

Научная статья  
УДК 62-192  
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-72-83>  
EDN YWTJFD

## **Разработка алгоритма комплексной методики оценки технического состояния цилиндропоршневой группы судовой двигательной установки на основе показателей масляной системы**

**Екатерина Владимировна Мазур<sup>1</sup>✉, Николай Леонидович Великанов<sup>2</sup>,  
Григорий Евгеньевич Ананьев<sup>3</sup>**

<sup>1, 3</sup>*Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,  
Калининград, Россия, [ekaterina.mazur@gmail.com](mailto:ekaterina.mazur@gmail.com)✉*

<sup>2</sup>*Калининградский государственный технический университет,  
Калининград, Россия*

**Аннотация.** Исследуется алгоритм комплексной методики оценки технического состояния цилиндропоршневой группы судовой двигательной установки. Износ – это непрерывный процесс, характерный для всех работающих механизмов. Исследования, направленные на выявление факторов, способствующих деградации системных элементов устройств, дают основу для разработки предупреждающих мер по сокращению их действия. Знания о техническом состоянии компонентов судового двигателя имеют важное значение для разработки мероприятий, повышающих надежность оборудования и снижающих риски аварийных ситуаций. Представлены некоторые из основных подходов к моделированию и оценке состояния системы цилиндропоршневой группы судовых дизельных двигателей. Для решения проблем оценки технического состояния цилиндропоршневой группы в процессе эксплуатации рассматриваются классические методы статистического анализа данных, предлагаются способы, искусственно увеличивающие размеры выборки данных, анализируются методы машинного обучения и определяются наиболее эффективные для использования. Создается интегрированный подход для исследования процесса эксплуатации цилиндропоршневой группы дизельных судовых двигателей, основанный на комбинации статистических методов, методов машинного обучения и вероятностного прогнозирования. Проиллюстрирована схема свойств исследуемых параметров для построения модели анализа системы цилиндропоршневой группы. Приведены алгоритмы машинного обучения, используемые для исследования систем. Предлагаемая методика позволяет, используя результаты косвенных измерений (данных по анализам смазки), определить техническое состояние двигательной системы, в частности цилиндропоршневой группы.

**Ключевые слова:** судовая энергетическая установка, цилиндропоршневая группа, обработка данных, бутстреп-метод, ориентированный граф, вероятность, FMECA

**Для цитирования:** Мазур Е. В., Великанов Н. Л., Ананьев Г. Е. Разработка алгоритма комплексной методики оценки технического состояния цилиндропоршневой группы судовой двигательной установки на основе показателей масляной системы // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 1. С. 72–83. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-72-83>. EDN YWTJFD.

Original article

## **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**

**Ekaterina V. Mazur<sup>1</sup>✉, Nikolay L. Velikanov<sup>2</sup>, Grigori E. Ananiev<sup>3</sup>**

<sup>1, 3</sup>*Immanuel Kant Baltic Federal University,  
Kaliningrad, Russia, [ekaterina.mazur@gmail.com](mailto:ekaterina.mazur@gmail.com)✉*

<sup>2</sup>*Kaliningrad State Technical University,  
Kaliningrad, Russia*

**Abstract.** The algorithm of a complex methodology for assessing the technical condition of the cylinder piston group of a marine propulsion system is being investigated. Wear is a continuous process characteristic of all working mechanisms. Studies aimed at identifying factors contributing to the degradation of system elements of devices provide the basis for the development of preventive measures to reduce their effects. Knowledge of the technical condition of marine engine components is important for the development of measures that increase the reliability of equipment and reduce the risks of emergency situations. Some of the main approaches to modeling and evaluating the state of the cylinder-piston system of marine diesel engines are presented. To solve the problems of assessing the technical condition of the cylinder piston group during operation, classical methods of statistical data analysis are considered, methods that artificially increase the size of the data sample are proposed, machine learning methods are analyzed and the most effective for use are determined. An integrated approach is being created to study the operation process of a cylinder-piston group of diesel marine engines based on a combination of statistical methods, machine learning methods and probabilistic forecasting. A diagram of the properties of the studied parameters is illustrated for constructing a model for analyzing a cylinder-piston group system. Machine learning algorithms used to study systems are presented. The proposed technique allows, using the results of indirect measurements (data from lubrication analyses), to determine the technical condition of the engine system, in particular the cylinder piston group.

**Keywords:** ship power plant, cylinder-piston group, data processing, bootstrap method, directed graph, probability, FMECA

**For citation:** Mazur E. V., Velikanov N. L., Ananov G. E. 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. 2024;1:72-83.* (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-72-83>. EDN YWTJFD.

## Введение

Дизельные двигатели широко используются в судоходстве, являясь надежной энергетической установкой с широким диапазоном мощности. В последние годы удалось достигнуть больших успехов в области надежности и долговечности среднеоборотных двигателей за счет новых конструкторских решений, разработки и использования новых материалов покрытий особо уязвимых механизмов, а также внедрения современных систем диагностики неисправностей.

Тем не менее, несмотря на большое количество разработок и исследований в отношении надежности элементов судовой энергетической установки, проблемы трения и сопутствующего износа все еще являются одним из основных предметов изучения. Ключевым узлом судового двигателя, потери на трение которого составляют значительную часть общих механических потерь, является цилиндропоршневая группа (ЦПГ). Ее износ является причиной снижения мощности двигателя, пусковых качеств, повышения расхода масла и т. д. [1].

