

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ГОУ ВПО «Дальневосточный государственный
университет путей сообщения»

Кафедра «Тепловозы и тепловые двигатели»

А.Ю. Коньков

ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛОКОМОТИВОВ

Рекомендовано
методическим советом ДВГУПС
в качестве учебного пособия

Хабаровск
Издательство ДВГУПС
2007

УДК 629.42.083 (075.8)

ББК О23-08я73

К 654

Рецензенты:

Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»
Тихоокеанского государственного университета
(заведующий кафедрой доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РИА)
В.А. Лашко

Кандидат технических наук,
генеральный директор научно-производственного предприятия «Диавэл»
А.А. Рябцун

Коньков, А. Ю.

К 654 Основы технической диагностики локомотивов : учеб. пособие. –
Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2007. – 98 с. : ил.

Учебное пособие соответствует государственному образовательному стандарту ВПО направления подготовки дипломированных специалистов 190300 «Подвижной состав железных дорог» специальности 190301 «Локомотивы».

Приведены базовые понятия дисциплины «Техническая диагностика», рассмотрен ряд современных методов диагностики машин и механизмов, нашедших применение в практике эксплуатации тепловозов. Пособие включает контрольные задания, которые могут быть использованы студентами заочной формы обучения при самостоятельном изучении дисциплины.

Предназначено для студентов третьего курса дневной и четвертого курса заочной форм обучения, изучающих дисциплину «Основы технической диагностики».

УДК 629.42.083 (075.8)

ББК О23-08я73

© ГОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС), 2007

ВВЕДЕНИЕ

Техническая диагностика как дисциплина сложилась сравнительно недавно. В истории ее становления можно выделить три этапа:

Первый – относится ко времени создания первых машин, когда обслуживающий их персонал, ориентируясь только на свои ощущения, прежде всего слуховые и зрительные, стал обнаруживать дефекты и отклонения в работе машин. Точность диагноза определялась исключительно опытом обслуживающего персонала.

Второй – начался с момента появления первых измерительных приборов, характеристики которых стали превышать возможности осязательных органов человека. Стоимость этих приборов первоначально была достаточно высокой, поэтому широкого внедрения они не получили. Наиболее глубокие исследования в тот период проводились по заказам военной промышленности. Пик этих исследований в России приходится на 70–80-е годы прошлого столетия. На этом этапе сформировались две составляющие диагностического обслуживания машин: измерения параметров машин и интерпретация их экспертом.

Третий, начавшийся в 90-е годы, – характеризуется широким распространением микропроцессорной техники и как следствие этого снижением стоимости и повышением возможностей измерительного оборудования. Именно на этом этапе появилась реальная возможность отказаться от услуг эксперта, заменив его компьютерными программами.

Анализируя историю развития диагностики, можно отметить тенденции для каждого этапа:

- на первом этапе человек (оператор) совмещал в себе функции как измерителя, так и эксперта;
- на втором этапе наметилось разграничение: функции измерения стали выполнять с применением технических средств, а их трактовку выполняли люди (эксперты) с различной степенью подготовки;
- третьему этапу свойственно повышение степени автоматизации диагностических работ, когда не только измерения, но и их трактовка поручены техническим средствам. Конечно, такие системы сегодня строятся так, чтобы человек (эксперт) в любое время мог взять управление системой на себя. Важнейшей частью подготовки такого эксперта является освоение физических основ диагностики и ее математического аппарата. Именно решению этой проблемы и посвящено настоящее пособие.

Техническая диагностика как направление науки и техники находится на стыке многих областей знаний. Для грамотной эксплуатации систем диагностики необходимо иметь знания и практические навыки в следующих областях:

- теории машин и механизмов: для возможности описания работы объекта и выбора основных диагностических признаков при его работе;

- теории сигналов и теории информации: чтобы получить максимум информации при минимуме измерений;
- теории и технике измерений и анализа сигналов: чтобы оптимизировать качество диагностических измерений;
- методах автоматизации процессов: для автоматизации измерений, анализа и составления отчетной документации;
- компьютерной технике и операционных системах: для эффективной эксплуатации современных технических средств диагностики.

Перечисленные выше области знаний изучаются в различных курсах, входящих, в том числе и в программу подготовки специалистов по специальности 150700 (190301) «Локомотивы». В настоящем пособии большее внимание будет уделено тем вопросам, которые не рассматриваются в других дисциплинах.

Пособие включает пять контрольных заданий, которые расположены тематически в конце соответствующего раздела. Эти задания предназначены для студентов заочной формы обучения и могут быть использованы студентами дневной формы обучения для самоконтроля.

1. ЗАДАЧИ И ТЕРМИНОЛОГИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Техническая диагностика – это область науки и техники, изучающая методы и средства определения технического состояния машин и механизмов без их разборки.

Применение методов и средств технической диагностики позволяет решить ряд экономических и социальных задач в производственной деятельности человека, а именно:

- снизить эксплуатационные расходы за счет уменьшения трудоемкости и времени ремонта оборудования;
- предупреждать аварии, благодаря своевременному выявлению дефектов;
- увеличить долговечность оборудования при устранении дефектов на ранних стадиях их появления;
- уменьшить количество обслуживающего персонала;
- повысить производительность;
- оптимизировать количество запасных деталей за счет прогнозирования отказов.

