признаком неисправностей топливной аппаратуры, системы наддува или износа цилиндропоршневой группы;

- измерение компрессии в цилиндрах, напрямую характеризующей герметичность камеры сгорания и, следовательно, состояния поршневых колец, клапанов и уплотнений.

5. Математические (имитационные модели) и интеллектуальные методы:

- диагностирование по математическим моделям, при котором создается детальная математическая модель исправного эталонного двигателя, затем текущие параметры двигателя «про-

гоняются» через модель, а рассогласование между реальными и расчетными данными является мерой его технического состояния;

- нейросетевые технологии и машинное обучение, при котором нейронная сеть обучается на большом массиве данных (параметры двигателя, вибрации, анализы масла) как от исправных, так и от неисправных двигателей. После обучения такая система способна не просто констатировать отклонения, а указывать на наиболее вероятную неисправность и ее степень;
- экспертные системы, основанные на формализации знаний и опыта специалистов, построенные как базы знаний (такие системы выдают оценки на основе логических выводов).

Каждый из указанных методов оперирует собственными единицами измерения, различными временными масштабами и неодинаковой чувствительностью к изменению технического состояния дизельных двигателей. Это создает существенные трудности при формировании единого диагностического заключения по техническому состоянию двигателя. Таким образом, задача согласования разнородных диагностических признаков с целью оценки технического состояния дизельного двигателя в целом представляется актуальной.

Целью настоящего исследования является разработка научно-обоснованного метода интегральной оценки технического состояния судовых дизельных двигателей на основе многомерного анализа по основным метрологическим характеристикам.

Предлагаемый метод должен обеспечивать интегральную и оперативную визуализацию технического состояния двигателя, получение количественной оценки степени его деградации в целом, объективное сравнение технического состояния различных агрегатов, формализацию процесса принятия решений о необходимости проведения ремонтных работ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для комплексной оценки технического состояния дизельного двигателя рассмотрим вектор диагностических параметров P , включающий измеряемые показатели всех исследуемых систем (элементов) двигателя: $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, где p_i — текущие значения диагностических параметров.

Для приведения разнородных диагностических параметров (параметров с разной размерностью) к единой безразмерной шкале $[0; 1]$ применим метод линейного и обратного линейного нормирования:

$$r_i = \frac{p_i - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}},$$

где $r_i \in [0; 1]$ — нормированное значение i -го параметра; p_i — текущее измеренное значение параметра; $p_{\min}$ — минимально допустимое значение параметра (нижний предел); $p_{\max}$ — максимально допустимое значение параметра (верхний предел).

Причем для параметров, изменение которых в большую сторону свидетельствует об ухудшении состояния (например, виброускорения или расхода масла), применяется обратное нормирование:

$$r_i = 1 - \frac{p_i - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}}.$$

В качестве модели преобразования многомерного диагностического пространства в двумерную визуальную модель, адекватно отражающую техническое состояние двигателя, предлагается радарная диаграмма, представляющая собой выпуклый многоугольник в n -мерном пространстве диагностических параметров, где каждая вершина соответствует нормированному значению диагностического параметра. Радиус-вектор вершины определяется величиной r_i , угловое положение вершины равномерно распределено по окружности, угол для вершины i вычисляется по формуле

$$\Theta_i = (i-1) \frac{2\pi}{n},$$

где i — номер параметра, $i = 1, 2, \dots, n$.

За интегральный показатель технического состояния примем площадь радарной диаграммы S . Очевидно, что в случае, если площадь стремится к единице ($S \rightarrow 1$), то это соответствует идеальному состоянию двигателя; в случае, если площадь стремится к нулю ($S \rightarrow 0$), то это свидетельствует о критическом состоянии. Динамика изменения площади S позволяет отслеживать изменение технического состояния двигателя во времени. Для вычисления интегрального показателя технического состояния используется формула площади радарной диаграммы.

Расчет площади для многоугольника выполняется по формуле

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i r_{i+1} \cdot \sin(\Theta_{i+1} - \Theta_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i r_{i+1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right), \quad (1)$$

где r_i — нормированные значения диагностических параметров; n — количество диагностических параметров, $i = 1, 2, \dots, n$, при этом $r_{n+1} = r_1$.