При этом оценка технического состояния ЦПГ дизельного двигателя часто производится на основе либо данных лабораторных анализов, либо результатов вибродиагностического контроля, которые впоследствии обрабатываются классическими методами статистики и современными методами машинного обучения. Можно утверждать, что на текущем этапе достигнут определенный предел в инструментарии и точности оценки технического состояния дизельного двигателя. Повышение точности оценки возможно путем комбинации статистических методов и методов машинного обучения, однако при этом возникает несколько про-

блем. Необходимо сформировать единый перечень исследуемых данных, подобрать соответствующие методы их обработки, предложить способы их нормировки и взаимной проверки, определиться с методами, позволяющими восполнить неполноту данных, полученных по результатам анализа. Кроме того, полученные таким комплексным подходом материалы требуют последующей обработки для дальнейшего вероятностного прогнозирования надежности системы судового дизельного двигателя.

В особенности подобный подход приобретает важное значение, когда для определения технического состояния двигательной системы используются косвенные диагностические методы, такие как замер параметров эксплуатируемого масла. В связи с этим последовательно рассмотрим и подберем наиболее эффективные методы статистического анализа исходных данных по судовому дизельному двигателю, методы увеличения размера выборки данных, методы машинного обучения и методы вероятностной оценки, которые могут быть совместно использованы в рамках единой новой методики оценки технического состояния ЦПГ судового дизельного двигателя. Это станет основанием новой разрабатываемой методики оценки технического состояния ЦПГ на основе результатов замеров параметров масляной системы судового дизельного двигателя.

## Обзор существующих подходов по проведению исследований ЦПГ судовых двигателей

Рассматривая износ элементов ЦПГ, нужно подчеркнуть сложную взаимосвязь механических и химических процессов, зависящих от большого количества физических параметров трибопар.

Сложность в выделении какого-то определенного процесса или параметра приводит к рассмотрению проблемы износа при помощи системного подхода. При этом конструкционные механизмы ЦПГ и взаимодействие между ними определяются как трибологическая система. Анализируя методы исследований, можно условно разделить их на три группы: материальный, стохастический и энергетический.

При изучении влияния процессов эксплуатации на износ трибосистемы ЦПГ *материальным подходом* особое внимание уделяется исследованиям материалов, используемых непосредственно при изготовлении деталей узлов, нагрузок и анализу условий эксплуатации. Так, например, влияние трения на втулку с различной поверхностной текстурой с применением наноматериала на основе меди в качестве смазочных добавок было рассмотрено в работе китайских ученых [2]. Результаты доказали, что композитная система смазки демонстрирует хорошее снижение трения и износостойкость при выборе соответствующей структуры. Исследователи [3] представили результаты трибологических экспериментов, проведенных с использованием вибрационного измерителя износа в условиях смазки в области «поршневое кольцо – втулка цилиндра». Было установлено, что увеличение нормальной нагрузки приводит к увеличению изменений текстуры поверхности гильз [3].

*Стохастический подход* включает в себя построение и анализ моделей случайных событий, влияющих на развитие и динамику износа. Например, оценка фаз сгорания и выработки мощности, необходимой для обеспечения надлежащего управления сгоранием и нагрузкой, была исследована с помощью гибридной структуры моделирования, основанной на архетипической модели и искусственных нейронных сетей [4]. Такого рода гибридная система может быть использована как для физического, так и стохастического подхода. В другом случае авторы [5] представили практический пример моделирования технического обслуживания по состоянию на основе измеренных концентраций металлов, наблюдаемых в пробах масла парка судовых дизельных двигателей. Ввели и применили к обсуждаемому случаю модель принятия решения по оптимизации времени замены дизельных двигателей в зависимости от наблюдаемых измерений [5].

*Энергетический подход*, в свою очередь, изучает процессы, связанные с изменением энергии в трибосистеме ЦПГ, ее передачей и взаимосвязью между износом и трением. Так, в работе [6] по исследованию влияния на систему энергетического баланса дизелей изолированных поверхностей теп-

лопередачи были рассмотрены причины невозможности использования 100 % энергии двигателя из-за ряда исключений, связанных с теплоотводом и выхлопными газами. В свою очередь, в работе [7] рассмотрены методы снижения потерь механической энергии двигателя с использованием различных материалов противоизносных покрытий.

Сложная трибология ЦПГ не позволяет ограничиться одним из подходов для изучения процессов, приводящих к износу элементов. Изменения в одной из плоскостей неизбежно связаны с переменами в другой. В частности, изменение структурного состояния топлива влияет на механическую энергию, производимую системой, но одновременно с этим она оказывает воздействие на поведение материалов и изменяет набор входящих и выходящих данных для системного анализа.

#### **Использование методов статистического анализа и машинного обучения для сбора, консолидации и обработки исходных данных по эксплуатации ЦПГ**

Прогнозирование трибологического отклика материала на эксплуатационные изменения в системе ЦПГ осложняется двумя пунктами:

– внутренние и внешние факторы воздействия требуют большого количества пространственно связанных данных;

– характер взаимосвязи данных имеет высокую степень неопределенности, что не позволяет осуществлять построение моделей прогноза с использованием классических методов статистики.

Учитывая вышеизложенные проблемы, оптимальным решением представляется объединение традиционных методов вычислений и новых практических методов машинного обучения. Показания различных типов датчиков (давления, температуры, оборотов, уровня рабочих жидкостей и т. д.), а также способы регулярных исследований рабочих жидкостей (анализы топлива, масла) могут быть объединены и интегрированы в единую систему прогноза неисправностей (рис. 1).

При исследовании системы ЦПГ оценивается одновременно некоторое количество параметров. Хорошо известно, что несколько параметров показывают различную степень корреляции друг с другом, что в дальнейшем приводит к построению многомерного распределения. Такое распределение дает возможность создать вероятностную модель поведения элементов ЦПГ для прогноза степени износа. Чаще всего для построения многомерной модели технической системы используются частотные и байесовские методы.