1.1. Задачи технической диагностики

Применительно к средствам оценки технического состояния машин можно выделить три типа задач:

- контроль измеряемых параметров;
- идентификация неисправности машин и оборудования;
- прогноз изменения их технического состояния.

При контроле машин и оборудования достаточно информации о величинах измеряемых параметров и зонах их допустимых отклонений. Более совершенной степенью контроля является мониторинг контролируемых параметров, для которого необходима дополнительная информация о тенденциях изменения во времени измеряемых параметров. При *идентификации* неисправностей машин требуется еще больший объем информации и ее анализа – необходимо определить место возникновения дефекта и оценить степень его развития. И наиболее сложной задачей является *прогноз изменения технического состояния*, позволяющий определить остаточный ресурс или период безаварийной работы.

В настоящее время под термином *мониторинг* технического состояния понимается весь комплекс процедур оценки состояния машин или оборудования:

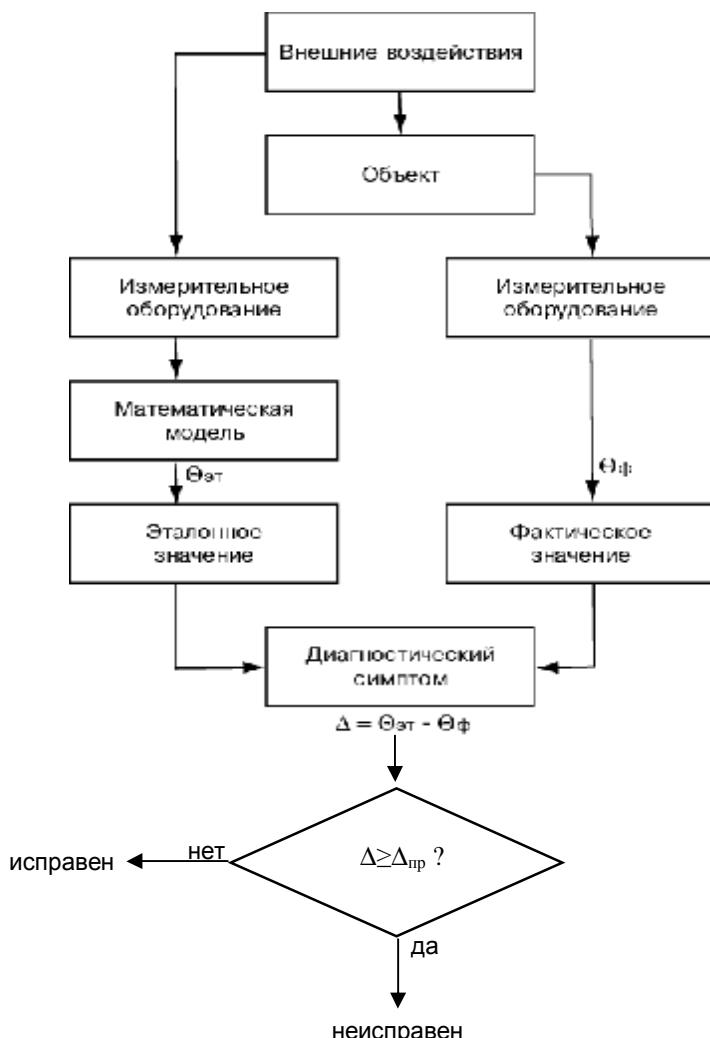
- защита от внезапных поломок;
- предупреждение об изменении технического состояния;
- обнаружение дефектов на ранних стадиях (зарождающихся дефектов), определение места их появления, вида и степени развития;
- прогноз изменения технического состояния оборудования.

1.2. Основной принцип диагностики

Суть технической диагностики составляют оценка и прогноз технического состояния объекта по результатам прямых или косвенных измерений параметров состояния (диагностических параметров). При этом само по себе значение диагностического параметра еще не дает оценки технического состояния объекта. Чтобы определить состояние машины, необходимо знать не только *фактические*, но и соответствующие им *эталонные* значения. Разность между фактическим Θ_ϕ и эталонным $\Theta_{\phi m}$ значениями диагностических параметров называется диагностическим симптомом Δ .

$$\Delta = \Theta_\phi - \Theta_{\phi m}. \quad (1.1)$$

Таким образом, оценка технического состояния объекта определяется отклонением фактических значений его параметров от их эталонных значений. Любая система технической диагностики работает на *принципе отклонений* (принцип Солсбери).



Степень достоверности и качества диагноза определяется погрешностью, с которой оценивается величина диагностического симптома.

Функциональная схема технической диагностики представлена на рис. 1.1.

Эталонное значение указывает, какую величину будет иметь исправный, хорошо отрегулированный, механизм, работающий при такой же нагрузке и таких же внешних условиях.

Математическая модель объекта диагностики представляется набором формул, по которым рассчитываются эталонные значения всех диагностических параметров. Каждая формула должна учитывать условия нагрузки объекта и наиболее существенные параметры внешней среды. Измерительное оборудование в большинстве

Рис. 1.1. Функциональная схема диагностики

случаев используется не только для измерения диагностического сигнала, но и для оценки внешних воздействий.

