

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_sdvs@gumrf.ru
Ерофеев Валентин Леонидович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_sdvs@gumrf.ru
Пряхин Александр Сергеевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
pralser@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezyukov Oleg Konstantinovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_sdvs@gumrf.ru
Erofeyev Valentin Leonidovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_sdvs@gumrf.ru
Pryakhin Alexander Sergeyevich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
pralser@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 18 февраля 2016 г.

УДК 621.436

**В. В. Гаврилов,
В. Ю. Машенко**

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЕРАРХИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ**

Ввиду наличия весьма значительного числа факторов, влияющих на техническое состояние дизеля, невозможно создать единую диагностическую систему для выявления в достаточном объеме неисправностей, снижающих его топливную экономичность, поэтому в практике эксплуатации дизеля приходится применять набор, как правило, несогласованных между собой средств диагностирования. В статье описан предложенный авторами подход к созданию иерархического комплекса систем диагностирования дизеля, состоящего из общей и ряда локальных систем. Охарактеризована взаимная связь этих систем. Работа общей системы диагностирования основана на использовании результатов анализа индикаторных диаграмм, который позволяет ограничить область последующего поиска неисправности дизеля посредством локальных систем. Разработана локальная система диагностирования топливной аппаратуры, основанная на применении виброакустического метода измерений и результатов анализа виброграмм. Обоснован состав структурных и диагностических параметров для реализации общей и локальной систем диагностирования дизеля. Связь между указанными параметрами установлена в виде диагностических математических моделей, которые в данном случае разработаны с использованием метода малых отклонений. Применение предложенного комплекса систем диагностирования в процессе эксплуатации позволит оценить текущее техническое состояние дизеля и дать его прогноз.

Ключевые слова: техническое состояние дизеля, функциональное диагностирование, индикаторная диаграмма, топливная аппаратура, структурные и диагностические параметры, применение виброакустического метода.

Введение

Для обеспечения высоких показателей экономичности, надёжности, экологических показателей, низких затрат на эксплуатацию судовых дизелей требуется применение современных диагностических систем. В условиях эксплуатации особенно важно иметь возможность применять функциональное диагностирование, которое позволяет своевременно выявлять наличие и

местоположение дефекта, определять степень работоспособности дизеля и прогнозировать его возможный отказ. С учётом прогноза может быть выбран тот или иной вариант эксплуатации [1]. При этом весьма актуальной является задача количественных оценок технического состояния объекта [2].

Техническое состояние дизеля может быть охарактеризовано большим числом показателей, каждый из которых (а также та или иная их совокупность) может быть задан огромным числом конструктивных и регулировочных параметров (структурных параметров) [3] – [6]. Так, например, при диагностировании только топливной аппаратуры дизеля могут быть использованы до 30 структурных параметров [7]. Для оценки изменения указанных параметров в ходе эксплуатации и, следовательно, для оценки технического состояния требуется применение соответствующей диагностической системы. Очевидно, что для осуществления функционального диагностирования целесообразно применять средства так называемого безразборного определения технического состояния. Решение задачи диагностирования должно быть основано на использовании диагностической модели, устанавливающей связи между структурными и диагностическими параметрами. Указанные связи могут быть выражены математическими или иными формализованными описаниями объекта диагностирования [1]. Ввиду чрезвычайной сложности экспериментальных методов описания этих связей, современный подход к решению задачи состоит в применении математических диагностических моделей [2].

С учётом изложенного авторы сформулировали цель данного этапа исследования, которая состоит, во-первых, в разработке общего подхода к построению системы диагностирования дизеля, позволяющей определить его техническое состояние в условиях влияния на это состояние большого числа структурных параметров, и, во-вторых, в разработке примера реализации указанного подхода.

Общий подход к построению системы диагностирования дизеля

Так как техническое состояние дизеля определяется огромным числом структурных параметров, диагностическая модель может оказаться весьма громоздкой и сложной для использования. Попытка разработки соответствующей математической модели объекта диагностирования не может быть плодотворной ввиду значительных вычислительных погрешностей, вызванных большим числом оцениваемых переменных, поэтому мы предлагаем разработать и применить *иерархический комплекс диагностических систем*, состоящий из общей и ряда локальных диагностических систем. При этом использование общей системы может позволить ограничить область последующего поиска диагностической информации, т. е. выбрать соответствующую локальную систему. В данном случае тот или иной структурный параметр общей системы диагностирования может играть роль диагностического параметра в локальной системе. Предполагается, что возможна разработка многоуровневого иерархического комплекса диагностических систем, в котором «взаимодействие» системы некоторого уровня с системой следующего, более низкого уровня аналогично описанному «взаимодействию» общей и локальной систем.

Допустим, предлагаемый диагностический комплекс предназначен для решения основной задачи — обеспечения требуемой топливной экономичности дизеля, которая зависит преимущественно от эффективности рабочего цикла, оцениваемой индикаторным КПД. Указанный КПД непосредственно зависит от качества внутрицилиндровых процессов, которое может быть отражено в параметрах индикаторной диаграммы. Её параметры в значительной мере зависят от технического состояния двигателя, главным образом — от состояния его топливной аппаратуры (ТА), системы воздухообеспечения, а также гидроплотности рабочего цилиндра, определяемой, в свою очередь, состоянием поршневых колец и клапанов механизма газораспределения. Таким образом, общая диагностическая система должна быть основана на использовании результатов индицирования рабочего процесса дизеля. Локальных систем диагностирования следующего, более низкого уровня может быть три — по числу основных компонентов дизеля: топливная аппаратура, система воздухообеспечения и рабочий цилиндр.

