

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ МЕТОДАМИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

А.В. Кулагин

НИИ (ВСИ МТО ВС РФ) ВА МТО, Санкт-Петербург

Рассмотрены вопросы оценки работоспособности судовых дизелей по показателю остаточного ресурса при использовании различных методов диагностирования. Выполнен анализ преимуществ и недостатков методов диагностирования с применением инструментального контроля состояния рабочих параметров и с использованием анализа результатов регистрации внутрицилиндровых процессов. Приведены методы оценки состояния дизеля с целью определения мероприятий для восстановления остаточного ресурса, регламентированные для применения в атомной энергетике. Показано, что не существует универсальных диагностических методов, гарантирующих точную оценку работоспособности и остаточного ресурса судовых дизелей.

При подготовке корабля (судна) к плаванию одним из основных вопросов является проверка работоспособности его технических средств. Применительно к судовым энергетическим установкам это означает приведение в готовность главных двигателей к даче хода и вспомогательных двигателей к приему нагрузки [8]. Проверка работоспособности дизеля, ставит перед механиком (электромехаником) корабля (судна) две задачи:

- оценка состояния дизеля с целью определения с назначенной вероятностью остатка ресурса;

- оценка состояния дизеля с целью определения мероприятий для восстановления ресурса.

Логично было бы предусмотреть такой алгоритм действий, который бы позволил в ограниченное время, с большой долей вероятности решить эти задачи. Один из вариантов их решения — по диагностическим признакам определить техническое состояние исследуемого дизеля, выдав прогноз по надежности и спрогнозировать мероприятия по восстановлению технической готовности. В силу объективных причин, и прежде всего различий требуемой исходной информации найти решение указанных задач одновременно невозможно. Следовательно, задачи необходимо решать последовательно, разработав для решения каждой свой метод решения (в принятой постановке — метод диагностирования). К сожалению, универсальных методов решения для

каждого конкретного дизеля, на различных этапах жизненного цикла не существует, поэтому необходимо использовать различные методы диагностирования.

Для решения первой задачи можно использовать два различных подхода [6]. Первый подход состоит в том, чтобы определить общее состояние дизеля по косвенным признакам. При этом количество признаков может быть различным и характеризовать эти признаки могут различные состояния дизеля. Наиболее точную информацию могут дать различные датчики. Недостатками этого подхода являются:

- большой объем датчиков, например по данным исследования [9] система диагностики автомобильного дизеля требует от 15 до 20 различных датчиков и до 150 справочных таблиц;

- система транспортировки информации является уязвимой от внешних воздействий (типичным дефектом является потеря сопротивления изоляции проводов в условиях корабля (судна);

- большая трудоемкость монтажа и обслуживания.

Несмотря на недостатки, этот подход получил широкое распространение. Именно на этих принципах построены алгоритмы диагностирования предложенные фирмами AVL (Австрия), «Kestler» (Германия), «Autronica» (Норвегия), НПК «Гарант» (Россия) и др.

В НПК «Гарант», (г. Санкт-Петербург) разработан отечественный диагностический комплекс «Дизель-Адмирал-12М». Диагностика производится по следующим параметрам:

- максимальное давление в цилиндре дизеля (диапазон измерения от 0 до 20 МПа);

- частота вращения коленчатого вала (диапазон измерения до 2500 об/мин);

- давление наддува (диапазон измерения от 0 до 0,25 МПа);

- давление подачи топлива (диапазон измерения от 0 до 100 МПа);

- среднее индикаторное давление.

Еще одной разновидностью метрологического подхода является экспресс-диагностика по визуальным признакам или штатным приборам. По цвету отработавших газов судят о состоянии прокладок головки блока цилиндров, или о состоянии маслосъемных колец.

Второй подход характеризуется данными обработки индикаторной диаграммы и оценке состояния дизеля на основе расчетов, прежде всего по давлению в цилиндрах дизеля. К основным недостаткам этого метода относятся:

- сложность обработки индикаторной диаграммы (необходимость использования квалифицированного персонала;
- невозможность диагностировать системы и компоненты дизеля, например, систему наддува и турбокомпрессор. Действительно, что возможно в условиях завода, то может быть невостребованным при длительном нахождении корабля (судна) в море.

