

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ ПО ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЕ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ

А.Ю. Коньков, к.т.н., доц.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения;

В.А. Лашко, д.т.н., проф.

Тихоокеанский государственный университет

Рассмотрены принципы количественного оценивания параметров технического состояния дизеля с использованием теории идентификации и индикаторной диаграммы. Представлены результаты практической реализации метода, выполненные для тепловозного двигателя 16ЧН26/26.

Теория идентификации является мощным инструментом теории управления, успешно применяемым во многих областях практической деятельности человека, в том числе и при диагностировании технических систем. К сожалению, при решении задач оценивания технического состояния дизеля этот инструмент еще не нашел должного применения. Развитие за последние годы методологии диагностирования ДВС по индикаторной диаграмме (ИД) характеризуется, по мнению авторов, следующими аспектами. Прежде всего, заметно выросло предложение со стороны разработчиков диагностического оборудования. На российском рынке свое оборудование предлагают не менее десятка игроков только с бывшего постсоветского пространства. Разработчики прикладывают значительные усилия для упрощения процедуры получения ИД в условиях эксплуатации, что позволило повысить надежность аппаратного оснащения измерительных комплексов. Конечно, это не может не приветствоваться потребителями диагностического оборудования. Сегодня можно констатировать, что первая задача системы технической диагностики — получение диагностической информации, как правило, решена всеми разработчиками. Совсем иная ситуация сложилась с решением второй более важной задачи — интерпретацией результатов измерений и постановкой точного диагноза. Уровень автоматизации этих процедур и качество их практической реализации в существующих комплексах оставляют желать лучшего. А ведь без решения этих задач называть комплексы диагностическими можно лишь с оговоркой. По сути, они являются измерительными.



Не останавливаясь на анализе всех возможных подходов к решению обозначенной проблемы [1] рассмотрим принципиальные моменты теории идентификации и практической реализации процедуры оценивания технического состояния дизеля по данным экспериментальной индикаторной диаграммы.

В зависимости от количества априорной информации об объекте идентификации различают идентификацию в узком и широком смысле [2]. Задача идентификации в широком смысле формулируется как поиск оптимальной в некотором смысле модели объекта по результатам наблюдений над входными и выходными переменными (сигналами) системы. Иначе эту идентификацию часто называют структурной. При отсутствии или недостаточной информации об объекте приходится предварительно решать большое число задач, методы решения которых к настоящему времени только начали разрабатываться. Задача идентификации в узком смысле состоит в оценивании параметров и состояния системы по результатам наблюдения за входными и выходными параметрами и предполагает значительно больший объем априорной информации, включая наличие структурных и функциональных математических моделей объекта. Такую идентификацию называют еще параметрической (рис. 1). Если оцениваются параметры, характеризующие техническое состояние объекта, например, показатели износа, регулировочные параметры и т. д., то становится понятным, что задачи идентификации и диагностики оказываются очень близкими. Основное преимущество применения метода диагностирования, основанного на теории идентификации, состоит в возможности получе-

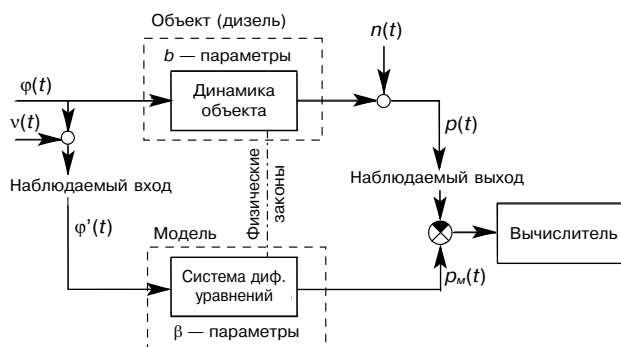


Рис. 1. Схема параметрической идентификации

ния количественных оценок величин, не доступных для непосредственного измерения.