Предлагаемая структура иерархического комплекса позволяет, с одной стороны, сократить время поиска компонента дизеля, содержащего неисправность, а с другой стороны, обеспечить необходимую глубину поиска дефекта за счёт использования той или иной локальной системы диагностирования.

Индицирование рабочего процесса как средство реализации общей системы диагностирования дизеля

Использованию индикаторных диаграмм для оценки технического состояния дизеля посвящены многие современные работы [8] – [12]. Полученные в экспериментах зависимости давления в рабочем цилиндре от времени или угла поворота коленчатого вала (п.к.в.) применяются во многих современных комплексах технической диагностики. Однако при использовании большинства известных комплексов, во-первых, отсутствует возможность локализации неисправностей и, тем более — прогнозирования их развития, во-вторых, не предусмотрена возможность определения по индикаторным диаграммам параметров процесса горения топлива. Очевидно, что эти параметры могут обладать весьма значительной информативностью при решении задач диагностирования.

Состав и число переменных в уравнениях известных диагностических моделях выбирают в зависимости от особенностей метода решения задачи и измерительных возможностей для оценки структурных параметров. Например, авторы [8] разработали метод идентификации технического состояния двигателя, основанный на сопоставлении экспериментально зарегистрированной и расчётной индикаторных диаграмм с математической имитацией неисправностей. При этом в качестве диагностических параметров выбран следующий набор величин: изменение геометрической степени сжатия; изменение массы рабочего тела в цилиндре из-за утечек через неплотности; угол закрытия впускного клапана; параметры характеристики впрыскивания топлива; угол действительного опережения подачи топлива; массовая цикловая подача топлива. На наш взгляд, при построении предлагаемого иерархического диагностического комплекса в общей диагностической системе, основанной на использовании индицирования рабочего процесса, перечисленные величины скорее должны играть роль структурных параметров.

Итак, в нашей работе в качестве результатов индицирования целесообразно использовать собственно индикаторную диаграмму и полученные путём математического анализа диаграммы так называемые характеристики тепловыделения при сгорании топлива [13]. С учётом возможностей указанных средств диагностическими параметрами могут быть приняты параметры индикаторной диаграммы и характеристик тепловыделения:

- p_c — давление рабочего тела в конце процесса сжатия, МПа;
- p_z — максимальное давление рабочего цикла, МПа;
- $\varphi_{\text{сам}}$ — угол самовоспламенения (угол между точкой самовоспламенения горючей смеси и ВМТ поршня на диаграмме, выраженный в градусах п.к.в.;
- $(dx / d\varphi)_{\text{max}}$ — максимальная скорость относительного тепловыделения (или $(dp / d\varphi)_{\text{max}}$ — «жесткость» процесса сгорания, МПа / °п.к.в.);
- $\varphi_{\text{сгор}}$ — продолжительность сгорания, °п.к.в.

Перечисленные параметры отражены на рис. 1.

Количество выделенных независимых диагностических параметров (в данном случае — пять) определяет максимальное число структурных параметров дизеля, которое может быть включено в диагностическую математическую модель. Диагностическая модель представляет собой систему уравнений. С учётом очевидных требований о равенстве числа неизвестных числу уравнений, количество структурных параметров в данном случае должно быть не более пяти. Из большого числа возможных вариантов выбраны пять наиболее важных параметров, характеризующих техническое состояние указанных элементов дизеля и существенно влияющих на его индикаторный КПД.

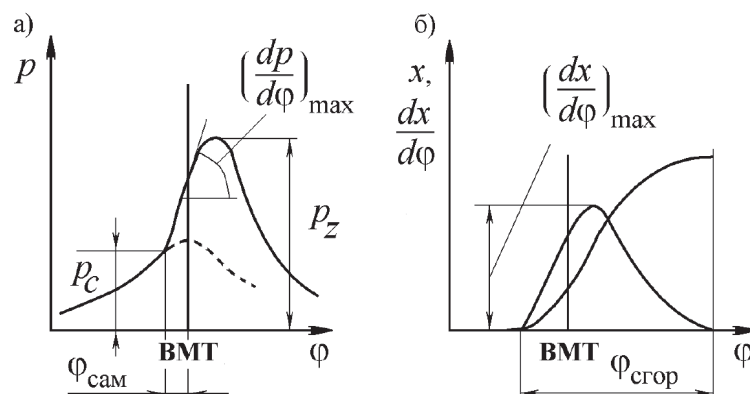


Рис. 1. Диагностические параметры по результатам индицирования рабочего процесса дизеля:
а — по индикаторной диаграмме; б — по кривым тепловыделения при сгорании топлива

Выбранные структурные параметры должны быть независимыми. Их изменение не должно вызывать разрывов функций диагностических параметров. Последнее требование означает, что с использованием разрабатываемой математической модели будет возможно диагностировать так называемые постепенные отказы [14]. В данном случае в состав структурных параметров могут быть включены:

- $\varphi_{\text{ф}}$ — продолжительность подачи топлива форсункой, °п.к.в.;
- $(\varphi_{\text{сам}} - \varphi_{\text{нпп}})$ — продолжительность периода между самовоспламенением и так называемым геометрическим началом топливоподачи топливным насосом высокого давления (ТНВД), °п.к.в.;
- $p_{\text{к}}$ — давление наддува, МПа;
- $T_{\text{к}}$ — температура наддувочного воздуха, К;
- $\Delta m_{\text{р.т}}$ — суммарная масса утечек рабочего тела из полости цилиндра через зазоры в цилиндро-поршневой группе и клапанах механизма газораспределения, кг.