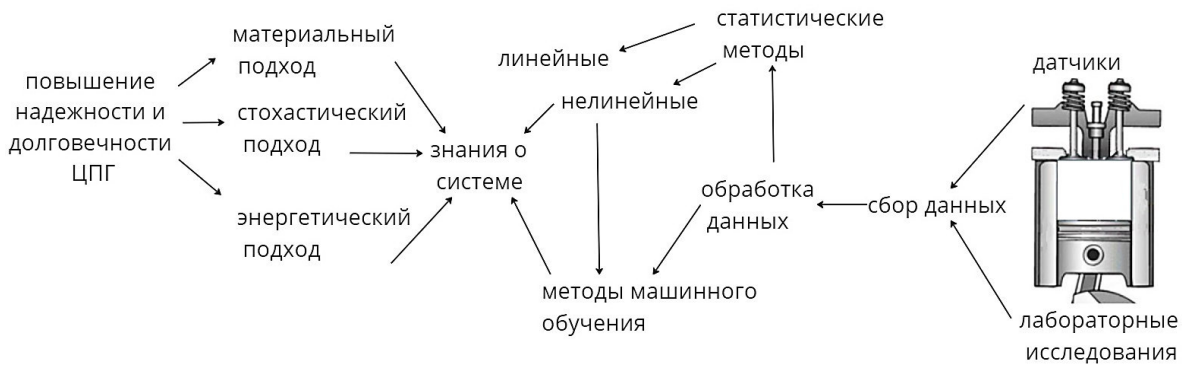


Рис. 1. Обобщенный процесс обработки данных трибосистемы ЦПГ

Fig. 1. Generalized data processing process for a tribosystem of a cylinder-piston group

Использование частотных методов хорошо применимо к анализу физических измерений, полученных от датчиков и имеющих актуальный характер на момент времени. Применяя множественную линейную регрессию и/или метод главных компонент, можно определить взаимосвязь между переменными. Временные показатели для построения модели прогноза износа компонентов ЦПГ можно разделить на общие (среднее значение,

среднеквадратическое отклонение, пик-фактор, размах, эксцесс) и местные (максимальные и минимальные значения в рабочих интервалах). Основным требованием к параметрам при анализе работы системы ЦПГ при сборе информации с датчиков и лабораторных исследований жидкостей является обобщение полученной информации релевантным способом (рис. 2).

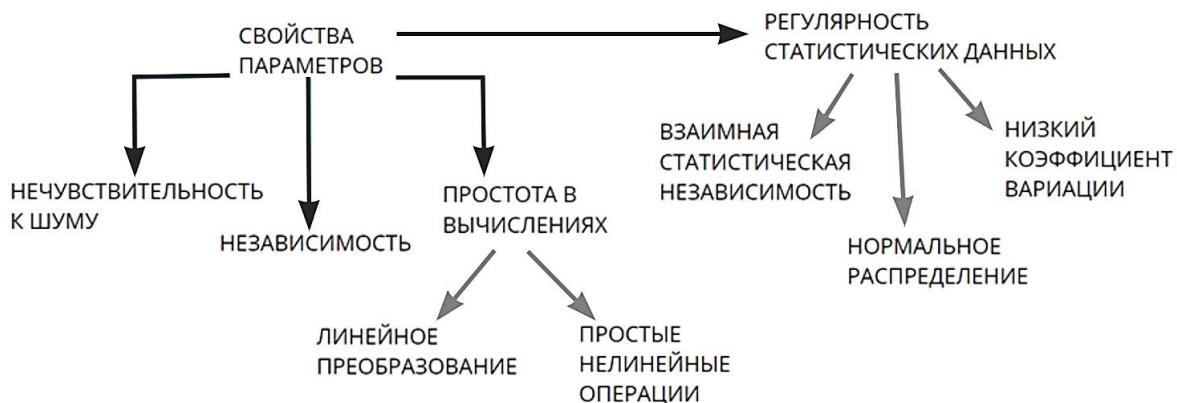


Рис. 2. Схема свойств исследуемых параметров для построения модели анализа системы ЦПГ

Fig. 2. Scheme of the properties of the parameters under study for constructing a model for analyzing the cylinder-piston group system

Инструментарий классических методов статистического анализа не позволяет полноценно обобщить получаемые многопараметрические результаты. Для формирования на их основе более общей картины оценки технического состояния эксплуатируемой ЦПГ разумно применить ряд методов машинного обучения. Так, возможно осуществить обработку статистических данных путем преобразования пространства через построение логической регрессии, использование машины

опорных векторов либо кластеризацию. Возможно оценить вероятность взаимовлияния процессов, используя при этом поиск максимального правдоподобия либо скрытые марковские цепи. Возможно осуществлять дополнение и переинтерпретацию данных, используя инструменты boosting и bagging. Кроме того, рационально устанавливать взаимосвязь между данными, применяя логические методы, такие как деревья решений или ассоциативные правила (рис. 3).



Рис. 3. Алгоритмы машинного обучения, используемые для исследования систем

Fig. 3. Machine learning algorithms used to study systems

Таким образом, стремительное развитие математического аппарата, методов нелинейного анализа и машинного обучения направлены на интеграцию собранной информации с датчиков и лабораторных исследований для более полной оценки каждой части судового двигателя.