Первым и обязательным условием практической реализации метода идентификации является наблюдаемость входов и выходов объекта. Применительно к поставленной задаче наблюдаемым выходом является быстроизменяющийся во времени сигнал давления в диагностируемом цилиндре двигателя $p(t)$. Построение ИД наряду с измерением давления предполагает и определение угла поворота коленчатого вала $\varphi(t)$. И хотя одновременно с непосредственными измерениями этого сигнала сегодня все чаще используют косвенные методы синхронизации давления и угла [3], по сути это ничего не меняет. Давление в цилиндре поршневого двигателя определяется, в первую очередь, положением поршня, которое можно ассоциировать с внешним воздействием, а меняющийся во времени сигнал $\varphi(t)$ считать наблюдаемым входом. Разграничив отдельно наблюдение за входом и выходом объекта, проще установить влияние внешних воздействий на результаты наблюдения. На схеме эти воздействия также показаны функциями времени $v(t)$ и $n(t)$. Трудно представить, что характеристики $v(t)$ и $n(t)$ могли бы быть достоверно определены, однако в ряде случаев их доминирующая составляющая оказывается известной. Например, при наблюдении за ходом поршня по результатам измерения положения коленчатого вала необходимо учесть специфические для данного конкретного метода погрешности, выполнить коррекцию действительного положения ВМТ [4] и т. п. Во многих диагностических комплексах подобная коррекция в той или иной мере присутствует.

Важнейшим звеном параметрической идентификации является математическая модель объекта. Ее задача заключается в генерации функции $p_m(t)$ по результатам наблюдений за входом $\varphi'(t)$. Связь между этими функциями устанавливается в первую очередь физическими законами и опытными данными об объекте. Функцию $p_m(t)$ можно рассматривать как аналог

выхода $p(t)$, которая, в идеальном случае, должна была бы в точности повторять ее. Конечно, это не возможно без учета, как минимум, режимных параметров, таких как цикловая подача топлива, давление надвучного воздуха и др. Действительная ИД будет менять свой вид и в зависимости от технического состояния (степени износа деталей ЦПГ, регулировок угла опережения подачи топлива, фаз газораспределения, качества распыливания топлива и т. п.). На рисунке все эти параметры обобщенно представлены вектором b . Математическая модель должна учитывать влияние этих величин. Замечательным, на взгляд авторов, является то, что разработка подобных математических моделей «с нуля» не потребует. Скорее всего, можно ограничиться выбором и незначительным уточнением одной из существующих моделей с учетом задачи диагностики. Так, в нашем случае расчет базировался на классическом уравнении объемного баланса, дополненном слагаемым, учитывающим потери рабочего тела через гидравлические неплотности в цилиндре. При этом расчет тепловыделения в цилиндре производился по известному методу Н.Ф. Разлейцева [5]. Подробная методика математического моделирования индикаторной диаграммы представлена в работе [1].

Сформулируем теперь основную задачу рассматриваемого метода: найти количественные значения параметров вектора β , при которых выход модели $p_m(t)$ и объекта $p(t)$ будут наиболее близки. Введенное здесь обозначение β вместо ранее используемого b подчеркивает то обстоятельство, что мы вправе говорить лишь о некотором приближении найденных значений параметров β , действительно имеющим место b . Иными словами, вектор β — не вектор параметров, а вектор их оценок.

Принцип поиска оценок и конкретный алгоритм идентификации определяется классом технической системы. Наиболее простой оказывается идентификация линейных систем [2]. Линейность (или нелинейность) системы в данном случае определяется связью между искомыми параметрами и показателем, характеризующим близость выходов модели $p_m(t)$ и объекта $p(t)$. Не отвлекаясь на доказательство, отметим, что для решаемой задачи эта связь оказывается чрезвычайно сложной и нелинейной. Поэтому потребовался соответствующий подход к решению задачи оценивания, суть которого заключается в подборе значений вектора β , качественно удовлетворяющему цели идентификации. Иными словами, процедура оценивания сводится к поиску оптимальных значений вектора β , удовлетворяющих минимуму некоторого функциона-

ла E . Нетрудно увидеть, что задача идентификации в такой постановке сходна задаче оптимизации, которую можно сформулировать в форме $E\{p, p_M; \beta\} \rightarrow \min$.

Пути решения подобных задач нелинейной оптимизации хорошо изучены, разработан эффективный математический аппарат, который успешно применяется конструкторами на этапах создания и доводки ДВС. Особенностью его применения в рассматриваемой задаче является лишь смена критерия (функционала) качества оптимизации. Если в традиционных для двигателестроения задачах оптимизации, в зависимости от целей, его роль выполняет удельный расход топлива (или другой показатель работы двигателя), то в нашем случае качественным решением является приближение опытной и расчетной индикаторных диаграмм. Поэтому и функционал должен характеризовать близость функций $p_M(t)$ и $p(t)$. Обычно качество аппроксимации экспериментальных данных $p(t)$ некоторой функцией принято оценивать среднеквадратичным значением ошибки. В этом случае функционал E следует вычислять как:

$$E\{p, p_M; \beta\} = \int_{t-T}^t \{p(t) - p_M(t; \beta)\}^2 dt,$$

где T — рассматриваемый интервал времени.