Для практического применения в диагностике дизельных двигателей формула (1) модифицирована с введением весовых коэффициентов важности параметров:

$$S = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n w_i r_i w_{i+1} r_{i+1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right),$$

где $w_i \in [0; 1]$ — весовой коэффициент, отражающий значимость i -го параметра для общей оценки технического состояния $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

Дополнительно введен коэффициент асимметрии K_a , характеризующий неравномерность износа систем двигателя:

$$K_a = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\text{ср}}},$$

где $P_{\max}$, $P_{\min}$, $P_{\text{ср}}$ — соответственно максимальное, минимальное и среднее арифметическое значение среди нормированных диагностических параметров r_i на момент оценки.

Интегральный коэффициент технического состояния судовых дизельных двигателей $k_{\text{ТС}}$ вычисляется по формуле

$$k_{\text{ТС}} = \frac{S_{\text{исслед}}}{S_{\text{эталон}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $S_{\text{исслед}}$ — площадь диаграммы, построенной на исследуемых параметрах; $S_{\text{эталон}}$ — площадь диаграммы, построенной на эталонных значениях параметров двигателя.

Эталонная диаграмма формируется на основе нормативных значений параметров для нового двигателя (или двигателя после капитального ремонта) следующим образом.

1. Определение «идеального» состояния двигателя базируется на паспортных данных и результатах обкатки.

2. Эталонный многоугольник строится при $r_i = 1$ для всех параметров, что соответствует:

$$S_{\text{эталон}} = \frac{n}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right),$$

где n — число параметров.

Эталонная диаграмма служит базой для сравнения и отражает состояние нового двигателя или после капитального ремонта, полностью исправного двигателя. Анализ диаграмм позволяет идентифицировать характерные геометрические отклонения для различных неисправностей. В табл. 1 приведен пример классификации технического состояния дизельного двигателя в зависимости от значения интегрального коэффициента технического состояния.

Таблица 1

Классификация технического состояния

Классификация состояния	Значение интегрального коэффициента технического состояния	Характеристика
Оптимальное	90 – 100 %	Все параметры в пределах паспортных значений, отсутствие развивающихся дефектов, рекомендуется плановое техническое обслуживание
Удовлетворительное	75 – 90 %	Незначительное отклонение отдельных параметров, наличие начальных стадий износа, требуется усиленный контроль и диагностика
Предельное	60 – 75 %	Существенное отклонение нескольких параметров, наличие развитых дефектов, необходимо запланировать ремонт
Неудовлетворительное	< 60 %	Критическое отклонение параметров, высокий риск отказа, необходим немедленный ремонт

В качестве дополнительных показателей вычисляются:

– коэффициент равномерности износа: $k_{\text{изн}} = 1 - \frac{\sigma}{\mu}$, где σ — среднее квадратическое отклонение нормированных диагностических параметров r_i на момент оценки; μ — среднее арифметическое значение всех нормированных диагностических параметров r_i ;

– индекс деградации: $D_{\text{деградации}} = 1 - k_{\text{изн}}^{(t/T_{\text{норм}})}$, где $k_{\text{изн}}$ — коэффициент равномерности износа, рассчитанный на текущий момент (по последним данным диагностики); t — фактическая наработка двигателя (например, с момента последнего капитального ремонта), выраженная в тысячах часов (тыс. ч); $T_{\text{норм}}$ — нормативная (расчетная) наработка двигателя (например, до момента капитального ремонта), выраженная в тысячах часов (тыс. ч).

Результаты (Results)

Для иллюстрации метода рассмотрим модельный пример с четырнадцатью диагностическими параметрами (номинальная мощность, кВт; удельный расход топлива, г/(кВт·ч); частота вращения (номин.), об/мин; частота вращения (XX), об/мин; температура охлаждающей жидкости, °C; температура масла, °C; температура отработавших газов, °C; давление масла, МПа; противодействие газов, кПа; СКЗ виброскорости, мм/с; СКЗ виброускорения, м/с²; уровень шума, дБА; максимальный момент, Н·м; угар масла, г/кВт·ч). Исходные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для примера