Проиллюстрируем эффективность применения подобных алгоритмов. Например, мы имеем две выборки с данными по физико-химическому составу масла (одна («А») тестировалась с добавлением присадки для увеличения времени до разрушения масляной пленки, вторая («В») – без добавления). Нужно определить точность среднего значения выборки, когда данные показывают высокие колебания. При нахождении стандартной ошибки следует использовать выражение

$$SE_{\bar{x}} = s / \sqrt{n},$$

$$\text{где } s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

Понятие стандартной ошибки, являющейся мерой точности в статистических вычислениях, опирается на центральную предельную теорему, утверждающую, что при больших объемах количественных данных (при общих условиях распределения) в выборке ( $n$ ) среднее имеет значение, близкое к нормальному распределению. Из данного определения следует вывод о том, что среднее значение ( $\bar{x}$ ) будет находиться в пределах двух стандартных ошибок от значения неизвестного средне-

го с доверительным интервалом  $(1 - \alpha)$ :

$$\bar{x} \pm t_{n-1}, \frac{\alpha}{2} SE_{\bar{x}}.$$

В данном примере стоит вопрос: приведет ли добавление присадки к увеличению времени до момента начала разрушения пленки? Здесь можно рассмотреть случай неизвестной дисперсии с распределением Стьюдента с  $t(n - 1)$  степенями свободы ( $T$  – случайная величина):

$$T = \frac{\bar{x}_A - \bar{x}_B}{\sqrt{SE(\bar{x}_A)^2 + SE(\bar{x}_B)^2}}.$$

Допустим, что разница между средними значениями в выборках  $\bar{x}_A - \bar{x}_B = 29,78$  указывает на положительный эффект от добавления присадки. Согласно данным расчетов наблюдаемое значение неизвестной величины  $T$  имеет достаточно низкое значение, указывая на незначительные улучшения исследуемой характеристики. Но в данном случае проблема состоит в том, что нам неизвестно распределение тестовой статистики двух независимых выборок. В данном вопросе сможет помочь использование приближения Саттертуэйта и применение методов непараметрической статистики.

Использование различных алгоритмов для построения моделей (вероятностных, логических, ансамблевых) показывает высокие результаты в диагностике неисправностей. Выбор модели исследования зависит от решаемой задачи. Таким

образом, перед нами возникает вопрос оптимальной компоновки статистических методов, методов машинного обучения, способов дополнения данных и их нормализации с последующим созданием единой модели взаимосвязи между рассматриваемыми параметрами и вероятностной оценкой их взаимовлияния.

**Проблема неполноты данных и ее преодоление с помощью бутстреп-анализа**

Сложные взаимовлияния, формирующиеся между топливной системой, системой подачи масла, системой охлаждения и трущимися элементами ЦПГ, обязывают учитывать при прогнозе износа проведение анализа всех основных параметров. Формируя предлагаемый интегральный подход, выделим три основных этапа работы – сбор информации с датчиков и наблюдений лабораторных исследований топлива и масла, анализ собранной информации при помощи различных алгоритмов и оценка состояния исследуемого механизма. На этапе анализа полученной информации не всегда существует достаточное для суждений о работе системы количество информации и возникают принципиальные трудности с обработкой выборок путем традиционных статистических методов. Такие трудности могут быть преодолены с помощью использования современных программ, позволяющих применять методы машинного обучения, избавляя от трудоемких расчетов.

Данные, полученные экспериментальным путем,

предположительно соответствующие нормальному распределению, проходят статистическую обработку методами линейной статистики, такими как простая и множественная проверки гипотез с использованием статистических критериев.

В случае, когда происходит ослабление нормальности значений параметров, обработка данных реализуется с помощью нелинейных статистических методов с использованием различных алгоритмов. Например, применение бутстреп-агрегирования, относящегося к ансамблевым алгоритмам, предложенным для повышения прогностической эффективности, показало высокую результативность при характеристике многомерных параметров. Данный метод в последнее время получил широкое распространение в стохастических имитационных моделях. Мониторинг трибологической информации («входные данные»), полученной на основе анализов смазочного масла, может предоставить сведения об износе («выходные данные»). Основной идеей бутстреп-агрегирования является генерация входных данных для построения модели, состоящей из большого количества имитационных выборок, которые имеют тот же набор параметров, что и выборка, полученная эмпирическим путем. Поскольку выборка реальных данных содержит всю необходимую информацию, мы рассматриваем ее совокупность. При бутстреп-анализе происходит оценка распределения ошибки при сравнении имитационных выборок с исходной (рис. 4).

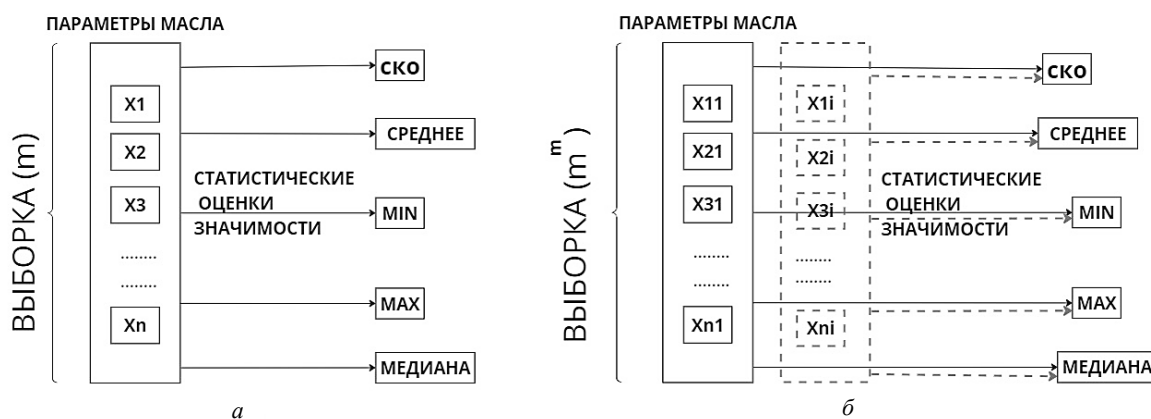


Рис. 4. Схема обработки данных лабораторных исследований масла:  
 а – традиционными методами статистики; б – бутстреп-методом