Очевидно, что в условиях плавания, наибольшее распространение получил подход оценки общего состояния дизеля по косвенным признакам. Для использования этого метода диагностирования представим дизель в виде регрессионной модели (рис. 1).

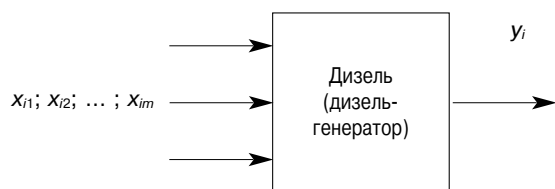


Рис. 1. Регрессионная модель дизеля (дизель-генератора)

Регрессионная модель в общем виде записывается так [5]:

$$y_i = F(\alpha; x_{i1}; x_{i2}; \dots; x_{im}) + \varepsilon_i, \quad i = 1, n, \quad (1)$$

где $F(\alpha; x_{i1}; x_{i2}; \dots; x_{im})$ — некоторая вещественная аппроксимирующая функция; $\varepsilon_i, i = 1, n$ — ошибки аппроксимации; α — вектор неизвестных параметров модели; $y_i, i = 1, n$ — значения независимой (объясняющей, выходной) переменной; $x_i, i = 1, n; j = 1, m$ — значения независимой (объясняющей, входной) переменной; n — количество наблюдений; m — количество независимых переменных.

Так как судовой дизель представляет собой сложную систему, которая характеризуется большим количеством параметров для облегчения моделирования при незначительном уменьшении достоверности можно прибегнуть к выделению наиболее важных (значимых) параметров, характеризующих состояние дизеля [2]. Целесообразно методом декомпозиции представить дизель в виде взаимосвязанных между собой систем. При этом задача исследования может быть сформулирована следующим образом — по изменению показателей на нижнем уровне декомпозиции выйти на условия выхода дизеля (дизель-генератора) из строя в целом, иными словами выйти на критические изменения

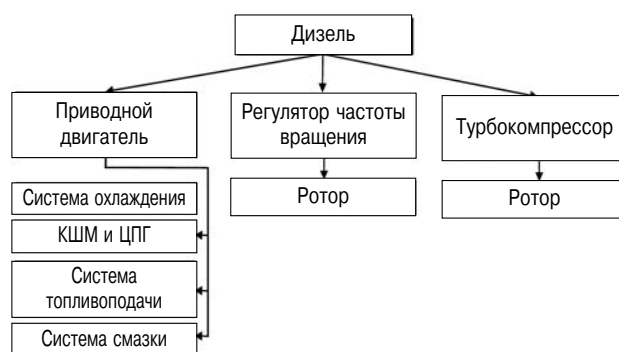


Рис. 2. Пример декомпозиции дизеля как тепловой машины

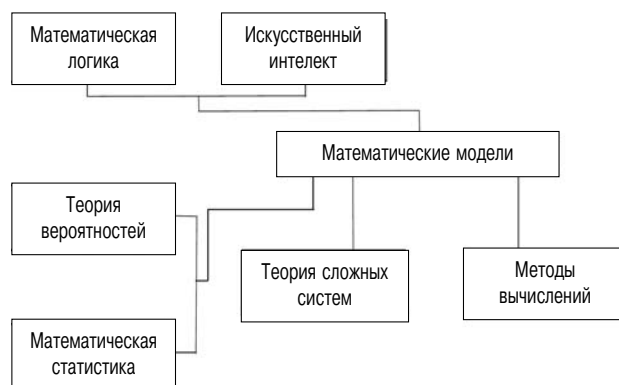


Рис. 3. Математический аппарат, применяемый для моделирования процессов, протекающих в дизеле (дизель-генераторе)

верхнего уровня. Пример декомпозиции представлен на рис. 2.