По мнению авторов, такой подход не всегда является наилучшим. Его применение оправдано при решении задач, когда полное совпадение результатов расчетов и эксперимента в ключевых точках не достижимо в принципе, например, при аппроксимации прямой линией некоторого набора случайных данных, не являющихся, скорее всего, линейной функцией. В нашем же случае экспериментальная функция $p(t)$ достаточно детерминирована и на некоторых участках рабочего процесса может быть весьма точно повторена моделью. Поэтому, как показал наш опыт, лучшие результаты достигаются при расчете E по уравнению:

$$E\{p, p_M; \beta\} = \max_{t \in T} |p(t) - p_M(t; \beta)|, \quad (1)$$

т. е. когда близость выходов объекта и модели оценивается максимальным отклонением давлений в некоторый момент времени анализируемого интервала T .

Выбор вектора β во многом определяется уровнем применяемой математической модели и должен осуществляться с учетом задач диагностики. Объектом наших исследований являлся тепловозный дизель 5А-Д49 (16СН26/26). По результатам тестирования разработанной математической модели в вектор варьируемых параметров были включены следующие показатели:

- средний условный зазор неплотностей в ЦПГ δ ;
- угол закрытия впускных клапанов $\varphi_{з. вп}$;
- объем камеры сгорания V_c ;
- угол опережения подачи топлива;
- цикловая подача топлива;
- давление надувочного воздуха p_s ;
- погрешность определения ВМТ.

Таким образом, общее число параметров составило семь. Применение стандартных алгоритмов оптимизации в этом случае сопряжено с известными трудностями. Помимо увеличения времени счета, весьма вероятно нахождение локальных экстремумов, не удовлетворяющих действительной картине. Для сокращения машинного времени и повышения точности решения многопараметровой задачи оптимизации анализ индикаторной диаграммы выполнялся в несколько этапов (рис. 2), на каждом из которых ограничивались набор компонентов вектора оценок и участок времени (угла ПКВ), в пределах которого рассчитывался функционал (1).

Индикаторные диаграммы определялись с использованием аппаратной части комплекса «Магистраль». Следует отметить две особенности комплекса, оказавшие влияние на рассматриваемый ниже алгоритм идентификации. Во-первых, шестнадцать физических каналов измерения и соответствующее программное обеспечение комплекса позволяют выполнять одновременное измерение сигнала давления во всех цилиндрах двигателя. Во-вторых, положение ВМТ на диаграммах определяется по положению максимума давления в цилиндре при отключении подачи топлива. Последняя особенность, как показано в работе [4], требует коррекции действительного положения ВМТ на диаграмме. Индицирование осуществлялось на двух режимах работы дизеля, соответствующих 11-й и 15-й позициям контроллера машиниста по тепловозной (генераторной) характеристике.

На первом этапе рассматривался начальный участок процесса сжатия, на характер протекания которого, наряду с движением поршня, значительное влияние оказывает давление надувочного воздуха p_s . Принимая допущение о том, что давление воздуха перед всеми цилиндрами двигателя одинаково, выход модели поочередно сравнивался с 16-ю полученными при индицировании опытными диаграммами (выходами объекта), для каждой из которых по уравнению (1) определялось свое значение функционала, после чего для принятия решения о направлении и величине варьирования p_s для следующей итерации или прекращения поиска (при достижении заданной точности сходимости) вычислялось среднеарифметическое значение функцио-

