

## ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВС НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

На основании обзора публикаций в области методов и систем параметрического диагностирования двигателей внутреннего сгорания, выполненных с середины 80-х годов по настоящее время, нами сделана попытка обобщить достижения и выявить задачи, решение которых позволило бы обеспечить повышение эффективности систем технического диагностирования (СТД) ДВС на этапе их проектирования. Цель эта может быть достигнута путем обоснованного выбора состава измеряемых параметров и оптимизации алгоритмического обеспечения СТД. Список проанализированных источников обширен и не приводится из-за ограниченности размера статьи.

Методы диагностирования, применяемые в эксплуатации ДВС, можно разделить в зависимости от вида используемой информации на трибологические, виброакустические, параметрические и визуально-оптические. По режимам работы объекта методы делятся на функциональные (которые применяются во время работы двигателя в режиме обычной эксплуатации) и тестовые, основанные на исследовании реакции испытуемого объекта на управляющие воздействия заданного вида.

Ограничимся рассмотрением только параметрических методов функционального диагностирования.

Параметрические методы используют значенных параметров рабочего процесса двигателя. Практически все известные параметрические методы можно отнести к группам методов допускового контроля, тренд-анализа и распознавания состояния объекта.

Рассмотрим объекты и условия диагностирования, для которых применимы параметрические методы.

- *Крупные двигатели стационарного применения* – дизельные, большой мощности, используются на аварийно-вспомогательных электростанциях и крупных передвижных энергоустановках, как привод нефтеперекачивающих насосов.

Позволяют производить большое количество измерений и размещать дополнительные электронные блоки. Во многих случаях имеется помещение оператора, где можно расположить персональный компьютер. Обычно имеется достаточное количество высококвалифицированного узкоспециализированно-

го персонала, развитая ремонтная база, слесарно-механическое и контрольно-измерительное оборудование.

- *Судовые двигатели* – дизельные, большой мощности, отличаются широким рабочим диапазоном и значительными перепадами нагрузки вследствие влияния внешних условий, обусловленного маневрированием, волнением моря и прочим. Вследствие этого обладают более совершенной, часто цифровой, системой управления, информационный поток которой можно использовать и для диагностики. Имеется достаточно места для размещения диагностического компьютера. Персонал высокой квалификации. Эксплуатация, в основном, происходит в условиях значительной удаленности от баз ремонта и обслуживания.

- Комплекты диагностического оборудования для *двигателей транспортных машин* на станциях технического обслуживания и контрольно-испытательных станциях обладают теми же возможностями обработки информации, что и судовые или стационарные установки, но список измеряемых параметров уже, поскольку контролируются двигатели, специально не препарированные для диагностических задач. Кроме того, двигатели гораздо меньше стоят, чем в двух предыдущих группах.

- *Тепловозные дизели* – характерны теснота, высокая температура и вибрации в технических отсеках, занятость машиниста (по сравнению с судовыми и стационарными). Не удаляется надолго от баз обслуживания, поэтому в режиме движения целесообразна лишь индикация наиболее серьезных текущих предупреждений, а углубленный анализ может быть отложен до окончания рейса.

- *Автомобильные двигатели* – характерны неустойчивость режимов работы, вибрации, запыленность. Цена датчиков сопоставима с ценой двигателя, поэтому измерений выполняется мало. Электронные системы управления встречаются только на более дорогих современных типах. Применимы микропроцессорные системы с малым количеством диагностических функций и предупредительная сигнализация.

- Для *малых двигателей*, в том числе пусковых, двигателей легких транспортных машин и мотоциклов, переносных электростанций и средств малой механизации и им подобных – средства автоматизированного и параметрического диагностирования не применяются.

С развитием электронной базы связан прогресс диагностического оборудования, при выборе которого, конечно, учитывается и соотношение его цены с ценой диагностируемого двигателя.

*Измерители и тестеры.* Производятся как переносные, так и бортовые контрольно-измерительные приборы. Начинаются с цепи измерения и индикации температуры охлаждающей жидкости или с системы «аккумулятор – генератор – амперметр». Переносные приборы развились до сложных комплексов с большим количеством удобно монтируемых и демонтируемых датчиков, с цифровыми индикаторами (КИ-13966, КИ.М-103, КИ.П 12-1, 1988 г.). Состав измерений позволяет оценить наиболее важные из доступных параметров двигателя.