1.3. Основные термины и определения дисциплины

Техническая диагностика является молодой дисциплиной, которой свойственно отсутствие строгой терминологии. Вместе с тем, некоторые понятия дисциплины заимствованы из смежных областей знаний и являются устоявшимися. Так, теорией надежности даны следующие определения:

Исправный объект – объект, полностью удовлетворяющий всем требованиям (основным и второстепенным), предъявляемым к нему.

Работоспособный объект – объект, который может выполнять возложенные на него функции.

Отказ – изменение состояния объекта, исключающее возможность его дальнейшего функционирования.

Неисправность – изменение состояния объекта, приводящее к изменению степени его работоспособности.

Отличие в понимании исправного и работоспособного объекта показано на рис. 1.2.

На этом рисунке круг А соответствует множеству неисправных систем, круг В – множество работоспособных систем. При этом, область 1 символизирует подмножество отказавших объектов, область 2 – подмножество исправных объектов, а область 3 определяет неисправные, но работоспособные объекты.

Приведем еще несколько определений, которыми будем пользоваться в дальнейшем.

Диагностический сигнал – контролируемая характеристика объекта, используемая для выявления диагностических признаков. По диагностическому сигналу может классифицироваться вид мониторинга и диагностики. Так, например, различают вибрационную, акустическую, тепловую, газодинамическую и т. п. диагностику.

Диагностический признак – свойство объекта, качественно отражающее его состояние, в том числе и появление каких-либо отклонений и дефектов.

Диагностический параметр – количественная характеристика измеряемого диагностического сигнала, входящая в совокупность показателей состояния объекта.

Диагностическая система – совокупность аппаратных и программных средств для измерения, обработки и интерпретации диагностического сигнала. В простейших случаях диагностическая система может состоять из измерительного инструмента и набора правил, которыми надлежит поль-

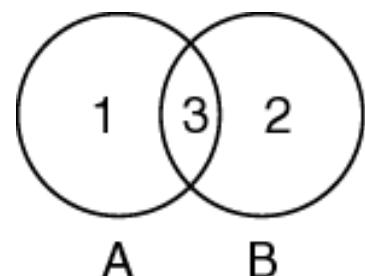


Рис. 1.2. Соотношение понятий «неисправность» и «рабочоспособность»

зоваться оператору при проведении диагностических работ. В других случаях, диагностическую систему может составлять несколько компьютеров (микрокомпьютеров), работающих под управлением специально разработанных программ.

Диагностический эксперимент – испытание объекта диагностики, спланированное и выполненное с целью получения диагностической информации (определения диагностических параметров). В зависимости от применяемых методов диагностики эксперимент может протекать как по специально разработанной программе, так и в условиях рядовой эксплуатации объекта диагностики.

1.4. Классификация диагностических систем

Известные в настоящее время диагностические системы характеризуются большим разнообразием технических средств измерения и обработки диагностического сигнала, а также методов и правил решения диагностической задачи. Обобщенно, в зависимости от признака, классификация диагностических систем представлена схемой (рис. 1.3).

Вид диагностического сигнала определяет особенности исполнения измерительного оборудования. Так, например, если диагностическим признаком является температура на некоторой контролируемой поверхности машины, то и измерять необходимо температуру. В этом случае можно говорить о тепловой системе диагностики. Вместе с тем такое деление носит условный характер, так же, как и условно деление самих природных процессов, протекающих в действительности в сложной взаимосвязи друг с другом. Например, контроль температуры возможен и с применением тепловых красок, меняющих свой цвет в зависимости от температуры. В этом случае диагностическая система по праву может считаться как оптической, так и тепловой. Необходимо отметить, что перечень наименований диагностических систем по рассматриваемому признаку ограничен из методических соображений и легко может быть расширен.

В зависимости от степени автоматизации различают экспертные и автоматические системы диагностики. В первом случае решение о техническом состоянии объекта принимает человек (эксперт), во втором – техническая система, как правило, компьютерная программа.

Системы, у которых все оборудование (датчики, приборы для измерения и анализа диагностического сигнала и т. п.) расположено непосредственно на объекте принято называть бортовыми системами диагностики.



Рис. 1.3. Схема классификации диагностических систем

Если бортовая система была спроектирована и установлена на объекте в процессе его изготовления, то систему называют встроенной. Если бортовое диагностическое оборудование добавлено к объекту в ходе эксплуатационной модернизации, то систему называют встраиваемой. Бортовые системы, с одной стороны, удорожают стоимость технического объекта, но, с другой стороны, делают его наиболее контролепригодным.

Стендовые системы диагностики позволяют использовать диагностическое оборудование (стенд) для диагностики различных объектов одного или схожих видов. В зависимости от конкретного исполнения, они подразделяются на стационарные и переносные. Встречаются и комбинированные системы, в которых часть оборудования (обычно средства сбора данных) встроены в машину, а другое оборудование (анализаторы данных) является переносным или даже стационарным. Такой подход позволяет добиться компромиссного решения в выборе предпочтений между стоимостью и контролепригодностью объекта.