Заметим, что приведенный перечень параметров является предварительным. Предстоящие исследования позволят оценить уровень информативности предложенных диагностических параметров, а также выявить иные существенные структуроразрушающие факторы и соответствующие структурные параметры.

Локальная система диагностирования топливной аппаратуры дизеля

В порядке реализации предложенных нами принципов построения иерархического комплекса диагностических систем наряду с описанной общей системой рассмотрим одну из важнейших локальных систем — систему диагностирования топливной аппаратуры дизеля. Прежде всего, необходимо обосновать набор структурных и диагностических параметров. При этом следует учесть, что разрабатываемая локальная система может использоваться как в составе общей системы, так и вне общей системы, т. е. может быть предназначена для оценки технического состояния исключительно ТА. В последнем случае некоторая часть структурных параметров локальной системы может совпадать со структурными параметрами общей системы. Большое число структурных параметров в локальной системе означает лучшие её возможности в выявлении местоположения неисправностей и в прогнозировании отказов.

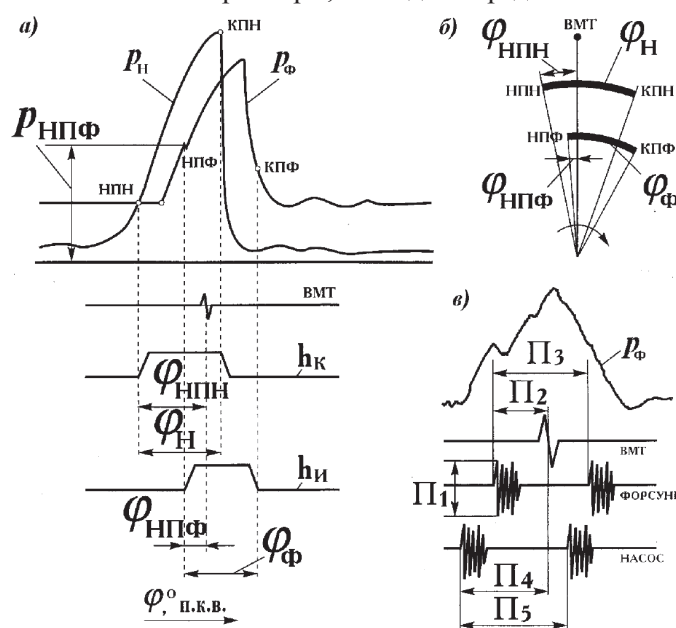
Выбор структурных параметров ТА должен основываться на анализе возможных нарушений в её нормальном функционировании. Перечислим основные нарушения в работе форсунки и топливного насоса высокого давления (ТНВД), которые существенно влияют на эффективность рабочего цикла дизеля и которые могут быть выражены в изменениях соответствующих структурных параметров. К числу отказов форсунки относятся: зависание иглы; поломка пружины; уменьшение жёсткости пружины; закупорка части сопловых отверстий и их износ; износ запирающего конуса; износ прецизионной пары игла – направляющая. К основным отказам ТНВД можно отнести: «прихват» и «заклинивание» плунжера; износ плунжерной пары (плунжера и втулки); появление и развитие

трещин в корпусе насоса; отклонение от заданного геометрического угла начала подачи топлива насосом (вызывающее соответствующее отклонение начала подачи форсункой); возрастание степени неравномерности цикловой подачи по цилиндрам (проявляющееся, в частности, в увеличении межцилиндровой неравномерности продолжительности подачи топлива форсункой); неисправности, вызывающие нежелательный дополнительный подъём иглы форсунки при впрыскивании топлива.

С учётом возможностей предполагаемых средств измерения нами составлен перечень диагностических параметров, контролируя которые можно оценить некоторые структурные параметры, непосредственно отражающие техническое состояние ТА. Диагностические параметры ТА таковы:

- 1) $p_{\text{нпф}}$ — давление начала подачи топлива форсункой, МПа;
- 2) $\varphi_{\text{нпф}}$ — угол начала подачи форсункой относительно ВМТ, °п.к.в.;
- 3) $\varphi_{\text{ф}}$ — продолжительность подачи топлива форсункой, °п.к.в.;
- 4) $\varphi_{\text{нпн}}$ — угол фактического начала подачи топлива насосом относительно ВМТ, °п.к.в.;
- 5) $\varphi_{\text{н}}$ — продолжительность фактической подачи топлива насосом, °п.к.в.;
- 6)* $\varphi_{\text{кпф}}$ — угол окончания подачи форсункой относительно ВМТ, °п.к.в.;
- 7)* $\varphi_{\text{кпн}}$ — угол окончания подачи топлива насосом относительно ВМТ, °п.к.в.;
- 8)* $\Delta\varphi_{\text{нач}}$ — угол запаздывания начала подачи топлива форсункой относительно угла фактического начала подачи насосом (кратко: «запаздывание начала подачи»), °п.к.в.;
- 9)* $\Delta\varphi_{\text{оконч}}$ — угол запаздывания окончания подачи топлива форсункой относительно угла окончания подачи насосом (кратко — «запаздывание окончания подачи»), °п.к.в.