*Аппаратно программируемые контрольные приборы.* Наиболее ранний тип бортового диагностического оборудования. Начинаются от системы сигнализации типа «двухпозиционный датчик – лампа» (например сигнализатор низкого давления масла). В позднейших реализациях развились в приборы алгоритмического контроля, где алгоритм набирается аппаратно из отдельных микросхем, обычно единой серии, в которую входят генераторы и счетчики импульсов, логические «и», «или», делители сигналов, аналого-цифровые преобразователи (прибор БПДД СКБприбор АО «Орлэкс», г. Орел, 1998 г.). Несмотря на простоту алгоритмов контроля и сложность аппаратного «программирования», в таких системах можно обеспечить достаточно сложные функции (проверка условий входа в алгоритмы, определение рабочего диапазона, выбор уставки от рабочего диапазона).

*Микропроцессорные диагностические системы.* Иногда выполняются отдельной системой (бортовая система диагностирования тепловозного дизеля, разработанная в ХПИ и ПО «Завод имени Малышева», г. Харьков, 1985 г.), но чаще интегрированы в электронных системах автоматизированного управления (современные САД1-1 и САД2-1 ОАО «Техприбор», г. Санкт-Петербург). Диагностика включается как дополнительная функция. Контролируется, в основном, состояние приборного оборудования. Алгоритмы контроля двигателя просты. Обычно существуют готовые наборы программ управления для разных серий контроллера. Перепрограммирование при достаточной квалификации и наличии сравнительно недорогого оборудования можно производить даже в бытовых условиях, однако потребителей таких услуг

интересует, как правило, изменение программ управления, но не диагностирования (например, для двигателей ВАЗ). Средства накопления информации на автомобильном транспорте не применяются, поскольку для этого требуется отдельное дорогостоящее устройство и алгоритм. В судовых микропроцессорных системах реализовано накопление наиболее важных событий для последующего съема и обработки информации на персональном компьютере (система САД1-1).

Автоматизированные диагностические системы (АСД). Обладают развитой измерительной системой, системой обработки и накопления информации, системой индикации результатов. Поскольку есть возможность использовать ПК для интерфейса, на него же можно возложить и обработку информации – микропроцессоры уже не ограничивают объем решаемых задач. От предыдущего типа отличаются развитым операторским интерфейсом. Имеются средства накопления информации, поскольку есть персональный компьютер. Алгоритмы сложны, но перепрограммирование не вызывает проблем. Функций много, поэтому работа с интерфейсом предполагает диалог с оператором. Часто основаны на снятии и исследовании индикаторных диаграмм («Deras», разработанная в Одесском государственном морском университете, НК-100 фирмы Autronica, российские системы СДД-4, СДД-5, ДМ-2000, ДМ-1000с, Ритм Дизель-М). Следует отметить, что для правильной интерпретации результатов работы подобных систем необходима высокая квалификация инженера-механика.

Экспертные системы не будем выделять в отдельный класс, поскольку от прочих они отличаются только способами обработки информации и уровнем взаимодействия с оператором, поэтому их можно считать разновидностью диагностических систем.

Классификация алгоритмов. Алгоритмы, используемые в СТД, могут быть разделены на две большие группы – алгоритмы оперативного применения – то есть те, которые выполняются в режиме реального времени на работающем двигателе, и алгоритмы ретроспективного применения, выполняемые на основании накопленной информации, иногда на значительном удалении от диагностируемого объекта. Обзор опубликованных сведений о действующих системах диагностирования ДВС и опыт разработки таких систем для газотурбинных двигателей позволяет систематизировать группы алгоритмов, которые в различном составе присутствуют в любой конфигурации СТД.