№ п/п.	Результаты измерения	Минимальное значение	Максимальное значение	Нормированное значение	Угол θ_i
1	18,1	17,1	18,5	0,7333	0
2	248	240	255	0,5333	$2\pi / 14 \approx 0,44879895$
3	1500	1480	1520	0,5000	$4\pi / 14 \approx 0,89759790$
4	600	580	620	0,5000	$6\pi / 14 \approx 1,34639685$
5	87	75	90	0,8000	$8\pi / 14 \approx 1,79519580$
6	88	75	90	0,8667	$10\pi / 14 \approx 2,24399475$
7	480	450	550	0,3000	$12\pi / 14 \approx 2,69279370$
8	0,39	0,25	0,45	0,7000	$\pi \approx 3,14159265$
9	2,9	2,0	3,5	0,6000	$16\pi / 14 \approx 3,59039160$
10	3,9	2,0	5,0	0,6333	$18\pi / 14 \approx 4,03919055$
11	19	10,0	30	0,4500	$20\pi / 14 \approx 4,48798950$
12	93	85	95	0,8000	$22\pi / 14 \approx 5,93678845$
13	102	95	105	0,7000	$24\pi / 14 \approx 6,38558740$
14	1,6	0,5	2,0	0,7333	$26\pi / 14 \approx 6,83438635$

Угол между соседними лучами: $\Delta\Theta_i = \frac{2\pi}{n} = \frac{2 \cdot 3,1415926535}{14} \approx 0,44879895$ рад.

Площадь многоугольника в полярных координатах вычисляется по формуле

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i r_{i+1} \cdot \sin(\Theta_{i+1} - \Theta_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i r_{i+1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) = \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) \cdot \sum_{i=1}^n r_i r_{i+1}.$$

Вершина с номером 15 — это снова вершина 1, для замыкания фигуры, то есть $r_{15} = r_1$. В данном примере получили, что $\sin(0,44879895) \approx 0,433883$.

Вычислив произведения $(r_i \cdot r_{i+1})$, получим:

$$\begin{aligned} r_1 \cdot r_2 &= 0,7333 \cdot 0,5333 = 0,3911; & r_2 \cdot r_3 &= 0,5333 \cdot 0,5000 = 0,2667; & r_3 \cdot r_4 &= 0,5000 \cdot 0,5000 = 0,2500; \\ r_4 \cdot r_5 &= 0,5000 \cdot 0,8000 = 0,4000; & r_5 \cdot r_6 &= 0,8000 \cdot 0,8667 = 0,6934; & r_6 \cdot r_7 &= 0,8667 \cdot 0,3000 = 0,2600; \\ r_7 \cdot r_8 &= 0,3000 \cdot 0,7000 = 0,2100; & r_8 \cdot r_9 &= 0,7000 \cdot 0,6000 = 0,4200; & r_9 \cdot r_{10} &= 0,6000 \cdot 0,6333 = 0,3800; \\ r_{10} \cdot r_{11} &= 0,6333 \cdot 0,4500 = 0,2850; & r_{11} \cdot r_{12} &= 0,4500 \cdot 0,8000 = 0,3600; & r_{12} \cdot r_{13} &= 0,8000 \cdot 0,7000 = 0,5600; \\ r_{13} \cdot r_{14} &= 0,7000 \cdot 0,7333 = 0,5133; & r_{14} \cdot r_1 &= 0,7333 \cdot 0,7333 = 0,5377. \end{aligned}$$

Тогда площадь многоугольника будет равна:

$$S = \frac{1}{2} \cdot 0,433883 \cdot 5,5272 \approx 1,1989.$$

Заметим, что максимально возможная площадь для 14-угольника с $r_i = 1$ составляет

$$S_{\text{эталон}} = \frac{n}{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) = 7 \cdot 0,433883 = 3,0372.$$