В представленном перечне часть диагностических параметров (пп. 1 – 5) можно считать независимыми, а другую часть параметров, помеченных звёздочкой (пп. 6 – 9) — зависимыми, которые могут быть вычислены по известным параметрам 1 – 5. Таким образом, для использования в нашей работе выбраны перечисленные независимые параметры, наглядное представление о которых даёт рис. 2.



1	$p_{\text{нпф}}$	ДАВЛЕНИЕ НАЧАЛА ПОДАЧИ ФОРСУНКОЙ	Π_1
2	$\varphi_{\text{нпф}}$	УГОЛ НАЧАЛА ПОДАЧИ ФОРСУНКОЙ ОТН. ВМТ	Π_2
3	$\varphi_{\text{ф}}$	ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПОДАЧИ ФОРСУНКОЙ	Π_3
4	$\varphi_{\text{нпн}}$	УГОЛ ФАКТИЧЕСКОГО НАЧАЛА ПОДАЧИ НАСОСОМ ОТН. ВМТ	Π_4
5	$\varphi_{\text{н}}$	ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПОДАЧИ НАСОСОМ	Π_5

Рис. 2. Диагностические параметры топливной аппаратуры дизеля:

a — осциллограммы давлений (после ТНВД и перед форсункой), отметки ВМТ, хода клапана ТНВД и иглы форсунки; b — фазовая диаграмма топливоподачи; c — виброграммы и соответствующие осциллограммы топливоподачи

Так же, как в описанной общей системе диагностирования, в данном случае количество перечисленных диагностических параметров (пять) должно соответствовать количеству структурных параметров ТА. Для выявления основных из перечисленных выше отказов в состав структурных включены следующие пять параметров:

- 1) $P_{\text{зат}}$ — сила затяжки пружины форсуночной иглы, Н;
- 2) $\Phi_{\text{нпп}}$ — угол геометрического начала подачи насосом относительно ВМТ, °п.к.в.;
- 3) $\Delta_{\text{пп}}$ — зазор в плунжерной паре, мкм;
- 4) $\Delta_{\text{иф}}$ — зазор в паре игла – направляющая форсунки, мкм;
- 5) $\mu f_{\text{со}}$ — площадь суммарного эффективного проходного сечения сопловых отверстий форсунки, мм².

Теоретический анализ показывает, что изменение каждого из перечисленных структурных параметров в отдельности, а также совокупное их изменение в любом сочетании вызывает соответствующее изменение выделенных нами диагностических параметров.

Многие из прочих неучтённых в перечне структурных параметров характеризуют внезапные отказы ТА, выявление которых должно предшествовать применению диагностической математической модели. К таким отказам относятся, например, зависание плунжера ТНВД, зависание иглы форсунки, появление трещин в корпусных деталях и в топливном трубопроводе высокого давления. Эти отказы могут быть обнаружены как средствами диагностики, так и обычными штатными приборами дизеля. Например, при использовании средств виброакустической диагностики отказы можно регистрировать либо по отсутствию виброимпульсов (при зависании плунжера), либо по значительному изменению их формы и параметров. Вероятность одновременного появления двух и более рассматриваемых отказов ничтожно мала. Поэтому каждый из них можно идентифицировать по результатам предварительного физического моделирования этих отказов.

Выбираемый метод диагностирования ТА должен позволить получить некий комплекс структурных параметров, который определённым образом связан с соответствующим комплексом диагностических параметров. Анализ этих связей должен позволить сделать однозначный вывод о техническом состоянии ТА и степени изношенности её элементов.

Традиционным методом диагностирования ТА является так называемый «метод измерения амплитудно-фазовых параметров изменения давления в нагнетательной магистрали топливной системы». При реализации метода записывают осциллограммы давления перед форсункой. Суть метода состоит в оценке качества процесса впрыскивания топлива и состояния ТА по параметрам кривой давления и по расположению её относительно отметки ВМТ поршня. Описывая положительные свойства этого метода, авторы отмечают ограниченность его возможностей [15]. К опубликованному анализу добавим, что для реализации рассматриваемого метода необходимо размещать в топливном трубопроводе высокого давления специального датчика давления, что в условиях эксплуатации может оказаться весьма проблематичным. К тому же имеет место проблема обеспечения необходимых ресурса и стабильности метрологических свойств датчика. Изложенное позволяет заключить, что описываемый метод диагностирования применим преимущественно в заводских и исследовательских испытаниях дизеля.