В зависимости от вида и формы проведения диагностического эксперимента можно выделить тестовые и функциональные системы диагностики. Тестовые системы диагностики предполагают проведение испытания (теста) по специальной программе. При этом, возможно, что воздействия, оказываемые на объект в ходе такого испытания, окажутся вне диапазона обычных условий эксплуатации. Подвергая машину работе на предельных нагрузках, удается получить ценную информацию диагностического характера и, следовательно, повысить эффективность эксперимента. Вместе с тем, в случае применения тестовых систем возрастает стоимость диагностических работ, прежде всего, за счет увеличения трудоемкости, а в ряде случаев и за счет дополнительного расхода энергоресурсов. Например, испытание силовой установки тепловоза на режиме номинальной мощности потребует непроизводительного расхода нескольких десятков килограммов топлива. При тестовых испытаниях изоляции электрических машин повышенным напряжением высока вероятность ее электрического пробоя. Этот метод относят к методам разрушающего контроля. Указанных недостатков лишены функциональные системы диагностики, для которых диагностическим экспериментом является обычная эксплуатация объекта, но чаще – некоторые особые режимы работы объекта, периодически возникающие в ходе его рядовой эксплуатации.

Контрольное задание № 1

а) Письменно ответить на вопрос:

Таблица 1.1

№ вопроса	Предпоследняя цифра шифра	Вопрос
1	0–1	Назовите назначение и основные задачи диагностики
2	2–3	В чем заключается основной принцип диагностики?
3	4–5	В чем разница между исправным объектом и неисправным, работоспособным и неработоспособным?
4	6–7	Укажите место в предложенной классификации диагностического комплекса «Вектор 2000», широко применяемого при диагностике колесо-моторных блоков локомотивов
5	8–9	Дайте сравнительный анализ тестовых и функциональных систем диагностики

б) Решить задачу:

При диагностических испытаниях дизеля TOYOTA-2С установлено, что фактический угол опережения подачи топлива насосом, составляет j_{ϕ} (табл. 1.2). Испытания проводились при частоте вращения коленчатого вала n_{ϕ} . Дизель оснащен регулятором угла опережения подачи. Техническими условиями для дизеля определено, что начало подачи топлива насосом при частоте вращения коленчатого вала, равной 800 мин^{-1} , должно происходить при $11 \pm 1^\circ$ до верхней мертвой точки (ВМТ), а при частоте вращения 2000 мин^{-1} – при $21 \pm 1^\circ$ до ВМТ. Ответить на вопрос: соответствует (исправен) или нет (не исправен) диагностируемый дизель техническим условиям. При решении задачи указать величину диагностического симптома, рассчитать эталонное значение диагностического параметра.

Таблица 1.2

№ варианта (последняя цифра шифра)	Фактическая частота вращения n_{ϕ} , мин^{-1}	Фактический угол опережения подачи топлива j_{ϕ} , $^\circ$ до ВМТ
1	950	15
2	1100	15
3	1250	16
4	1400	16
5	1550	16
6	1700	18
7	1850	18
8	2150	22
9	2300	22
0	2450	24

Методические указания к решению задачи:

Последовательность решения задачи определяется схемой, представленной на рис. 1.1.

Из условия задачи следует, что диагностический параметр – угол опережения подачи топлива (УОПТ) определяется не только техническим состоянием объекта, но и внешними условиями – скоростным режимом работы двигателя. В соответствии с рис. 1.1 необходимо составить математическую модель для расчета эталонного значения диагностического параметра, учитывающую влияние частоты вращения коленчатого вала на значение УОПТ. Характеристику регулятора УОПТ следует считать линейной.

Таким образом, задача построения математической модели сводится к описанию уравнения прямой линии, заданной двумя координатами.

Предельное значение диагностического симптома, как следует из условия задачи, составляет 1° угла поворота коленчатого вала для всех вариантов.

Сведения из элементарной математики:

Уравнение прямой линии в координатных осях y - x , проходящей через точку $(0, a)$, описывается уравнением вида:

$y = a + kx$, где k – угловой коэффициент. Если известны координаты двух точек, лежащих на прямой (x_1, y_1) и (x_2, y_2) , то значение коэффициентов определяются следующими выражениями:

$$a = y_1 - \frac{x_1(y_2 - y_1)}{x_2 - x_1}, \quad k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

2. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ТЕСТЫ

Применение вычислительной техники для решения диагностических задач предполагает возможность формального математического описания любой сложной технической системы. Идеализированное представление технической системы с помощью математического аппарата называют математической моделью или просто моделью объекта. Для математических моделей типичным является представление объекта совокупностью элементов и связей между ними. При этом неизбежно приходится считаться с потерей некоторых реальных свойств системы, введением допущений и, как следствие этого, – неточностью модели. Важно, чтобы модель была способна выделить и правильно отразить наиболее существенные

ные свойства объекта. Содержание этих свойств определяется целью моделирования. Для диагностической модели объекта такой целью является оценка технического состояния и отыскание неисправностей.

Как отмечалось ранее, проведение диагностических работ неизбежно связано с измерениями фактических величин параметров диагностики. Эти измерения могут выполняться как непосредственно на объекте (во время обычной его работы), так и на специальных стендах в ходе специально спланированных тестов. В настоящем разделе пособия под тестом будем понимать испытание объекта с целью решения диагностической задачи. Задачи различают в зависимости от их уровня.

Проверяющий тест – тест, выполняемый для оценки работоспособности или неработоспособности объекта в целом.

Локализующий тест – тест, выполняемый для местонахождения неисправности объекта.