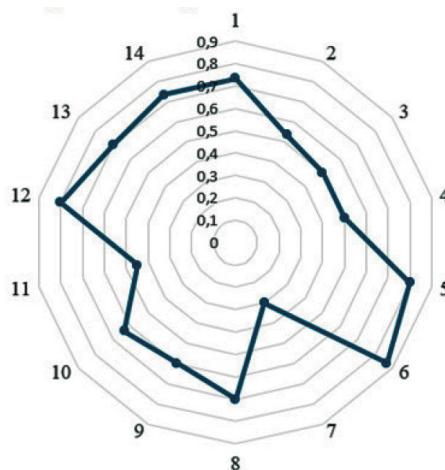
Тогда относительная площадь будет равна

$$S_{\text{относит}} = \frac{S_{\text{исслед}}}{S_{\text{эталон}}} = \frac{1,1989}{3,0372} = 0,3947.$$

Вычислим интегральный коэффициент технического состояния по формуле

$$k_{\text{ТС}} = \frac{S_{\text{исслед}}}{S_{\text{эталон}}} \cdot 100 \% = 39,47 \ %.$$

На рисунке представлена радарная диаграмма технического состояния дизельного двигателя.



Радарная диаграмма технического состояния
дизельного двигателя

Анализ диаграммы позволяет идентифицировать характерные геометрические отклонения, характерные для различных неисправностей. В рассмотренном примере диаграмма имеет сильно выраженную асимметрию с «проседанием» в области 7-, 11-, 3- и 4-го показателей (значения № 7 (30,0 %), № 11 (45,0 %), № 3 и № 4 (50,0 %)) и «всплесками» в области 6-, 5- и 12-го показателей (значения № 6 (86,67 %), № 5 (80,0 %), № 12 (80,0 %)). Площадь составляет примерно 39,5 % от максимально возможной площади для четырнадцатиугольника. На основе результатов анализа можно сформулировать общую оценку: состояние двигателя неудовлетворительное (менее 60 %), требуется срочная диагностика и ремонт систем, соответствующих параметрам № 3, № 4, № 7 и № 11.

Обсуждение (Discussion)

Формула (1) позволяет вычислить площадь радарной диаграммы, рассматриваемой как объединение треугольников с общей вершиной в центре. По ней выполняется вычисление площади многоугольника, включая области, где лучи пересекаются. В случае, если необходимо вычислить площадь многоугольника с учетом пересечений, то предварительно необходимо осуществить переход к декартовым координатам. При этом вычисления необходимо проводить, используя формулу Гаусса. Тогда площадь многоугольника вычисляется по следующей формуле:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i),$$

где $x_i = r_i \cdot \cos \Theta_i$, $y_i = r_i \cdot \sin \Theta_i$, $\Theta_i = (i-1) \frac{2\pi}{n}$ и $x_{n+1} = x_1$, $y_{n+1} = y_1$.

В приведенном примере вершины многоугольника определяются в полярных координатах: $A_1(r_1, \Theta_1)$, $A_2(r_2, \Theta_2)$, ..., $A_{14}(r_{14}, \Theta_{14})$. Представим исходные данные в декартовых координатах (табл. 3).

Таблица 3

Численные значения для всех слагаемых в декартовых координатах

Номер вершины (i)	Координаты вершины	
	$x_i = r_i \cdot \cos \Theta_i$	$y_i = r_i \cdot \sin \Theta_i$
1	$0,7333 \cdot 1 = 0,733300$	$0,7333 \cdot 0 = 0$
2	$0,5333 \cdot 0,900969 \approx 0,480187$	$0,5333 \cdot 0,433884 \approx 0,231310$
3	$0,5000 \cdot 0,623490 \approx 0,311745$	$0,5000 \cdot 0,781831 \approx 0,390916$
4	$0,5000 \cdot 0,222521 \approx 0,111260$	$0,5000 \cdot 0,974928 \approx 0,487464$
5	$0,8000 \cdot (-0,222521) \approx -0,178017$	$0,8000 \cdot 0,974928 \approx 0,779942$
6	$0,8667 \cdot (-0,623490) \approx -0,540379$	$0,8667 \cdot 0,781831 \approx 0,677613$
7	$0,3000 \cdot (-0,900969) \approx -0,270291$	$0,3000 \cdot 0,433884 \approx 0,130165$
8	$0,7000 \cdot (-1) \approx -0,700000$	$0,7000 \cdot 0 = 0$
9	$0,6000 \cdot (-0,900969) \approx -0,540581$	$0,6000 \cdot (-0,433884) \approx -0,260330$
10	$0,6333 \cdot (-0,623490) \approx -0,394857$	$0,6333 \cdot (-0,781831) \approx -0,495034$
11	$0,4500 \cdot (-0,222521) \approx -0,100134$	$0,4500 \cdot (-0,974928) \approx -0,438718$
12	$0,8000 \cdot 0,222521 \approx 0,178017$	$0,8000 \cdot (-0,974928) \approx -0,779942$
13	$0,7000 \cdot 0,623490 \approx 0,436443$	$0,7000 \cdot (-0,781831) \approx -0,547282$
14	$0,7333 \cdot 0,900969 \approx 0,660680$	$0,7333 \cdot (-0,433884) \approx -0,318167$