При эксплуатации дизеля для оценки технического состояния ТА целесообразно применять метод диагностирования, основанный на использовании простых, надёжных, универсальных средств. Желательно, чтобы все элементы системы по отношению к объекту были внешними, легко устанавливаемыми на объекте и не искажающими происходящие в нём процессы. Система должна позволять выполнять операции диагностирования, по возможности, без вывода дизеля из нормального режима эксплуатации. Именно таким требованиям отвечает виброакустический метод [1], [16], [17].

В общем случае метод контроля вибрации включает в себя анализ так называемых «энергетических характеристик» — перемещений, скоростей и ускорений (считаем, правильнее назвать

$$\left. \begin{aligned} k_{1-1}\delta P_{\text{зат}} + k_{1-2}\delta\Phi_{\text{нпп}} + k_{1-3}\delta\Delta_{\text{пп}} + k_{1-4}\delta\Delta_{\text{иф}} + k_{1-5}\delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta p_{\text{нпф}}; \\ k_{2-1}\delta P_{\text{зат}} + k_{2-2}\delta\Phi_{\text{нпп}} + k_{2-3}\delta\Delta_{\text{пп}} + k_{2-4}\delta\Delta_{\text{иф}} + k_{2-5}\delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta\varphi_{\text{нпф}}; \\ k_{3-1}\delta P_{\text{зат}} + k_{3-2}\delta\Phi_{\text{нпп}} + k_{3-3}\delta\Delta_{\text{пп}} + k_{3-4}\delta\Delta_{\text{иф}} + k_{3-5}\delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta\varphi_{\text{ф}}; \\ k_{4-1}\delta P_{\text{зат}} + k_{4-2}\delta\Phi_{\text{нпп}} + k_{4-3}\delta\Delta_{\text{пп}} + k_{4-4}\delta\Delta_{\text{иф}} + k_{4-5}\delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta\varphi_{\text{нпп}}; \\ k_{5-1}\delta P_{\text{зат}} + k_{5-2}\delta\Phi_{\text{нпп}} + k_{5-3}\delta\Delta_{\text{пп}} + k_{5-4}\delta\Delta_{\text{иф}} + k_{5-5}\delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta\varphi_{\text{н}}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для реализации описанных принципов построения локальной диагностической системы ТА требуется, в частности, располагать значениями коэффициентов влияния в системе уравнений (4). Очевидно, что их необходимо определять для каждого диагностируемого дизеля. При этом желательно было бы выполнить соответствующие эксперименты либо на дизеле, либо на специально оборудованном топливном стенде. Это весьма трудоёмкая работа. Поэтому для решения указанной задачи, т. е. для описания количественных связей между структурными и диагностическими параметрами целесообразно использовать математическое моделирование процессов, происходящих в дизеле. Для этого может быть использована разработанная нами математическая модель внутрицилиндровых процессов и топливоподачи, реализованная в авторской программе «CyberDiesel» [18], [19].

Применительно к дизелю типа ДН 23/30, для которого в нашем распоряжении имеется большой объём экспериментального материала, математическая диагностическая модель ТА, полученная посредством вычислительного эксперимента, имеет вид системы уравнений (5):

$$\left. \begin{aligned} +1,9 \delta P_{\text{зат}} &+ 0,0025 \delta\Delta_{\text{пп}} &+ 0,0013 \delta\Delta_{\text{иф}} &= \delta p_{\text{нпф}}; \\ -0,26 \delta P_{\text{зат}} &- 0,043 \delta\Delta_{\text{пп}} &- 0,00046 \delta\Delta_{\text{иф}} &= \delta\varphi_{\text{нпф}}; \\ -0,17 \delta P_{\text{зат}} &- 0,0063 \delta\Delta_{\text{пп}} &- 0,0063 \delta\Delta_{\text{иф}} - 0,0053 \delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta\varphi_{\text{ф}}; \\ +1,2 \delta\Phi_{\text{нпп}} &- 0,0055 \delta\Delta_{\text{пп}} &&= \delta\varphi_{\text{нпп}}; \\ -0,27 \delta P_{\text{зат}} &&+ 0,0098 \delta\Delta_{\text{иф}} &- 0,060 \delta(\mu f_{\text{со}}) = \delta\varphi_{\text{н}}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Аналогичная математическая модель может быть получена как для других локальных систем, так и для общей системы диагностирования дизеля. В последнем случае описанные выше диагностические параметры получаются в результате индицирования его рабочего процесса и расчёта характеристик тепловыделения по индикаторным диаграммам с использованием нашей программы InDiagExpert [20].

При наличии достоверной математической диагностической модели диагноз технического состояния дизеля может быть определён по разности значений текущего структурного параметра и допустимого значения данного параметра.

Закключение

На техническое состояние дизельного двигателя влияют огромное число его структурных параметров. Это делает невозможным создание единой системы диагностирования дизеля. Авторами статьи предложено создать комплекс диагностических систем, построенный по иерархическому принципу. Комплекс состоит из общей системы и ряда локальных систем. При решении задачи поддержания на исходном уровне топливной экономичности дизеля в процессе его эксплуатации следует использовать комплекс диагностических систем, в котором работа общей системы основана на результатах индицирования внутрицилиндровых процессов.