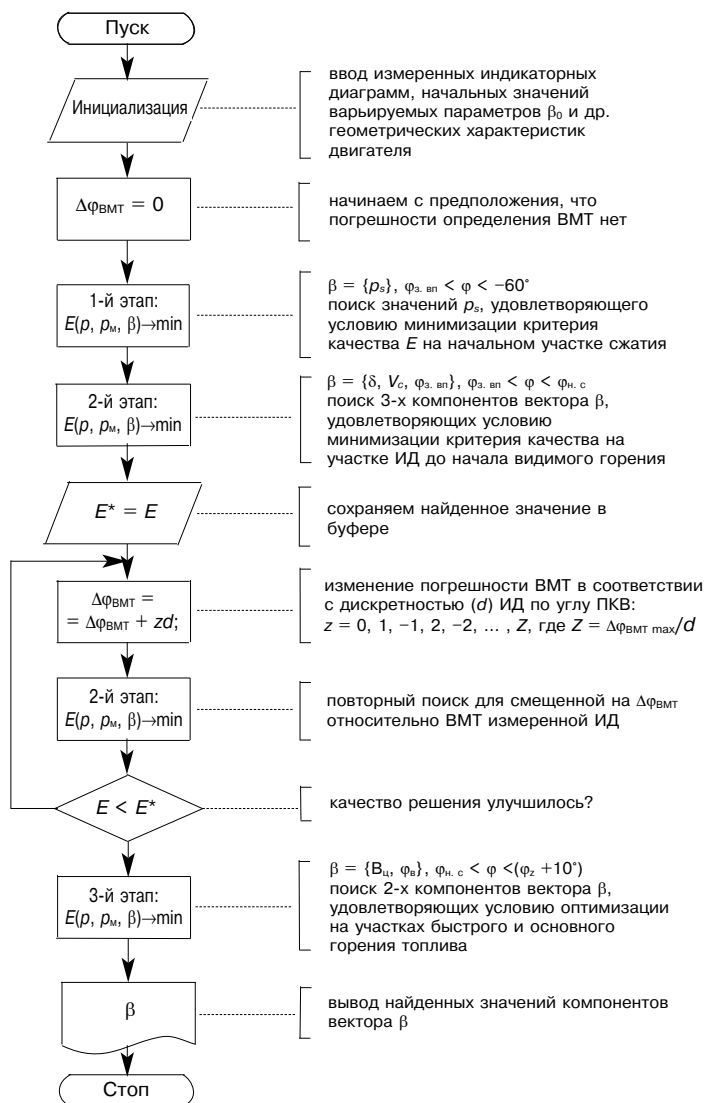


Рис. 2. Блок-схема оптимизации

нала. Варьирование на этом этапе всего одним параметром допускает применения самых простейших методов последовательного перебора. Анализируемый участок ИД при поиске ρ_s можно ограничить для 4-тактного двигателя примерно 60 град угла ПКВ от момента закрытия впускного клапана. Отметим, что на этом этапе мы преднамеренно игнорируем то обстоятельство, что фазы газораспределения в отдельных цилиндрах, в том числе и углы закрытия впускных клапанов, могут отличаться друг от друга. Это отличие оценивается на следующем этапе.

Если при измерении ИД измерялась и величина ρ_s , то необходимость в первом этапе отпадает.

Границы второго участка ИД определяются предполагаемым углом закрытия впускного клапана и найденным по опытной диаграмме моментом начала видимого горения. Этот участок

имеет наибольшую размерность оптимизации — три одновременно варьируемых параметра: угол закрытия впускного клапана; средний зазор гидравлических неплотностей в цилиндре, объем камеры сгорания. Для этого же участка определяется еще и величина ошибки положения ВМТ, но эта процедура выполняется отдельно. Для программной реализации этого этапа были опробованы несколько градиентных методов оптимизации, лучшие результаты были получены для метода покоординатного спуска.

Расчет начинается с предположения, что ВМТ определен корректно ($\Delta\phi_{\text{вмт}} = 0$), затем повторяется при смещении ИД вправо или влево относительно положения, полученного с помощью измерительного комплекса с шагом, кратным 0,5 градуса. Корректным положением ВМТ считается тот вариант, который обеспечивает минимальное значение функционала.

При решении многопараметровых задач оптимизации остро стоит проблема единственности решения. Практическая реализация метода показала, что для рассматриваемого этапа минимальное значение функционала может быть достигнуто как за счет варьирования зазором δ , так и за счет варьирования величиной V_c . Единственное решение было найдено при одновременном анализе двух (или более) ИД, полученных для одного цилиндра на различных скоростных режимах работы двигателя. Действительно, величина снижения давления в цилиндре из-за утечек рабочего тела зависит от длительности процесса, а изменение давления в связи с ходом поршня — нет. Поэтому одновременный поиск значений δ и V_c для выходов объекта, отличающихся продолжительностью участка сжатия, позволяет добиться единственности решения на этом этапе оптимизации.