Тогда площадь многоугольника, вычисленная в декартовых координатах по формуле Гаусса, составит

$$S = (1/2) \cdot 2,392450 = 1,196225.$$

Максимально возможная площадь для 14-угольника с $r_i=1$:

$$S = (n/2) \cdot \sin(2\pi/n) = 7 \cdot \sin(0,44879895) = 7 \cdot 0,433883 = 3,0372.$$

Относительная площадь:

$$S_{\text{относительная}} = \frac{1,196225}{3,0372} = 0,3939.$$

Это значение очень близко к значению, полученному ранее через полярные координаты, что подтверждает корректность обоих методов. Небольшая разница является следствием накопления ошибок округления на каждом этапе вычислений (особенно при округлении значений косинусов и синусов). Для инженерных целей оба результата являются верными, но расчет в декартовых координатах считается более прямым и фундаментальным. Заметим, что количество контролируемых параметров зависит от целей исследования и имеющихся для этого исходных данных. При этом полученные результаты будут обладать определенной точностью и достоверностью. Например, в работе [9] на основе теории подобия и анализа размерностей для оценки технического состояния только элементов цилиндропоршневой группы дизелей речного флота было построено критериальное уравнение с четырнадцатью параметрами. Минимальное число диагностических параметров будет определяться объемом исходных диагностической информации.

Заключение (Conclusion)

Современный подход к интегральной оценке технического состояния судового дизельного двигателя заключается в комплексном применении существующих разнородных способов. Данные параметрических систем мониторинга в реальном времени дополняются периодическим виброакустическим контролем и химическим анализом масел. Эта информация поступает в математическую и нейросетевую модели, которые выдают итоговую интегральную оценку остаточного ресурса и рекомендации по дальнейшей эксплуатации двигателя.

Внедрение комплексных интеллектуальных систем диагностики дизельных двигателей позволяет перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию, что является условием безопасности их эксплуатации и экономической эффективности.

Таким образом, в работе представлены следующие результаты исследования:

1. Для формализации диагностических параметров предложена система нормирования разнородных диагностических признаков и их классификация по функциональным группам влияния на работоспособность дизельных двигателей.
2. Предложенная математическая модель преобразования многомерного диагностического пространства в двумерную визуальную модель, адекватно отражающую техническое состояние двигателя, что позволяет не только количественно оценить его текущее техническое состояние, но и по форме диаграммы идентифицировать наиболее деградирующие системы и узлы.
3. Предложены математическая модель оценки и расчетные зависимости для количественного определения интегральных показателей технического состояния дизельного двигателя.

Предлагаемый подход позволяет перейти от субъективной качественной оценки к объективному количественному анализу технического состояния судовых дизельных двигателей, что имеет существенное значение для повышения эффективности систем технической эксплуатации судовых энергетических установок и стационарных источников механической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онищенко И. С. Обзор развития требований по обеспечению безопасности эксплуатации судов внутреннего плавания / И. С. Онищенко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 75–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-75-85. — EDN VWLOBD.