Анализ параметров индикаторной диаграммы позволяет определить целесообразность последующего использования той или иной локальной системы диагностирования. В состав локальных могут входить, например, системы диагностирования топливной аппаратуры, агрегатов воздухообеспечения, цилиндро-поршневой группы деталей. Авторами разработана локальная система диагностирования топливной аппаратуры. Обоснован выбор соответствующих структур-

ных и диагностических параметров. При выборе метода технического диагностирования учтено предъявляемое к нему важнейшее требование — возможность выполнения операций без вывода дизеля из нормального режима эксплуатации. Этому требованию наилучшим образом отвечает виброакустический метод. Установлены связи между структурными и диагностическими параметрами в общей и локальной системах диагностирования. Указанные связи могут быть выражены посредством диагностических математических моделей, при разработке которых нами применен метод малых отклонений. Использование подобных диагностических моделей в процессе эксплуатации позволит оценить текущее техническое состояние дизеля и выполнить его прогноз.

В данной статье в соответствии с её названием рассмотрены основные принципы построения системы диагностирования судового дизеля. Реализации этих принципов в виде структурных схем диагностических комплексов, а также соответствующим техническим решениям будут посвящены последующие наши публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хруцкий О. В. Семь бесед по вибродиагностике / О. В. Хруцкий, С. Н. Рогов. — СПб.: ЗАО «ТСТ», 2003. — 102 с.
2. Лашко В. А. Теория идентификации в приложении к задачам диагностики дизеля / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Международная науч.-техн. конф. «Двигатели-2008». Хабаровск, 15 – 19 сентября 2008 г.: Материалы конференции. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2008. — С. 264–269.
3. Викулов С. В. Методы построения алгоритмов диагностирования элементов судовых дизелей на основе системного подхода: дис. ... д-ра техн. наук / С. В. Викулов. — Новосибирск: НГАВТ, 2013. — 312 с.
4. Нигматуллин Ш. Ф. Совершенствование методов и средств диагностирования топливной аппаратуры автотракторных и комбайновых дизелей: дис. ... канд. техн. наук / Ш. Ф. Нигматуллин. — Уфа: Башкирский ГАУ, 2002. — 157 с.
5. Грехов Л. В. Диагностирование топливной аппаратуры автотракторных дизелей / Л. В. Грехов, И. И. Габитов, А. В. Неговора // Международная науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения»: материалы конф., 23 – 25 апреля 2003 г. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. — С. 118–125.
6. Анисимов А. А. Контроль технического состояния агрегатов системы наддува тепловозных дизелей методом малых отклонений / А. А. Анисимов, С. М. Овчаренко, Е. И. Сковородников // Международная науч.-техн. конф. «Двигатели-2008». Хабаровск, 15 – 19 сентября 2008 г.: материалы конф. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2008. — С. 253–257.
7. Грехов Л. В. Топливная аппаратура дизелей с электронным управлением / Л. В. Грехов. — М.: Легион-Автодата, 2009. — 176 с.
8. Лашко В. А. Метод идентификации технического состояния дизеля по результатам расчётно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуатации / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков, А. А. Маркелов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2007. — № 1. — С. 57–68.
9. Лашко В. А. Средства и методы диагностирования дизелей по индикаторной диаграмме рабочего процесса / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. — 147 с.
10. Маркелов А. А. Диагностирование дизеля по результатам расчётно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Маркелов. — Хабаровск: ТГУ, 2007. — 175 с.
11. Коньков А. Ю. Диагностирование технического состояния тепловозного дизеля по индикаторной диаграмме на основе теории идентификации / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко // Двигателестроение. — 2009. — № 3. — С. 19–23.
12. Коньков А. Ю. Количественное оценивание износов и разрегулировок тепловозного дизеля по данным индицирования рабочих процессов / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко, В. Г. Кочерга // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. — 2009. — Т. 1. — № 5 (17). — С. 102–109.

13. Гаврилов В. В. Теоретические основы и методика анализа процесса горения в судовом ДВС по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 154–164.
14. Васильев-Южин Р. М. Совершенствование метода параметрического диагностирования судовых дизелей. Основные принципы / Р. М. Васильев-Южин, П. М. Гоцак, С. И. Золотарев // Двигателестроение. — 1988. — № 6. — С. 46–48.
15. Яранцев М. В. Оценивание износа плунжерных пар без разборки топливного насоса высокого давления дизеля / М. В. Яранцев, А. Ю. Коньков, В. А. Лашко, В. Г. Кочерга // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2013. — № 2 (29). — С. 123–132.
16. Гаврилов В. В. Топливная аппаратура дизеля как объект виброакустической диагностики / В. В. Гаврилов, П. А. Щукин, В. Ю. Машенко [и др.] // Межвузовская науч.-техн. конф. : сб. материалов. Санкт-Петербург, 25 – 28 апреля 2000 г. — СПб.: Изд-во Военно-морского инженерного института, 2000. — С. 378–379.
17. Гаврилов В. В. Методика виброакустического диагностирования топливной аппаратуры дизеля / В. В. Гаврилов, О. В. Хруцкий, П. А. Щукин [и др.] // Науч.-техн. конф. «Двигатели внутреннего сгорания двадцать первого века»: материалы конф. Санкт-Петербург, 20 сентября 2000 г. — СПб.: Издательский центр СПбГМТУ, 2000. — С. 59–60.
18. Гаврилов В. В. Методы повышения качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле на основе математического и физического моделирования локальных внутрицилиндровых процессов: дис. ... д-р техн. наук / В. В. Гаврилов. — СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 359 с.
19. Машенко В. Ю. Повышение эффективности рабочих процессов в судовом дизеле согласованным выбором параметров топливной аппаратуры и камеры сгорания: дис. ... канд. техн. наук / В. Ю. Машенко. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 209 с.
20. Машенко В. Ю. Программа InDiagExpert расчета характеристик тепловыделения в дизеле по индикаторным диаграммам / В. Ю. Машенко, В. В. Гаврилов // IV Всероссийская межотраслевая науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы морской энергетики»: материалы конф. Санкт-Петербург, 12 – 13 февраля 2015 г.:— СПб.: Издат. центр СПбГМТУ, 2015. — С. 45–46.