Каждая система дизеля (дизель-генератора) характеризуется состоянием входящих в ее состав агрегатов и компонентов. Представив дизель в виде взаимосвязанных систем можно приступить к математическому моделированию процессов, происходящих внутри указанных систем. Наиболее общими являются такие модели, которые получены путем объединения всех видов моделей [1]. В зависимости от цели конкретного исследования предлагается различный инструментарий. Пример математического аппарата, для моделирования процессов, протекающих в дизеле (дизель-генераторе) приведен на рис. 3.

Наиболее значимые работы по методам моделирования процессов, происходящих в дизеле, выполнены профессором Васильевым-Южиным Р.М. [3]. Им было предложено связать диагностические параметры со структурными при помощи линейных зависимостей. В основу этого метода положено утверждение, что диагностическая модель может быть представлена в виде системы линейных однородных уравнений в форме малых отклонений (2).

$$\left. \begin{aligned} K_{1-1}\delta_{x1} + K_{1-2}\delta_{x2} + \dots + K_{1-n}\delta_{xn} &= \delta_{y1} \\ \dots & \\ K_{j-1}\delta_{x1} + K_{j-2}\delta_{x2} + \dots + K_{j-n}\delta_{xn} &= \delta_{yj} \\ \dots & \\ K_{n-1}\delta_{x1} + K_{n-2}\delta_{x2} + \dots + K_{n-n}\delta_{xn} &= \delta_{yn} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где x_i — структурный параметр; y_i — диагностический параметр; δ_{xi} — относительное приращение структурного параметра; δ_{yi} — относительное приращение диагностического параметра; K_{j-i} — коэффициент влияния.

Расчет относительного приращения структурного параметра выполняется исходя из следующей зависимости:

$$\delta_{xi} = \frac{\Delta xi}{xi0} = \frac{xi - xi0}{xi0}, \quad (3)$$

где $xi0$ — эталонный структурный параметр.

$$\delta_{yi} = \frac{\Delta yi}{yi0} = \frac{yi - yi0}{yi0}, \quad (4)$$

где $yi0$ — эталонный диагностический параметр.

Решение второй задачи состоит в оценке достоверности, что по существу, означает определение вероятности сохранения работоспособности. Однако определение работоспособности так же влечет за собой ряд вопросов, которые можно сформулировать следующим образом:

- является ли нарушением работоспособности эксплуатация дизеля с отклонением от рабочих параметров, определенных предприятием-изготовителем;
- является ли нарушением работоспособности эксплуатация дизеля с неисправной (отключенной) автоматикой и системами защиты;
- является ли нарушением эксплуатация дизеля с просроченными межремонтными сроками (или не проведенным в установленный срок техническим обслуживанием).

В условиях неопределенности и различных условий толкования эксплуатационной документации правомерно изложить лишь общие подходы к решению задачи оценки состояния дизеля с целью определения мероприятий для восстановления ресурса. Действительно сложно сравнивать условия работы стояночного дизель-генератора сухогруза и главного дизеля боевого корабля в условиях боевой обстановки.

Наиболее полно вопросы оценки состояния дизеля как тепловой машины регламентируются в атомной энергетике [4]. Общий алгоритм определения мероприятий для восстановления ресурса можно представить в виде блок-схемы, приведенной на рис. 4.

Основным показателем, фигурирующим в гарантийных обязательствах заводов-изготовителей является наработка дизеля. Суть этого показателя