Fig. 4. Scheme for processing data from laboratory studies of oil:  
 a – using traditional statistical methods; б – bootstrap method

Основное преимущество бутстреп-метода – это возможность создать распределение переменной процесса на основе большого количества смодели-

рованных выборок. Целью использования данного метода является разработка структуры доверительного интервала для более полного определения

вероятности того, что износ находится в пределах заданного диапазона. Как правило, при исследовании системы при помощи статистической обработки данных определить, какому закону распределения подчиняется тот или иной параметр, достаточно сложно. Ограниченное количество выборок (анализ рабочих параметров масла) предполагает использование бутстреп-анализа для решения проблемы с небольшим наличием данных и позволяет применять закон распределения измеряемых величин. В наиболее общем случае создание эмпирической функции распределения для генерации большей выборки данных на основе имеющейся будет выглядеть так:

$$F^*(z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Pi_{[z_i \leq z]}, \quad (1)$$

где  $\Pi_{[\dots]}$  – индикатор-функция, равномерно почти наверное стремится к  $F(z)$  при  $n \rightarrow \infty$ , что в свою очередь составляет суть леммы Гливленко – Кантелли, что и обосновывает благоприятность применения бутстреп-подхода к обработке данных.

При создании выборок путем бутстрепа, имеющих тот же набор параметров, что и полученные экспериментальным путем, любая из величин параметра  $x_n$  может попасть несколько раз или не попасть вовсе в искусственно созданные выборки, имитируя тем самым поведение системной переменной в реальности. При расчетах среднего, стандартного отклонения, медианы и других статистических характеристик параметров бутстреп-анализом в имитационных выборках может наблюдаться некоторое отличие от полученных экспериментальным путем, но они обязательно несут в себе черты исследуемых переменных. В этой связи появляется возможность более точного определения доверительного интервала для оценки исследуемого параметра. Необходимо подчеркнуть, что в бутстреп-смоделированных выборках определение стандартной ошибки (1) рассчитывается выражением, распространяющимся на любую из выборочных характеристик (среднее значение, среднеквадратическое отклонение и др.) [10]:

$$S_{err} = \left[ 1/m - 1 \sum_{j=1}^m (f^j - f_{\tau}^j)^2 \right]^{1/2},$$

$$\text{где } f_{\tau}^j = 1/m \sum_{j=1}^m f^j,$$

где  $S_{err}$  – стандартная ошибка бутстрепа,  $f^j$  – разброс значений исследуемой характеристики в имитационных выборках  $m$ .

При дальнейшей математической обработке лабораторных анализов физико-химических параметров масла большой объем полученных бут-

стреп-моделированием выборок предоставляет широкую возможность получения прогноза состояния элементов судового двигателя. Метод матрицы параметров процесса [11], применяемый в подходе определения состояния износа элементов ЦПГ на основе обработки лабораторных исследований масла, имеет в своем алгоритме поиск доверительного интервала случайной величины с надежностью 95 %. При малом количестве выборочных данных и применении традиционных методов статистики существует возможность установления среднего значения, попадающего в доверительный интервал в диапазон с одной из границ, имеющей отрицательное значение, что нарушает смысл анализа, т. к. исследуемые величины не могут иметь отрицательные значения по физическому смыслу. При интегрированном подходе с применением бутстрепа можно избежать таких показателей даже в случае некоторого количества нулевых значений исследуемых параметров, т. к. бутстреп-моделирование не опирается на какое-либо распределение, а находит распределение в процессе вычислений.

В основе моделей прогнозирования, независимо от выбранного подхода, лежит статистический анализ и использование интеллектуальных алгоритмов [12, 13]. Каждый из алгоритмов, базирующийся на машинном обучении, имеет свои достоинства и недостатки, однако при интегральном подходе к разработке диагностических методов и исследовании функционирования системы ЦПГ судовых двигателей изучения заслуживает вопрос объединения различных моделей и подходов для возможности использования преимуществ алгоритмов. Представим алгоритм и ряд методических положений, основанных на интегральном подходе к оценке технического состояния ЦПГ дизельного двигателя.

#### Разработка новой методики оценки технического состояния ЦПГ дизельных судовых двигателей

В результате проведенного анализа можно утверждать, что для оценки технического состояния ЦПГ судового дизельного двигателя на основе изменения параметров масляной системы (косвенных диагностических признаков) требуется разработать новую методику. Состояние технической системы может описываться множеством параметров. При диагностировании сложных систем, работоспособность которых характеризуется большим числом параметров, возникает ряд дополнительных проблем, а именно: необходимо установить номенклатуру основных диагностических параметров, характеризующих работоспособность системы, и задать технические средства их контроля. По совокупности этих параметров необходимо разработать алгоритм либо методику оценки технического состояния системы и соответствующие программные продукты. Для этого на первом этапе

должен производиться сбор массива данных по основным рабочим параметрам и характеристикам

систем, оказывающих прямое влияние на состояние ЦПГ и двигателя в целом (табл. 1, 2).