PRINCIPLES OF HIERARCHICAL COMPLEX SYSTEMS OF DIAGNOSING MARINE DIESEL ENGINE

By taking into account of significant amount of the factors affecting technical condition of the diesel engine, it is impossible to develop integrated diagnostic system for detection of sufficient amount of malfunctions reducing fuel efficiency of the engine. Therefore, in operating practice of the diesel as a rule we have to apply a combination of mismatched means of diagnostics. In the article is described the approach suggested by the authors regarding development of hierarchical structure of engine diagnostic systems consisting of the general and a number of local systems. The interconnection of these systems is specified. The operation of general diagnostic system is based on application of results of analysis of indicator diagrams, which enables to limit the area of further troubleshooting of the diesel engine by means of the local systems. The local diagnostic system has been developed for fuel equipment based on application of vibroacoustic method of measurements and results of analysis of vibration records. The composition of structural and diagnostic parameters has been justified for implementation of general and local diagnostic systems of the diesel engine. The communication between specified parameters has been established as diagnostic mathematical models, which in this case are developed with application of small-deflection method. Application of suggested structure of diagnostic systems in operation process will allow to estimate a current technical condition of the diesel engine and make its forecast.

Keywords: technical condition of diesel engine, functional diagnostics, indicator diagram, fuel equipment, structural and diagnostics parameters, use of vibroacoustic method.