Вспомогательные алгоритмы оперативного диагностирования, к которым относятся:

- подготовка входной информации – оценка достоверности, фильтрация, сглаживание, оценка статистических характеристик измерительного канала;

- определение режима работы объекта (формирование признаков «двигатель работает», «холостой ход» и подобных);
- формирование признака «установившийся режим»;
- проверка условий входа в основные алгоритмы, осуществляемая на основе работы вышеперечисленных вспомогательных алгоритмов.

**Проблемы:** выбор критериев отсева сбойных измерений, способов сглаживания и оптимальных значений коэффициентов функции сглаживания с учетом статистических характеристик каждого измерительного канала; выбор критериев возникновения и своевременного снятия признака установившегося режима работы двигателя с учетом не только свойств измерительных каналов, но и влияния работы системы управления на стабильность режима.

*Основные алгоритмы оперативного диагностирования* реализуют основные диагностические методы и включают:

- контроль нахождения диагностических параметров двигателя в пределах заданной нормы (многообразие методов назначения пределов нормы будет рассмотрено ниже);
- алгоритмы распознавания дефектных состояний, работающие как на уровне исследования качественных связей, так и с учетом количественных характеристик проявления дефектов.

**Проблемы:** выбор наиболее значимых диагностических параметров (непосредственно измеряемых либо вычисляемых, приведенных, комплексных); выбор способа задания нормы и назначения верхнего и нижнего допуска на отклонение диагностического параметра от нее; оценка влияния состава и статистических свойств измерительных каналов на возможность и вероятность распознавания дефектов, откуда вытекает задача проектирования измерительной системы, оптимальной по стоимости и информативности для потребностей диагностики.

Дополнительные алгоритмы оперативного диагностирования, которые могут включаться в состав СТД, следующие:

- контроль исправности измерительных каналов с использованием математических моделей объекта;
- оперативная индивидуализация норм диагностических параметров;
- оперативный тренд-анализ.

**Проблемы:** выявление неисправности канала измерения одного из аргументов математической модели нормы диагностического параметра путем подмены аргумента. Влияние погрешности измерения параметров на такой алгоритм.

*Алгоритмы интерфейса* с оператором и внешними системами (часть этих функций берет на себя программная среда, в которой выполняется разработка СТД):

- прием данных из измерительной системы объекта;
- переключение диагностических экранов на мониторе операторской станции;
- управление формой представления информации (графическая, цифровая, текстовая);
- отображение индикаторных диаграмм топливоподачи и давления в цилиндре.

Данная группа алгоритмов представляет для разработчика СТД задачу инженерного уровня, поэтому проблемы, возникающие при реализации этих алгоритмов, мы не рассматриваем.

*Алгоритмы управления регистрацией* параметров двигателя, осуществляющие взаимодействие оперативной и ретроспективной частей СТД:

- учет и регистрация наработки, эквивалентной или на различных режимах, в том числе и перегрузочных;
- регистрация пусков, в том числе неудачных, и остановов;
- регистрация событий, сопряженных с эксплуатацией двигателя – включения и выключения вспомогательных устройств и систем;
- регистрация информационных срезов.

Задача учета эквивалентной наработки сложна, но реализуется в соответствии с техническим заданием разработчика двигателя и выходит за рамки проблем разработки СТД.

**Проблемы:** выбор оптимального промежутка (по времени либо по количеству измерений) осреднения измеряемых параметров перед регистрацией информационного среза и выбор периодичности регистрации.

*Алгоритмы ретроспективного анализа* – используются техническим персоналом высокой квалификации для принятия решения о возможности и продолжительности дальнейшей эксплуатации двигателя. К ним относятся:

- алгоритмы отсева сбойных значений;
- расчет статистических характеристик выборки;
- тренд-анализ;
- прогнозирование.

Проблемы, связанные с решением задач тренд-анализа и прогнозирования, подробно исследованы для области общетехнического диагностирования, и их реализация в СТД представляет, скорее, инженерную задачу, однако необходимо учитывать особенности как диагностируемого объекта, так и его измерительной системы.

**Проблемы:** наиболее сложной и ответственной задачей является принятие решения о дальнейшей эксплуатации двигателя и ожидаемых сроках его ремонта или замены. Сегодня принятие такого решения остается за специалистом, а СТД выступает лишь как вспомогательный инструмент.