Таблица 1

Table 1

**Основные параметры для исследования судового дизельного двигателя**

**The main parameters for the study of the marine diesel engine**

Параметр	Единица измерений
Номинальная мощность двигателя	кВт
Обороты двигателя	1/мин
Диаметр цилиндров	мм
Давление и температура наддувочного воздуха	бар/°C
Среднее эффективное давление цилиндра	бар
Расход топлива	кг/ч
Давление и температура смазочного масла	бар/°C
Давление и температура охлаждающей воды	бар/°C
Температура воды низкотемпературного контура на входе и выходе охладителя наддувочного воздуха	°C
Температура воздуха на входе и выходе охладителя наддувочного воздуха	°C
Температура выхлопных газов по цилиндрам	°C
Температура выхлопных газов перед турбиной и после турбины	°C
Давление наддувочного воздуха перед и после охладителя	бар
Максимальное давление сгорания в цилиндрах	бар

Таблица 2

Table 2

**Основные характеристики для исследования судового дизельного двигателя**

**Main characteristics for marine diesel engine research**

Параметр	Исследуемые характеристики
Вибрация	Моменты направляющих сил
	Осевые колебания в системе валов
	Крутильные колебания в системе валов
	Внешние неуравновешенные моменты
Качество топлива	Содержание: – воды; – натрия; – ванадия; – асфальтенов
	Углеродный остаток по Конрадсону
	Цетановое число
	Отношение углерода к водороду
	Вязкость
	Удельный вес
	Температура вспышки
	Теплота сгорания
	Зольность
	Качество смазывающего материала
Состав присадок	
Щелочное число	
Кислотное число	
Содержание: – воды; – нерастворимых продуктов; – металлических элементов	
Температура вспышки	
Температура застывания	



Мазур Е. В., Великанов Н. Л., Апаньев Г. Е. Разработка алгоритма комплексной методики оценки технического состояния цилиндропоршневой группы судовой двигательной установки на основе показателей масляной системы

Далее на основе имеющихся материалов определяется перечень используемых для аналитики статистических методов и строятся зависимости (производится статистический анализ) по приведенным основным и ряду дополнительных параметров. Параллельно определяется перечень данных, требующих обработки бутстреп-методом, и создается «карта взаимовлияния параметров систем судового дизельного двигателя» в виде ориентированного графа.

Учитывая результаты статистического анализа и бутстреп-метода, используя метод генетического алгоритма, сформированная ранее «карта взаимовлияния параметров систем судового дизельного

двигателя» преобразуется в вероятностно-ориентированный граф. То есть становится возможным утверждение, какой из параметров работы ЦПГ судового дизельного двигателя и топливной системы в целом в какой степени взаимосвязан с параметрами масляной системы и с какой вероятностью влияет на возникновение аварий.

Далее для полноты подготовки материалов к оценке технического состояния ЦПГ судового дизельного двигателя рационально использовать метод матрицы процессов. Таким образом может быть произведена оценка технического состояния ЦПГ на основе косвенных данных – результатов анализа масла (рис. 5).

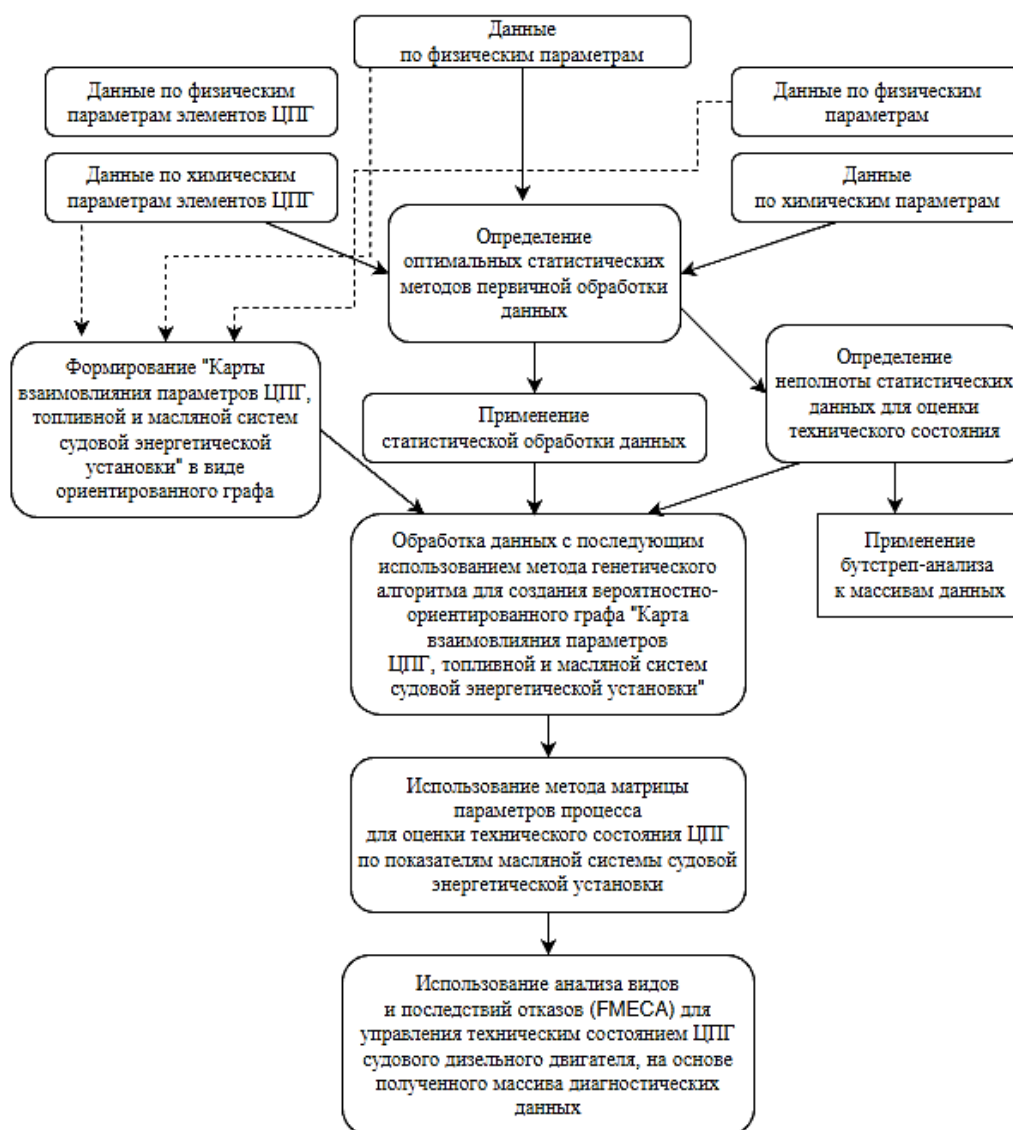


Рис. 5. Алгоритм комплексной методики оценки технического состояния ЦПГ судового дизельного двигателя через изменения параметров масляной системы