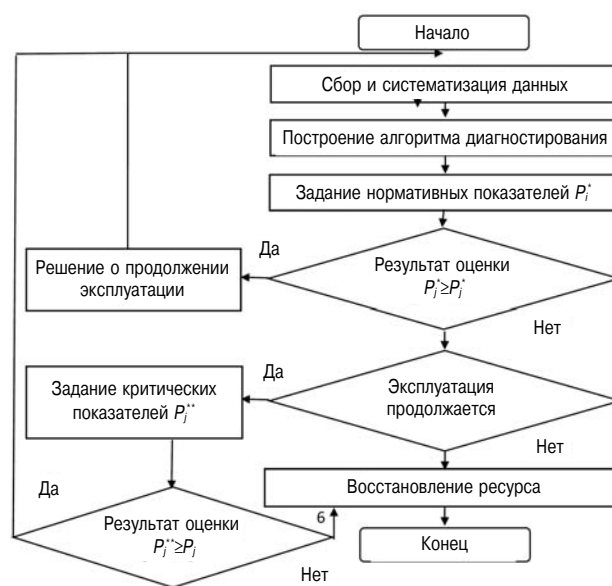


Рис. 4. Алгоритм оценки состояния дизеля

заключается в определении гарантированного времени работы дизеля с заранее определенной вероятностью.

Наработка дизеля при эксплуатации в сложных условиях рассчитывается по эмпирической формуле [7], где все члены выражены в часах:

$$He = ad + Hr + C, \quad (5)$$

здесь He — эквивалентная наработка (моторесурс); a — коэффициент эквивалентности (величина зависит от условий запуска и скорости вращения коленчатого вала); d — число пусков дизеля во время эксплуатации; Hr — время реального функционирования; C — затраты ресурса на естественное старение деталей в режиме ожидания.

Тогда задача по определению остаточного ресурса сводится к экстраполяции функции состояния дизеля и определения предельного показателя вероятностной работоспособности. В общем виде по результатам наблюдений можно определить функцию состояния дизеля:

$$Y_{t+l} = f(Y_t, l), \quad (6)$$

где Y_{t+l} — экстраполируемое значение уровня; l — период упреждения; Y_t — уровень, принятый за базу экстраполяции.

Модель зависимости определяющих параметров от времени экстраполяции выбирается исходя из характера их изменения при проведении периодических плановых измерений. Определение предельного показателя вероятностной работоспособности дизеля зависит от условий эксплуатации самого дизеля и требований к его надежности.

В заключении необходимо отметить, что на сегодняшний день не существует универсальных диагностических методов оценки работоспо-

собности дизеля. Исходя из условий эксплуатации, квалификации механиков, возможностей обработки информации, наконец, от средств диагностирования выбираются те или иные диагностические методы. Прогнозы, полученные таким путем, позволяют принимать те или иные эксплуатационные решения, определять текущее состояние дизеля, как тепловой машины и организовывать ремонт по фактическому техническому состоянию.

Литература

1. *Гайкович А.И.* Основы теории проектирования сложных технических систем. СПб : Моринтех, 2001 432с.
2. *Гаврилов В.В., Мащенко В.Ю.* Принципы построения иерархического комплекса систем диагностирования судового дизеля // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2016. № 3(37). С. 155–166. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-155-166].
3. *Васильев-Южин Р.М.* Корабельные двигатели внутреннего сгорания : [Учебник для курсантов высш. воен.-мор. инж. училищ : В 3 ч.] : Ч. 1- / Ленингр. высш. воен.-мор. инж. училище им. В.И. Ленина. Ленинград : Б. и., 1975.
4. ГОСТ Р 58341.2–2019 «Дизель-генераторные установки атомных станций. Учет фактически выработанного ресурса и оценка технического ресурса»
5. *Караулова А.В., Базилевский М.П.* Применение регрессионного анализа при решении реальных задач технического характера // Молодая наука Сибири : электрон. Науч. Журн. 2020. № 3 (9). Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/39-2020>. Загл. с экрана. Яз. Рус., англ. (дата обращения: 20.10.2020)
6. *Конькова И.Д.* Диагностирование тепловозного дизеля по сигналу скорости изменения внутрицилиндрового давления: дисс. ... канд. тех. наук. Хабаровск 2020, 154 с.
7. РД ЭО 0195-00 «Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса дизель-генераторных установок АС».
8. Руководство по подготовке кораблей (судов) Военно-морского флота к плаванию, утверждено приказом главнокомандующего Военно-Морским Флотом от 1 июля 2015 года № 660.
9. *Izerman R.* Combustion Engine Diagnosis: Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components; Springer-Verlag GmbH Germany, 2017, 303 p.