Многочисленные алгоритмы допускового контроля различаются между собой в основном способом задания нормы и допустимого отклонения контролируемого параметра.

При допусковом контроле диагностический параметр сравнивается с заданным значением, включающим в себя, как правило, норму контролируемого параметра и допуски на положительное и отрицательное отклонения от нормы. В допуск входят: методическая погрешность расчета нормы, то есть погрешность аппроксимации для регрессионной функции нормы, либо влияние режима работы двигателя и атмосферных условий (если они не включены как аргументы в расчет нормы), влияние погрешности измерения и контролируемого параметра, а также параметров, участвующих в расчете нормы (в основном случайная составляющая, а систематическая может быть учтена при настройке индивидуальной модели нормы), но полезной с точки зрения диагностирования составляющей допуска является допустимый дрейф диагностического параметра вследствие неисправности.

Возможные виды моделей нормального состояния – константы, регрессионные и нелинейные модели.

- *константа* сопровождается в общем случае грубым допуском либо используется в узком диапазоне режимов работы объекта; назначаемые изготовителем значения контролируемых параметров обычно должны наблюдаться на двигателе в строго заданных атмосферных условиях на фиксированных режимах; использование такой нормы при контроле затруднено тем, что для иных атмосферных условий параметры двигателя приходится приводить к стандартным атмосферным условиям, что не всегда точно, и тем, что на режимах, удаленных от описанных (а таких – подавляющее большинство), норма не рассчитывается и контроль не производится;
- *нелинейная модель* позволяет получить нормальное значение контролируемого параметра в зависимости от режима работы двигателя и атмосферных условий; влияние систематических погрешностей измерительных каналов и индивидуальные особенности двигателя могут быть учтены только в случае проведения идентификации модели по измерительной информации; такая модель позволяет получать эталонные индикаторные диаграммы двигателя и топливной аппаратуры;

- *регрессионная модель* получается при аппроксимации накопленной измерительной информации; позволяет учесть влияние скоростного и нагрузочного режима, атмосферные условия, систематические погрешности измерительной системы, а также индивидуальные особенности двигателя.

**Проблемы:** назначение допуска на отклонение диагностического параметра с учетом влияния погрешностей измерений параметров, участвующих в расчете диагностических параметров и с учетом метода назначения нормы; выбор состава аргументов регрессионной модели нормы диагностического параметра (структурная идентификация); разработка диагностических математических моделей, воспроизводящих не только исправное состояние двигателя, но и его дефекты.

Выявление трендов диагностических параметров и прогнозирование их выхода за допуск – важная, но не конечная задача диагностирования. Главной целью является определение параметров технического состояния, которые невозможно измерить на работающем двигателе. Необходимо выбрать набор параметров технического состояния, на определение которых направлена проектируемая СТД, определить достоверность этих параметров, связь параметров технического состояния с изменением характеристик узлов, процессов и выразить эти изменения в количественной форме. Это необходимо для того, чтобы прогнозировать тенденцию к выходу за допуск непосредственно параметров технического состояния двигателя. Следует также исследовать соотношение изменения диагностических параметров с параметрами изменения характеристик узлов и процессов.

Конечной задачей такого анализа является оценка эффективности способов распознавания дефектов с учетом свойств измерительной системы двигателя.

*Структурно-логический анализ*, основанный в основном на построении логических связей между наблюдаемыми параметрами и техническим состоянием объекта – структурно-логическая модель. По этому принципу работают в основном экспертные системы.

*Количественный анализ* – распознавание неисправного состояния по результатам количественного анализа отклонений диагностических параметров. Не требует дополнительных измерений, однако результативность сильно зависит от состава и точности измерительной системы. К таковым относятся байесовский метод, метод расчета отклонений параметров характеристик узлов в результате идентификации нелинейной математической модели.

*Визуальный анализ индикаторных диаграмм* давления в цилиндре и в топливной магистрали высокого давления. Метод весьма эффективен для выявления проблем цилиндропоршневой части и топ-

ливной аппаратуры, однако требует развитой аппаратной части СТД и реализуется только на двигателях большой мощности.