Fig. 5. The algorithm of a comprehensive methodology for assessing the technical condition of the marine diesel engine CPG through changes in the parameters of the oil system

Однако, безусловно, недостаточно установить лишь факты взаимовлияния параметров одних систем на другие и научиться определять с соответствующей вероятностью степени этих взаимовлияний. Это позволяет развить методы косвенного диагностирования и оценки технического состояния, но не позволяет осуществлять выработку рекомендаций и управления процессом эксплуатации в данном случае судовой энергетической установки.

Для полноценного применения создаваемой методики необходим и определенный «контур управления» техническим состоянием системы на основе сформированных на предыдущих этапах выводах. Для данной функции разумно использовать анализ видов и последствий отказов (FMECA) [14, 15]. С его помощью на основе полученных данных можно будет определить критичность и приоритетность в реализации мер по диагностированию и техническому обслуживанию ЦПГ судового дизельного двигателя. Он позволит провести идентификацию функциональных отказов системы и оценку тяжести их последствий и вероятности возникновения, а также разработать предложения по сокращению числа подобных отказов (модернизируя процедуры контроля и положения программы технического обслуживания систем судового дизельного двигателя).

Таким образом, представлен алгоритм методики, позволяющей на основе получаемых статистических данных, их комплексной аналитической и математической обработки и методов управления надежностью осуществлять оценку и управление техническим состоянием деталей и узлов ЦПГ судового дизельного двигателя, используя косвенные показатели работы масляной системы.

### **Заключение**

Очевидные ограничения, накладываемые классическими методами оценки технического состояния систем судовых энергетических установок на создаваемые модели, требуют поиска новых,

нетривиальных путей получения дополнительной диагностической информации. В основном в этом качестве различными исследователями предполагается использование косвенных данных от сопряженных систем. При этом в научной периодике существуют различные подходы к решению данной проблемы. Однако в большинстве своем они не предполагают установления вероятностной взаимосвязи между изменениями отдельных групп параметров различных подсистем судовой энергетической установки, а также использования специализированных приемов увеличения объема исходных данных и их последующей обработки через применение анализа критичности вида и последствий отказов.

Использование предлагаемого подхода и создание методики оценки технического состояния ЦПГ судовой двигательной установки на основе показателей смазочной системы, безусловно, требуют всестороннего дальнейшего изучения и апробации. При этом ключевыми звеньями являются точность построения карты взаимовлияния параметров в виде ориентированного графа, соответствие данных, получаемых методом бутстрепа, реальным законам распределения, адекватности вероятностной модели оценок и детальности статистического анализа.

Вместе с тем подобная методика может позволить существенно повысить эффективность работы энергомеханической службы на судах, увеличить выявляемость дефектов ЦПГ судовых энергетических установок на ранних стадиях, позволить более точно установить причины возникновения отказов. Важно также отметить необходимость не только апробации каждого из звеньев предлагаемой методики, но и создания программного обеспечения, позволяющего персоналу судна оперативно осуществлять соответствующие расчеты и получать выводы о надежности ЦПГ судовой энергетической установки по результатам данного предиктивного анализа.

### **Список источников**

1. Bazhenov Y., Kirillov A., Bazhenov M. Examination of engine cylinder-piston group damages // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. V. 896. N. 1. P. 012100.
2. Yin H., Zhang X., Guo Z., Xu Y., Rao X., Yuan C. Synergetic effects of surface textures with modified copper nanoparticles lubricant additives on the tribological properties of cylinder liner-piston ring // Tribology International. 2023. V. 178. P. 108085.
3. Grabon W., Pawlus P., Wos S., Koszela W., Wiczorowski M. Evolutions of cylinder liner surface texture and tribological performance of piston ring-liner assembly // Tribology International. 2018. V. 127. P. 545–556.
4. Ankobea-Ansah K., Hall C. M. A hybrid physics-based and stochastic neural network model structure for diesel engine combustion events // Vehicles. 2022. V. 4. N. 1. P. 259–296.
5. Wang W., Hussin B., Jefferis T. A case study of condition based maintenance modelling based upon the oil analysis data of marine diesel engines using stochastic filtering // International Journal of Production Economics. 2012. V. 136. N. 1. P. 84–92.
6. Reddy G. V., Krupakaran R. L., Tarigonda H., Reddy D. R., Rasu N. G. Energy balance and emission analysis on diesel engine using different thermal barrier coated pistons // Materials Today: Proceedings. 2021. V. 43. P. 646–654.
7. Wróblewski P. Investigation of energy losses of the internal combustion engine taking into account the correla-

tion of the hydrophobic and hydrophilic // *Energy*. 2023. V. 264. P. 126002.

8. Van Basshuysen R., Schäfer F. Internal combustion engine handbook. SAE International, 2016. 1130 p.

9. Петров Ю. Ю. Разработка и исследование математической модели генетического алгоритма для применения в технических системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ставрополь, 2008. 22 с.

10. Efron B., Tibshirani R. J. An introduction to the bootstrap. CRC press, 1994. 43 p.

11. Мазур Е. В., Великанов Н. Л., Мазур В. С. Разработка компьютерной программы для анализа структурной целостности элементов судового двигателя // *Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова*. 2023. Т. 15. № 4. С. 701–714.