Диагностический тест – тест, выполняющий функцию проверяющего и локализующего теста.

Как правило, тест может включать несколько измерений, например проверок функциональности ряда элементов системы. Каждую такую проверку будем называть *элементарной проверкой*. Тест, в общем случае, состоит из ряда элементарных проверок.

2.1. Анализ функциональной модели объекта

К настоящему времени разработан мощный математический аппарат, позволяющий проводить диагностические тесты оптимальным образом. Как правило, критерием оптимальности является минимизация числа элементарных проверок. Наибольшее практическое применение этот аппарат нашел в диагностике электрических цепей, когда сколь угодно сложная техническая система может быть представлена совокупностью элементов с четко обозначенными связями. Одной из первых моделей, применяемой для целого класса технических систем, стала модель, предложенная в 1961 г. Брюле, Джонсоном и Клетским в работе «Отыскания неисправностей в технических системах».

При построении этой модели предполагается, что объект диагностики может быть представлен совокупностью связанных между собой функциональных элементов. При этом под функциональным элементом понимают часть системы, которая может находиться только в одном из двух несогласимых состояний: работоспособном или неработоспособном. В работоспособном состоянии элемент должным образом реагирует на некоторое внешнее воздействие, в противном случае элемент неработоспособен.

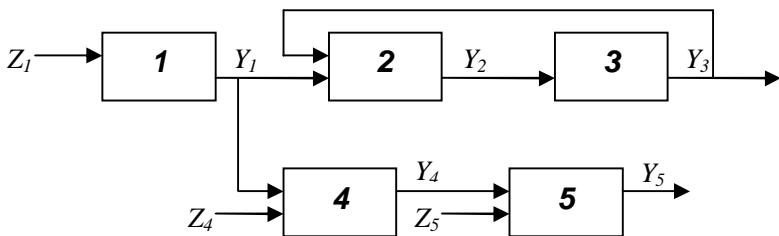


Рис. 2.1. Схема объекта диагностики

Наиболее наглядное представление такой диагностической модели может быть выполнено графически. Для простоты изучения на рис. 2.1 техническая система представлена пятью элементами (показаны прямыми линиями).

Внешние воздействия обозначены символами Z_1 , Z_4 , Z_5 . Реакции элементов обозначены символами Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 , Y_5 . Обратите внимание, что каждый элемент имеет соответствующую ему реакцию (в противном случае, его нельзя было бы выделять как отдельный функциональный элемент). Реакции могут быть одновременно воздействиями для соответствующих элементов. Например, реакция Y_1 является воздействием для элемента 4, а реакция Y_3 – для элемента 2.

При графическом представлении объекта, сравнительно легко анализируются возможные причины отсутствия должной реакции элемента. Так, отсутствие реакции Y_4 , является следствием неработоспособности одного из элементов 4 или 1, или обоих одновременно.

После выявления числа элементов и установления связей можно определить все возможные состояния системы. Для этого достаточно перечислить все необходимые комбинации отказавших элементов. Если система состоит из N элементов, то каждую такую комбинацию представляют N -мерным вектором состояния S . Принято обозначать единицей работоспособный элемент, а нулем – неработоспособный. Обозначение $S = (01011)$ означает, что 1-й и 3-й элементы системы отказали, а 2-й, 4-й и 5-й – работоспособны. Исходному (исправному) состоянию соответствует так называемый нулевой вектор состояния $S_0 = (11111)$. Максимальное число состояний, включая исправное, равно 2^N . Очевидно, что вариантов неисправностей будет на единицу меньше $2^N - 1$ (для рассматриваемой системы из 5 элементов: $2^5 - 1 = 31$). Рассмотрим задачу поиска минимального числа проверок, необходимых для постановки диагноза. Наиболее просто эта задача решается применительно к оценке состояния системы в целом. Для этого достаточно подать внешние воздействия и если реакции Y_3 , Y_5 допустимы, то система исправна, в противном случае – неисправна. Как видно, для этого понадобился всего один тест (состоящий из двух элементарных проверок).

Несколько сложнее выглядит задача идентификации неисправностей.

Каждая проверка устанавливает работоспособность или отказ группы из m элементов ($m \geq 1$). При этом остальные $N - m$ элементов остаются непроверенными. Теоретически число возможных проверок равно числу вариантов неисправностей $2^N - 1$. Однако на практике их меньше. С одной стороны, чтобы к элементу 2 приложить воздействие от отказавшего элемента 1 необходимо физически разорвать связь между ними, что не всегда возможно. С другой стороны, на практике не часто встречается система, у которой отказали одновременно несколько элементов, и тем более все. Большинству реальных систем свойственно появление отказа отдельного элемента, после чего дальнейшее функционирование системы невозможно.

Рассмотрим задачу идентификации неисправностей в предположении, что одновременно возможен отказ только одного элемента. При этом число возможных неисправных состояний системы равно числу элементов. Будем полагать, что проверка предполагает контроль реакции одного из элементов системы в ответ на все приложенные внешние воздействия Z_1, Z_4, Z_5 . Обозначим p_i проверку реакции i -го элемента. Если реакция допустима, то $p_i = 1$, в противном случае $p_i = 0$.