2. Tian X. Construction of Knowledge Graph for Marine Diesel Engine Faults Based on Deep Learning Methods / X. Tian, H. Gan, Y. Liu // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2025. — Vol. 13. — Is. 4. DOI: 10.3390/jmse13040693.
3. Медведев В. В. Обзор и анализ возможностей различных способов повышения энергетической эффективности судов / В. В. Медведев, В. В. Гаврилов, С. Н. Киселев // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2018. — № 2–1(40). — С. 94–103. — EDN XSHLHF.
4. Afanaseva O. Vibration-Based Condition Monitoring of Diesel Engines in Industrial Energy Applications: A Scoping Review / O. Afanaseva, D. Pervukhin, A. Khatrusov // *Energies*. — 2025. — Vol. 18. — Is. 21. DOI: 10.3390/en18215717.
5. Баркова Н. А. Основные направления развития вибрационной диагностики судовых машин / Н. А. Баркова, Д. В. Грищенко // *Актуальные проблемы морской энергетики: материалы шестой международной межотраслевой научно-технической конференции, 16–17 февраля 2017 г.* — Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2017. — С. 24–27.
6. Грищенко Д. В. Автоматическая обработка узкополосных спектров вибрации судовых машин в целях выделения диагностически значимых компонент / Д. В. Грищенко // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2016. — № 4–2(34). — С. 8–13. — EDN YLOGZJ.
7. Radi J. Spectral-Based Fault Detection Method in Marine Diesel Engine Operation / J. Radić, M. Šarić, A. Rubić // *Sensors*. — 2025. — Vol. 25. — Is. 18. DOI: 10.3390/s25185669.
8. Mathew S. K. Acoustic-Based Engine Fault Diagnosis Using WPT, PCA and Bayesian Optimization / S. K. Mathew, Y. Zhang // *Applied Sciences*. — 2020. — Vol. 10. — Is. 19. DOI: 10.3390/app10196890.
9. Тузов Л. В. Вибрация судовых двигателей внутреннего сгорания / Л. В. Тузов, О. К. Безюков, О. В. Афанасьева. — Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2012. — 348 с. — EDN QNYGXR.
10. Yang X. A Multiple Attention Convolutional Neural Networks for Diesel Engine Fault Diagnosis / X. Yang, F. Bi, J. Cheng, D. Tang, P. Shen, X. Bi // *Sensors*. — 2024. — Vol. 24. — Is. 9. DOI: 10.3390/s24092708.
11. Ерофеев П. А. Классификация современных методов совершенствования рабочего процесса судовых дизелей / П. А. Ерофеев, В. А. Жуков, С. Г. Черный // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774. — EDN JQBJAN.
12. Жуков В. А. Системы мониторинга и диагностики элементов судовых энергетических установок / В. А. Жуков, А. А. Буцанец, В. В. Гаврилов, С. А. Щербан // *Морская радиоэлектроника*. — 2021. — № 1(75). — С. 22–27. — EDN OJXXBA.
13. Кочергин В. И. Использование характеристик термодинамических процессов для оценки технического состояния дизельных энергетических установок / В. И. Кочергин, С. П. Глушков, Е. С. Зинченко // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-141-153. — EDN SNJEBX.
14. Мазур Е. В. Разработка алгоритма комплексной методики оценки технического состояния цилиндропоршневой группы судовой двигательной установки на основе показателей масляной системы / Е. В. Мазур, Н. Л. Великанов, Г. Е. Ананьев // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2024. — № 1. — С. 72–83. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-1-72-83. — EDN YWTJFD.
15. Герике П. Б. Вибродиагностика центробежных насосов / П. Б. Герике, А. Г. Никитин // *Вестник научно-центра по безопасности работ в угольной промышленности*. — 2020. — № 4. — С. 83–89. — EDN HMSLON.
16. Ariefjewe I. B. Graph-analytical method for assessing the state of the object being diagnosed / I. B. Ariefjewe // *Russian Journal of Logistics & Transport Management*. — 2020. — Vol. 5. — Is. 1. — Pp. 10–18. — EDN PAJZOI.
17. Кулагин А. В. Диагностирование состояния судовых дизельных двигателей вероятностным методом распознавания неисправностей / А. В. Кулагин // *Научные проблемы водного транспорта*. — 2021. — № 69. — С. 109–122. DOI: 10.37890/jwt.vi69.220. — EDN VYAMDP.

REFERENCES

1. Onischenko, I. S. “Review of the development of requirements to ensure the safe operation of inland waterway vessels.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 17.1 (2025): 75–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-75-85.