12. Щербань П. С., Абу-Хамди Р. В., Карагадян А. Н.

Использование библиотеки Scikit-learn и собственной программы по кластеризации для обработки статистических данных по отказам двухконтурных газовых котлов // *System Analysis and Mathematical Modeling*. 2023. Т. 5. № 2. С. 172–191.

13. Shcherban P., Sokolov A., Abu Hamdi R. V. Study of failure statistics of cavitators in the fuel oil facilities through the application of regression and cluster analysis // *Proceedings on Engineering Sciences*. 2023. V. 5. N. 1. P. 39–48.

14. ГОСТ Р 27.303-2021. Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. 65 с.

15. ГОСТ Р 27.606-2013. Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность. М.: Стандартинформ, 2014. 34 с.

## References

1. Bazhenov Y., Kirillov A., Bazhenov M. Examination of engine cylinder-piston group damages. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020, vol. 896, no. 1, p. 012100.

2. Yin H., Zhang X., Guo Z., Xu Y., Rao X., Yuan C. Synergetic effects of surface textures with modified copper nanoparticles lubricant additives on the tribological properties of cylinder liner-piston ring. *Tribology International*, 2023, vol. 178, p. 108085.

3. Grabon W., Pawlus P., Wos S., Koszela W., Wiczcowski M. Evolutions of cylinder liner surface texture and tribological performance of piston ring-liner assembly. *Tribology International*, 2018, vol. 127, pp. 545-556.

4. Ankobea-Ansah K., Hall C. M. A hybrid physics-based and stochastic neural network model structure for diesel engine combustion events. *Vehicles*, 2022, vol. 4, no. 1, pp. 259-296.

5. Wang W., Hussin B., Jefferis T. A case study of condition based maintenance modelling based upon the oil analysis data of marine diesel engines using stochastic filtering. *International Journal of Production Economics*, 2012, vol. 136, no. 1, pp. 84-92.

6. Reddy G. V., Krupakaran R. L., Tarigonda H., Reddy D. R., Rasu N. G. Energy balance and emission analysis on diesel engine using different thermal barrier coated pistons. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 43, pp. 646-654.

7. Wróblewski P. Investigation of energy losses of the internal combustion engine taking into account the correlation of the hydrophobic and hydrophilic. *Energy*, 2023, vol. 264, p. 126002.

8. Van Basshuysen R., Schäfer F. Internal combustion engine handbook. SAE International, 2016. 1130 p.

9. Petrov Iu. Iu. *Razrabotka i issledovanie matematicheskoi modeli geneticheskogo algoritma dlia primeneniia v tekhnicheskikh sistemakh: avtoreferat dis. ... kand. tekhn.*

*nauk* [Development and research of a mathematical model of a genetic algorithm for use in technical systems: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences]. Stavropol', 2008. 22 p.

10. Efron B., Tibshirani R. J. *An introduction to the bootstrap*. CRC press, 1994. 43 p.

11. Mazur E. V., Velikanov N. L., Mazur V. S. *Razrabotka komp'uternoi programmy dlia analiza strukturnoi tselostnosti elementov sudovogo dvigatelja* [Development of a computer program for analyzing the structural integrity of marine engine components]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 701-714.

12. Shcherban' P. S., Abu-Khamdi R. V., Karagadian A. N. *Ispol'zovanie biblioteki Scikit-learn i sobstvennoi programmy po klasterizatsii dlia obrabotki statisticheskikh dannykh po otkazam dvukhkoturnykh gazovykh kotlov* [Using the Scikit-learn library and its own clustering program for processing statistical data on failures of double-circuit gas boilers]. *System Analysis and Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 2, pp. 172-191.

13. Shcherban P., Sokolov A., Abu Hamdi R. V. Study of failure statistics of cavitators in the fuel oil facilities through the application of regression and cluster analysis. *Proceedings on Engineering Sciences*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 39-48.

14. *GOST R 27.303-2021. Nadezhnost' v tekhnike. Analiz vidov i posledstviy otkazov* [ISS R 27.303-2021. Reliability in technology. Analysis of the types and consequences of failures]. Moscow, Ros. in-t standartizatsii, 2021. 65 p.

15. *GOST R 27.606-2013. Nadezhnost' v tekhnike. Upravlenie nadezhnost'iu. Tekhnicheskoe obsluzhivanie, orientirovannoe na bezotkaznost'* [ISS R 27.606-2013. Reliability in technology. Reliability management. Maintenance focused on reliability]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 34 p.

Статья поступила в редакцию 20.11.2023; одобрена после рецензирования 30.01.2024; принята к публикации 07.02.2024  
The article was submitted 20.11.2023; approved after reviewing 30.01.2024; accepted for publication 07.02.2024

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Екатерина Владимировна Мазур** — ассистент высшей школы нанотехнологий и инженерии; Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта; ekaterina.mazur@gmail.com

**Николай Леонидович Великанов** — доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой судостроения, судоремонта и морской техники; Калининградский государственный технический университет; nikolaj.velikanov@klgtu.ru

**Григорий Евгеньевич Ананьев** — магистрант высшей школы нанотехнологий и инженерии; Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта; thepinkidie@bk.ru

**Ekaterina V. Mazur** — Lecturer of the Higher School of Nanotechnology and Engineering; Immanuel Kant Baltic Federal University; ekaterina.mazur@gmail.com

**Nikolaj L. Velikanov** — Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Shipbuilding, Ship Repair and Marine Engineering; Kaliningrad State Technical University; nikolaj.velikanov@klgtu.ru

**Grigorii E. Ananьев** — Master's Course Student of the Higher School of Nanotechnology and Engineering; Immanuel Kant Baltic Federal University; thepinkidie@bk.ru