На заключительном этапе оптимизации определяются цикловая подача топлива и угол опережения впрыскивания. Фазовыми границами этого участка являются предполагаемый угол начала впрыскивания, с одной стороны, и угол ϕ_2 , соответствующий 15 град угла ПКВ после достижения максимального давления в цилиндре, т. е. $\phi_2 = \phi_z + 15^\circ$, где ϕ_z — угол, соответствующий максимуму давления.

Таким образом, разбиение процедуры оценивания на три этапа позволило понизить уровень оптимизации с семи до трех одновременно варьируемых параметров. На втором и третьем этапах оптимизации применялся метод покоординатного

**Пример оценивания параметров
дизеля 16ЧН26/26**

Параметр	Режим			
	I		II	
	Значение	Оценка	Значение	Оценка
Давление наддува, МПа	0,185	0,181	0,24	0,246
Угол запаздывания закрытия впускного клапана, град после ВМТ	30	30	30	29
Объем камеры сжатия, см ³	1213	1212	1213	1214
Зазор в сопряжении гильза-втулка, мкм	—*	14,6	—*	14,6
Цикловая подача топлива, г/цикл	0,54**	0,6	0,94**	0,92
Угол опережения подачи топлива, град до ВМТ	15,2***	15	15,7***	15,5

* Фактические значения не определялись.
 ** Среднее значение по всем цилиндрам дизеля.
 *** Определены по результатам виброметрии.

натного спуска. Следует признать, что несовершенство математического описания процесса горения в цилиндре двигателя заметно сказывается на величине достигаемых при оптимизации функционалах качества. Так, если для первого и второго этапов максимальное расхождение выходов объекта и модели обычно лежит в пределах $E = 0,05-0,2$ МПа, то для третьего этапа типичными являются значения функционала качества $E = 0,2-0,4$ МПа. Вместе с тем экспериментальная проверка метода, выполненная для двигателей двух типов (4Ч9/12,5 и 16ЧН26/26) позволяет утверждать, что процедура оценивания параметров дизеля в большинстве случаев выполняется с достаточной для эксплуатации точностью.

В качестве иллюстрации возможностей метода в таблице представлены результаты идентификации параметров одного из цилиндров тепло-

возного дизеля, выполненные по данным индицирования на двух режимах: $P_e = 740$ кВт, $n = 700$ об/мин (режим I) и $P_e = 2100$ кВт, $n = 1000$ об/мин (режим II).

Подводя итог, отметим ряд бесспорных преимуществ предлагаемого метода по сравнению с традиционными безразборными методами диагностики. К ним относятся:

- получение количественных показателей износов, разрегулировок и т. п. без их явного измерения в эксплуатации;
- минимальный объем опытных данных об объекте диагностирования для реализации метода;
- минимальные сроки программной реализации метода, в том числе и для вновь вводимых в эксплуатацию типов дизелей.

Литература

1. *Коньков А.Ю., Лашко В.А.* Средства и метод диагностирования дизелей по индикаторной диаграмме рабочего процесса. — Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2007. — 147 с.
2. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния; пер. с англ. В.А. Лотоцкий, А.С. Мандель; под ред. Н.С. Райбмана. — М. : Мир, 1975. — 680 с.
3. *Лашко В.А., Коньков А.Ю.* Получение индикаторной диаграммы при асинхронном измерении сигнала давления // Двигателестроение. — 2007. — № 4. — С. 33–37.
4. *Лашко В.А., Коньков А.Ю.* Расчетный метод коррекции действительного положения ВМТ при индицировании ДВС // Двигателестроение. — 2007. — № 3. — С. 34–38.
5. *Разлейцев Н.Ф.* Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. — Харьков : Высшая школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1980. — 169 с.

**ПРЕДЛАГАЕМ РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ
Ориентировочные тарифы на 2 полугодие 2009 г.**

Первая страница обложки	Полноцветная	32 000 руб.
Вторая и третья страницы обложки	Полноцветная	28 000 руб.
Четвертая страница обложки	Полноцветная	30 000 руб.
Внутри журнала из расчета одна страница формата А4	Полноцветная	28 000 руб.
	Черно-белая	24 000 руб.