Заполним таблицу неисправностей (табл. 2.1)

Таблица 2.1

Таблица неисправностей к рис. 2.1

Неисправный элемент	Вектор состояния, s	Результаты проверок, Π				
		π_1	π_2	π_3	π_4	π_5
все исправны	11111	1	1	1	1	1
первый	01111	0	0	0	0	0
второй	10111	1	0	0	1	1
третий	11011	1	0	0	1	1
четвертый	11101	1	1	1	0	0
пятый	11110	1	1	1	1	0

Первая строка таблицы соответствует работоспособному состоянию системы (проверки реакции всех элементов дают положительный результат). Предположим, что отказал второй элемент, тогда реакции Y_2, Y_3 будут недопустимыми. При отказе элемента 1, недопустимой будет его реакция Y_1 , которая является воздействием на элементы 2 и 4. Следовательно, недопустимыми будут реакции Y_2, Y_4 и связанные с ними Y_3, Y_5 . Таким образом, занося исходы проверок в соответствующие графы, получим таблицу неисправностей для заданной схемы объекта. Обозначим множество проверок $\Pi = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$. По значению вектора Π можно одно-

значно определить неисправность некоторых элементов. Например, вектору $\Pi = \{00000\}$ соответствует единственная строка в таблице – неисправен третий элемент, а вектору $\Pi = \{11101\}$ – соответствует неисправность четвертого элемента. Вместе с тем, неисправностям второго и третьего элемента соответствует одинаковый вектор $\Pi = \{10011\}$ (строки в таблице выделены). Такую ситуацию называют *неопределенной* или *неразличимой*, а неисправности – *неразличимыми*. Одним из способов устранения неопределенных ситуаций является ввод дополнительной проверки. В нашем случае, принудительная подача допустимого воздействия Y_3 на второй элемент (если это возможно конструктивно) и проверка его реакции Y_2 позволит оценить исправность второго элемента. В случае его отказа, локализация неисправности была бы выполнена за 2 теста, в противном случае понадобится большее число тестов.

Другой способ позволяет обойтись без ввода дополнительных тестов. В этом случае требуется изменение существующей структуры объекта. Это может быть выполнено устранением (на время теста) обратной связи между элементами 3 и 2 (рис. 2.2). Отсутствующее воздействие Y_3 придется при проведении теста имитировать, подавая его на вход элемента 2 как внешнее воздействие Z_{2-Y3} .

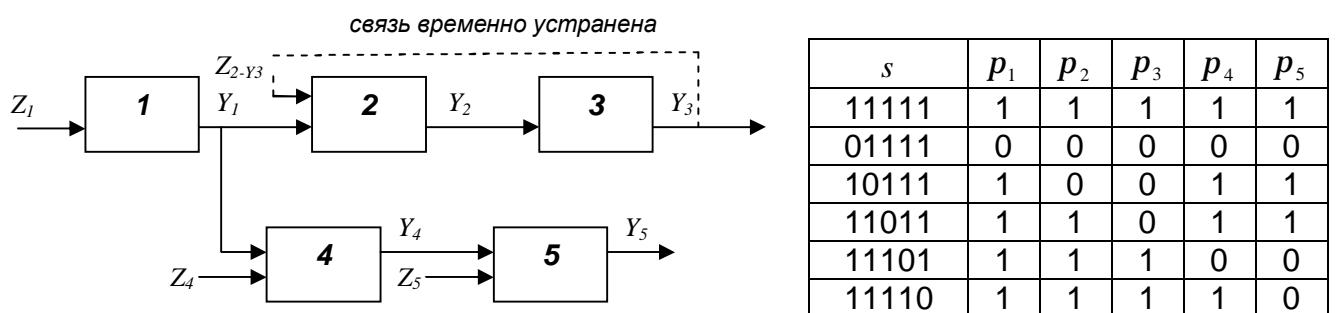


Рис. 2.2. Устранение неразличимой ситуации

Как видно (рис. 2.2), в таблице неисправностей измененной структуры объекта нет повторяющихся векторов проверок. Для идентификации отказа любого элемента достаточно одного теста!

Следует отметить, что рассмотренные способы устранения неразличимых ситуаций могут быть осуществлены на практике только при соответствующих конструктивных исполнениях системы. Очевидно, что условия контролепригодности необходимо учитывать еще на этапе проектирования технических систем.

Анализируя диагностическую модель, представленную на рис. 2.1 и 2.2 можно прийти к выводу, что как для оценки работоспособности объекта в целом, так и для локализации неисправностей, число элементарных про-

верок может быть сокращено. Одной из задач рассматриваемых методов диагностики является планирование минимальных тестов. Применение математического аппарата позволяет эффективно решать эту задачу для систем имеющих значительно большее число элементов и связей, чем было принято в наших примерах.

2.2. Анализ граф-моделей

Для рассматриваемого класса моделей объект может быть представлен граф-моделью. Перечислим условия, при которых возможно представление функциональной модели объекта ориентированным графом с петлями у каждой вершины:

- 1) в системе состоящей из произвольного числа N элементов одновременно возможен отказ только одного элемента;
- 2) в системе возможна проверка реакции каждого элемента на допустимые внешние воздействия, приложенные к системе в целом;
- 3) реакция каждого элемента принимает одно из двух взаимоисключающих значений – 1 или 0 (элемент работоспособен или неработоспособен);
- 4) для любых двух, связанных элементов отрицательная реакция (реакция со значением 0) первого элемента приведет к отрицательной реакции второго элемента.