2. Tian, X., H. Gan and Y. Liu. "Construction of Knowledge Graph for Marine Diesel Engine Faults Based on Deep Learning Methods." *Journal of Marine Science and Engineering* 13.4 (2025). DOI: 10.3390/jmse13040693.
3. Medvedev, V. V., V. V. Gavrilov and S. N. Kiselev. "Review and analysis of the possibility of various methods of increasing the energy efficiency of vessels." *Marine Intelligent Technologies* 2–1(40) (2018): 94–103.
4. Afanaseva, O., D. Pervukhin and A. Khatrusov. "Vibration-Based Condition Monitoring of Diesel Engines in Industrial Energy Applications: A Scoping Review." *Energies* 18.21 (2025). DOI: 10.3390/en18215717.
5. Barkova, N. A. and D. V. Grischenko. "Osnovnye napravleniya razvitiya vibratsionnoy diagnostiki sudovykh mashin." *Aktual'nye problemy morskoy energetiki: materialy shestoy mezhdunarodnoy mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 16–17 fevralya 2017 g. Sankt-Peterburg: SPbGMTU, 2017: 24–27.*
6. Grischenko, D. V. "Avtomaticeskaya obrabotka uzkopolosnykh spektrov vibratsii sudovykh mashin v tselyakh vydeleniya diagnosticheskikh znachimykh komponent." *Marine Intelligent Technologies* 4–2(34) (2016): 8–13.
7. Radi, J., M. Šarić and A. Rubić. "Spectral-Based Fault Detection Method in Marine Diesel Engine Operation." *Sensors* 25.18 (2025). DOI: 10.3390/s25185669.
8. Mathew, S. K. and Y. Zhang. "Acoustic-Based Engine Fault Diagnosis Using WPT, PCA and Bayesian Optimization." *Applied Sciences* 10.19 (2020). DOI: 10.3390/app10196890.
9. Tuzov, L. V., O. K. Bezyukov and O. V. Afanas'eva. *Vibratsiya sudovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya. Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo", 2012: 348.*
10. Yang, X., X. Bi et al. "A Multiple Attention Convolutional Neural Networks for Diesel Engine Fault Diagnosis." *Sensors* 24.9 (2024). DOI: 10.3390/s24092708.
11. Erofeev, P. A., V. A. Zhukov and S. G. Chernyy. "Classification of modern methods for improving the working process of marine diesel engine." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.
12. Zhukov, V. A., A. A. Butsanets, V. V. Gavrilov and S. A. Scherban. "Monitoring systems and diagnostics of ship power plant components." *Marine Radioelectronics* 1(75) (2021): 22–27.
13. Kochergin, V. I., S. P. Glushkov and E. S. Zinchenko. "Using the thermodynamic processes features to assess the diesel power plants technical condition." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-141-153.
14. Mazur, E. V., N. L. Velikanov and G. E. Anan'ev. "Development of the algorithm for a comprehensive methodology for assessing the technical condition of a marine propulsion system cylinder piston group based on the indicators of the oil system." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2024): 72–83. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-1-72-83.
15. Gerike, P. B. and A. G. Nikitin. "Vibration-based diagnostics of centrifugal pumps." *Bulletin of Research Center For Safety in Coal Industry (Industrial Safety)* 4 (2020): 83–89.
16. Ariefjewe, I. B. "Graph-analytical method for assessing the state of the object being diagnosed." *Russian Journal of Logistics & Transport Management* 5.1 (2020): 10–18.
17. Kulagin, A. V. "Diagnosing the state of marine diesel engines by probabilistic fault recognition method." *Russian Journal of Water Transport* 69 (2021): 109–122. DOI: 10.37890/jwt.vi69.220.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьева Ольга Владимировна —
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»,
190000, Россия, Санкт-Петербург,
Большая Морская ул., 67
e-mail: ovaf72@guap.ru, Ovaf72@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Afanaseva Olga V. —
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor
St. Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
190000, Russia, St. Petersburg,
Bolshaya Morskaya st., 67
e-mail: ovaf72@guap.ru, Ovaf72@gmail.com

Статья поступила в редакцию: 19 декабря 2025 г.

Received: Dec. 19, 2025