REFERENCES

1. Khrutsky, O. V., and S. N. Rogov. *Sem' besed po vibrodiagnostike*. SPb.: ZAO "TCT", 2003.

2. Lashko, V. A., and A. Ju. Konkov. "Teorija identifikacii v prilozhenii k zadacham diagnostiki dizelja." *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Dvigateli-2008». Habarovsk, 15-19 sentjabrja 2008 g.: Materialy konferencii.* Habarovsk: Izd-vo Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008.
3. Vikulov, S. V. Metody postroenija algoritmov diagnostirovanija jelementov sudovyh dizelej na osnove sistemnogo podhoda. Diss. Novosibirsk: NGAVT, 2013.
4. Nigmatullin, Sh. F. Sovershenstvovanie metodov i sredstv diagnostirovanija toplivnoj apparatury avtotraktornyh i kombajnovykh dizelej. Diss. Ufa: Bashkirskij GAU, 2002.
5. Grehov, L. V., I. I. Gabitov, and A. V. Negovora. "Diagnostirovanie toplivnoj apparatury avtotraktornyh dizelej." *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Aktualnye problemy teorii i praktiki sovremennogo dvigatelestroenija»: materialy konferencii, 23-25 aprelja 2003 g (kypcu).* Cheljabinsk: Izd-vo JuUrGU, 2003: 118–125.
6. Anisimov, A. A., S. M. Ovcharenko, and E. I. Skovorodnikov. "Kontrol tehničeskogo sostojanija agregatov sistemy nadduva teplovoznnyh dizelej metodom malyh otklonenij." *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Dvigateli-2008». Habarovsk, 15-19 sentjabrja 2008 g.: Materialy konferencii.* Habarovsk: Izd-vo Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008: 253–257.
7. Grehov, L. V. Toplivnaja apparatura dizelej s jelektronnym upravleniem. M.: Legion-Avtodata, 2009.
8. Lashko, V. A., A. Y. Konkov, and A. A. Markelov. "The method of technical condition identification for a diesel engine by the display diagram analysis under the condition of ordinary operation." *Bulletin of PNU 1* (2007): 57–68.
9. Lashko, V. A., and A. Ju. Konkov. Sredstva i metody diagnostirovanija dizelej po indikatornoj diagramme rabocheho processa. Habarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2007.
10. Markelov, A. A. Diagnostirovanie dizelja po rezultatam raschjotno-jeksperimentalnogo issledovanija indikatornoj diagrammy v uslovijah rjadovoj jekspluatacii. Diss. Habarovsk: TGU, 2007.
11. Konkov, A. Ju., and V. A. Lashko. "Diagnosis of a Locomotive Engine by Means of Indicator Diagram Based on Identification Theory." *Dvigatelestroyeniye 3* (2009): 19–23.
12. Konkov, A. Ju., V. A. Lashko, and V. G. Kocherga. "Kolichestvennoe ocenivanie iznosov i razregulirovok teplovoznogo dizelja po dannym indicirovanija rabochnih processov." *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija 1.5(17)* (2009): 102–109.
13. Gavrilov, Vladimir Vasiljevič, and Vladimir Yurievich Mashchenko. "Theoretical foundations and procedure of the analysis of process of combustion of ship internal combustion engines according to indicator diagrams." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 1(35)* (2016): 154–155.
14. Vasilev-Juzhin, R. M., P. M. Gocak, and S. I. Zolotarev. "Sovershenstvovanie metoda parametriceskogo diagnostirovanija sudovyh dizelej. Osnovnye principy." *Dvigatelestroyeniye 6* (1988): 46–48.
15. Yarantsev, M. V., A. Yu. Konkov, V. A. Lashko, and V. G. Kocherga. "Evaluation of Plunger Wear without Removing the Diesel Fuel Injection Pump." *Bulletin of PNU 2(29)* (2013): 123–132.
16. Gavrilov, V. V. "Toplivnaja apparatura dizelja kak obekt vibroakustičeskoj diagnostiki." *Mezhvuzovskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija. Sankt-Peterburg, 25–28 aprelja 2000 g.: Sbornik materialov konferencii.* SPb.: Izd-vo Voenno-morskogo inženernogo instituta, 2000: 378–379.
17. Gavrilov, V. V., O. V. Hručikij, P. A. Shhukin, and I. V. Gavrilov. "Metodika vibroakustičeskogo diagnostirovanija toplivnoj apparatury dizelja." *Nauchno-tehnicheskaja konferencija «Dvigateli vnutrennego sgoranija dvadcat' pervogo veka». Sankt-Peterburg, 20 sentjabrja 2000 g.: Materialy konferencii.* SPb.: Izdatelskij centr SPbGMTU, 2000: 59–60.
18. Gavrilov, V. V. Metody povyšeniya kachestva smeseobrazovanija i sgoranija v sudovom dizele na osnove matematičeskogo i fizičeskogo modelirovanija lokal'nyh vnutricilindrovych processov. Diss. SPb.: SPbGMTU, 2004.
19. Mashhenko, V. Ju. Povyshenie jeffektivnosti rabochnih processov v sudovom dizele so-glasovannym vyborom parametrov toplivnoj apparatury i kamery sgoranija. Diss. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2013.
20. Mashhenko, V. Ju., and V. V. Gavrilov. "Programma InDiagExpert rascheta harakteristik teplovydelenija v dizele po indikatornym diagrammam." *Chetvertaja Vserossijskaja mezhotraslevaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Aktual'nye problemy morskoy jenergetiki». Sankt-Peterburg, 12–13 fevralja 2015 g.: Materialy konferencii.* SPb.: Izdatelskij centr SPbGMTU, 2015: 45–46.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гаврилов Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
gavrilov@VG5647.spb.edu, kaf_sdvs@gumrf.ru
Мащенко Владимир Юрьевич —
кандидат технических наук,
старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный морской технический
университет»
masvladimir@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gavrilov Vladimir Vasilyevich —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
gavrilov@VG5647.spb.edu
Mashchenko Vladimir Yurievich —
PhD, Senior Lecturer.
Saint-Petersburg State Marine Technical
University
masvladimir@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 18 марта 2016 г.

УДК 621.436

**А. А. Иванченко,
И. А. Щенников,
А. А. Иванченко**

ПРОБЛЕМЫ И ОПЫТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СУДОВОГО ВЫСОКОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ М482

В статье рассмотрены современные подходы к математическому моделированию внутрицилиндрового процесса, их основные преимущества и недостатки. Обосновано использование фундаментальных закономерностей смесеобразования и сгорания для решения оптимизационных задач по математическому моделированию экологических и эксплуатационных показателей судовых дизелей. Изложены теоретические основы протекания процессов тепловыделения в цилиндре судового дизеля. Предложена методология математического описания и управления процессом сгорания в цилиндре, основанная на использовании упрощённых полуэмпирических моделей и результатов экспериментальных работ. Проведена расчетно-экспериментальная апробация предложенного подхода при исследовании рабочего процесса судового дизельного двигателя М482 (12 ЧН18/20) с аккумуляторной топливной аппаратурой. Обоснованы рекомендации по дальнейшему улучшению рабочего процесса и характеристик топливной аппаратуры дизельного двигателя. Проведено обобщение результатов расчетно-экспериментальных исследований с формированием расчётной универсальной характеристики расхода топлива. Сделан вывод о возможности дальнейшей модернизации исследуемого дизеля.

Ключевые слова: эмиссия оксидов азота, эксплуатационные показатели, математическое моделирование внутрицилиндрового процесса.

Введение

Ужесточение норм эмиссии NO_x, SO_x и CO₂ для дизельных установок судов выдвигает перед разработчиками судовых дизелей все более сложные и противоречивые задачи, связанные с качеством рабочего процесса и улучшением их эксплуатационных показателей, ставит в ряд актуальнейших проблем задачу внедрения системных принципов в управление процессом сгорания топлива.

Стремясь сократить расходы на доводку дизеля, ведущие разработчики заявили о создании сложных расчетных моделей, основанных на дифференциальных уравнениях гидродинами-