На рис. 2.3 изображен граф системы, функциональная модель которого показана на рис. 2.1. Вершинам графа соответствуют элементы. Внешние воздействия и внешние реакции не указываются, а связи между элементами должны совпадать. Кроме того, каждой вершине соответствует петля – связь к самой себе. Для математического описания граф-моделей используют два типа матриц: матрицы дуг и матрицы путей.

Матрица дуг $B = \{b_{ij}\}$ графа G , содержащего N вершин, – это квадратная матрица с N строками и N столбцами, в которой число b_{ij} , стоящее на пересечении i -й строки и j -го столбца, равно единице, если в графе имеется дуга, ведущая из i -й вершины в j -ю, и равно нулю, если такой дуги нет. Поскольку каждая вершина имеет дугу, то все числа, стоящие на главной диагонали матрицы равны единице, т. е. $b_{ii} = 1$, если $i = j$.

Матрица дуг графа, изображенного на рис. 2.3, имеет вид:

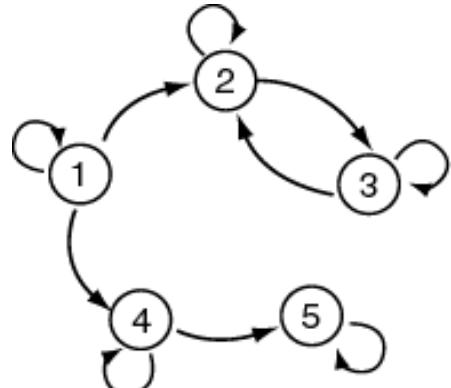


Рис. 2.3. Граф системы

$$B = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| \end{array}. \quad (2.1)$$

Матрица путей $D = \|d_{ij}\|$ графа G , содержащего N вершин, – это квадратная матрица с N строками и N столбцами, в которой число d_{ij} , стоящее на пересечении i -й строки и j -го столбца, равно единице, если в графе существует путь, ведущий из i -й вершины в j -ю, и равно нулю, если такого пути нет.

Матрица путей может быть получена не только анализом путей графа (что просто для человека), но и вычислениями на основании матрицы дуг (так делает машина). При этом справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} B_0 &= B, \\ B_k &= (B_{k-1} \otimes B_{k-1}) \oplus B_{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2.2)$$

где \oplus – знак булевого сложения; \otimes – знак булевого умножения.

Определяя последовательно матрицы B_1, B_2, \dots, B_k , можно увидеть, что для некоторого k будет выполняться равенство $B_{k+1} = B_k$. Матрица B_k есть матрица путей этого графа: $B_k = D$.

Матрица путей графа, заданного матрицей (2.1), имеет вид:

$$D = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| \end{array}. \quad (2.3)$$

Номер столбцов матрицы путей можно отождествлять с номерами проверок, а числа d_{ij} рассматривать как результат этих проверок (при положительном исходе $d_{ij} = 0$, а при отрицательном $d_{ij} = 1$). Таким образом, рассматривая i -ю строку матрицы путей, можно определить те проверки,

которые будут иметь отрицательный исход при отказе i -й вершины графа (i -го элемента системы), или наоборот, зная исходы всех проверок, можно определить те вершины, отказ которых влечет эти исходы.

Если инвертировать матрицу путей (заменить 1 на 0 и наоборот), то получим таблицу неисправностей (см. табл. 2.1).

Для определения перечня неразличимых отказов необходимо найти в матрице путей вершины, которым соответствуют попарно тождественные строки (или столбцы). В матрице (2.3) это 2-я и 3-я вершины.

Для построения минимального проверочного теста выполним следующие преобразования исходного графа G :

Объединим в одну вершину все вершины, принадлежащие к одному подмножеству неразличимых (в нашем примере таких подмножеств одно, в него входят вершины 2 и 3). При этом все дуги, соединяющие вершины из подмножества между собой опускаются. Получим приведенный граф G' (рис. 2.4)

Матрица путей приведенного графа будет иметь вид:

$$D' = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2' & 4 & 5 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2' \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \left\| \begin{array}{ccccc} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\| \end{array}. \quad (2.4)$$

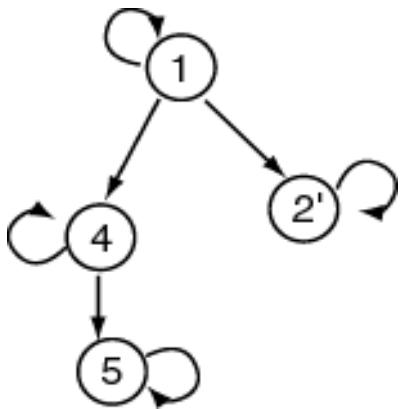


Рис. 2.4. Приведенный граф

Приведенный граф любой произвольной системы обладает следующими свойствами:

- все строки попарно различимы;
- в матрице путей D' всегда будет, по крайней мере, одна вершина типа «вход» (столбец матрицы содержит только одну единицу), и, по крайней мере, одна вершина типа «выход» (строка матрицы содержит одну единицу).