Проблемы связаны с оценкой вероятности выявления, невыявления и ложного выявления дефектов двигателя в зависимости от состава и характеристик его измерительной системы, что может служить основой для выбора оптимального состава измерительной системы и набора дефектов, которые проектируемая СТД способна выявлять.

### Выводы

Аппаратная конфигурация диагностических систем, в общих чертах, сложилась и в разном соста-

ве воспроизводится от системы к системе. Аппаратные средства достаточно развиты, чтобы в них можно было реализовать алгоритмы диагностирования различного уровня сложности. Это открывает возможность развития методов проектирования алгоритмов и разработки программного обеспечения для диагностирования двигателей. По мере дальнейшего развития электронных устройств все более сложные диагностические системы, а значит, и более глубокие алгоритмы диагностирования будут становиться доступнее для более мелких и мобильных силовых установок. Однако на пути реализации параметрических методов диагностирования ДВС выявлен ряд сформулированных выше проблем, которые необходимо решить для синтеза наиболее эффективных СТД.

УДК 621.183:621.313.7

*І.І. Іващенко, інж., О.Г. Приймаков, інж., А.Г. Шунайлов, інж.*

## РОЗРОБКА ІНТЕГРАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

В роботі [1] інтегральний показник енергомісткості дизеля  $R$  визначається, як  $R = \gamma/P_{\Lambda}n$ , тис. год, де  $\gamma$  – питома маса дизеля, кг/кВт,  $P_{\Lambda}$  – його літрово потужність,  $n$  – частота обертання,  $хв^{-1}$ .

Доведено [2,3], що для об'єктивного діагностування дизелів авіаційної наземної техніки (АНТ), крім  $R$ , потрібен ще один інтегральний показник  $N$ , який визначає нерівномірність обертання колінчастого валу дизеля.

Проаналізуємо основні чинники, які впливають на параметр  $N$ .

Отже, метою даної статті є розробка інтегральних показників діагностування технічного стану дизельних двигунів АНТ.

Максимальне значення кутової частоти обертання колінчастого валу за період сумарного обертового моменту є функція двох аргументів:

- «прирошення» кутової частоти валу за той же робочий цикл  $\Delta\omega_k$ ;
- мінімальне значення кутової частоти обертання валу за той же цикл  $\omega_{\min k}$ .

Визначення ступеня ідентичності послідовності циклів по дисперсії «прирошення» кутової частоти обертання  $\Delta\omega_k$  дозволяє оцінювати ідентичність циклів за величиною, безпосередньо пропорційальною роботі газів в кожному окремому циклі, а розгляд сукупності значень цієї дисперсії та дисперсії всіх екстремальних значень  $\omega_{ek}$  дозволяє враховувати також їх порядковий розподіл.

При оцінці технічного стану циліндрів двигуна, крім коефіцієнтів варіації, необхідно обов'язково враховувати ступінь нерівномірності частоти обертання валу двигуна  $\delta$ , який визначається як середнє значення різниці між найбільшим максимальним та мінімальним значеннями кутової частоти обертання за серію послідовних періодів зміни сумарного крутильного моменту (50–60 циклів роботи всіх циліндрів двигуна).

Відомі способи визначення ступеня нерівномірності обертання колінчастого валу ґрунтовані на відключенні одного або декількох циліндрів, проте, вони не дозволяють забезпечити потрібну точність вимірювання величини  $\delta$ . Пов'язано це з тим, що на випадок роботи двигуна тільки на одному циліндрі має місце значне переваження працюючого циліндра. При цьому умови роботи цього циліндра істотно відрізняються від нормальних, які мають місце при роботі двигуна з усіма включеними циліндрами. На випадок, коли прагнуть забезпечити ідентичність умов роботи та умов випробувань, росте трудомісткість процесу діагностування. Це пов'язано з тим, що, по-перше, працюючі циліндри необхідно довантажувати до максимальної потужності та вимірювати при цьому частоту обертання валу двигуна, а по-друге, необхідно проводити повторний замір частоти обертання валу двигуна, попередньо включивши раніше відключений циліндр. Нерівномірність частоти обертання повинна визначатися за результатами по-