Для того, чтобы проверяющий тест T_n был минимальным, необходимо и достаточно, чтобы в этот тест вошли все вершины типа «выход». Для нашего примера $T_n = \{2', 5\}$. То есть для ответа: работоспособна или неработоспособна система в целом, достаточно сделать две элементарные проверки. При выполнении этого теста можно делать либо проверку p_2 ,

либо проверку p_3 , так как новой вершине $2'$ может быть приписана любая из этих проверок.

При построении *минимальных локализующих тестов*, ищут элементарные проверки, от которых можно отказаться без возникновения неопределенных ситуаций. Что равноценно, поиску таких столбцов в матрице (2.4), при вычеркивании которых, оставшиеся строки останутся попарно различимыми. Оставшиеся после вычеркивания столбцы и определяют набор элементарных проверок, образующих минимальный тест. Для рассматриваемого примера минимальным локализующим тестом является $T_2 = \{2', 4\}$. Действительно:

$$D' = 2' \begin{array}{c|ccc} & 2' & 4 & 5 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 0 & 1 & 1 \\ 5 & 0 & 0 & 1 \end{array},$$

после вычеркивания 1 столбца получаем матрицу

в которой все строки попарно различимы. После удаления столбца $j = 5$ получим тоже матрицу с попарно различимыми строками:

$$D' = 2' \begin{array}{c|cc} & 2' & 4 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ 4 & 0 & 1 \\ 5 & 0 & 0 \end{array},$$

которую дальше упростить нельзя.

Если же в исходной матрице путей приведенного графа (2.4) удалить, например, 2-й столбец, $j = 2'$, то в полученной матрице

$$D' = 2' \begin{array}{c|ccc} & 1 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

невозможно найти столбец, после вычеркивания которого строки остались бы попарно различимыми. Таким образом, требуется три элементарных проверки. Аналогичная ситуация возникает и при удалении в первоначальной матрице столбца $j = 4$.

Существуют правила, которыми полезно пользоваться при поиске минимальных локализующих тестов:

- если какая-либо из вершин графа типа «вход» имеет только одну исходящую из нее дугу, то она обязательно войдет в минимальный диагностический тест (в рассматриваемом примере такой вершины нет);
- только одна из вершин типа «выход» может иногда не входить в минимальный локализующий тест. Если в графе одна вершина типа «выход», – то она обязательно должна войти в локализующий тест.

Как отмечалось выше, *минимальный диагностический тест* может быть получен объединением минимальных проверочных и локализующих тестов. В нашем примере, минимальный тест, позволяющий оценить работоспособность системы, а в случае неисправности указать на отказавший элемент, будет $T_n = \{2', 4, 5\}$.

В заключение необходимо отметить, что поиск минимальных диагностических тестов может быть осуществлен формальными методами с помощью специально разработанных алгоритмов (алгоритмы Яблонского, Синдеева и других авторов), которые рассматриваются в специальной литературе и выходят за рамки настоящего курса.

Контрольное задание № 2

Для заданного функциональной моделью (табл. 2.2) объекта диагностики необходимо найти минимальные проверочные, локализующие и диагностические тесты.

Таблица 2.2

Предпоследняя цифра шифра	№ схемы	Функциональная модель
0,1	1	<pre> graph LR In(()) --> B3[3] B3 --> B4[4] B3 --> B1[1] B4 --> B5[5] B4 --> B2[2] B1 --> B2 B1 --> B5 </pre>
2,3	2	<pre> graph LR In(()) --> B1[1] B1 --> B2[2] B1 --> B4[4] B2 --> B3[3] B4 --> B5[5] B3 --> B5 </pre>

Предпоследняя цифра шифра	№ схемы	Функциональная модель
4,5	3	<pre> graph LR In(()) --> 1[1] 1 --> 2[2] 2 --> 3[3] 3 --> Out1(()) 3 --> 4[4] 4 --> 5[5] 5 --> 6[6] 6 --> Out2(()) 6 --> 1 4 --> 1 </pre>
6,7	4	<pre> graph LR In(()) --> 1[1] 1 --> 2[2] 2 --> 3[3] 3 --> Out1(()) 3 --> 4[4] 4 --> 5[5] 5 --> 6[6] 6 --> Out2(()) 6 --> 1 4 --> 1 </pre>
8,9	5	<pre> graph LR In(()) --> 1[1] 1 --> 2[2] 2 --> 3[3] 3 --> Out1(()) 3 --> 4[4] 4 --> 5[5] 5 --> 6[6] 6 --> Out2(()) 6 --> 1 4 --> 1 </pre>

Методические указания к решению задачи:

При решении задачи следует придерживаться следующей последовательности:

а) Представить заданную функциональную модель объекта диагностики ориентированным графом. При необходимости выполнить приведение графа.

б) Для приведенного графа составить матрицу путей.

в) Анализируя матрицу путей найти проверки, составляющие минимальные проверяющий, локализующий и диагностический тесты в соответствии с изложенным выше материалом.

3. ОСНОВЫ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Методы диагностики, основанные на анализе сигнала вибрации (т. е. механических колебаний) элементов объекта называют методами вибрационной диагностики или вибродиагностикой. При акустической диагностике ис-

следуют звуковые волны (как правило, слышимого диапазона), распространяющиеся по различным средам, в том числе и по воздуху. Поскольку источником и вибрации, и звука являются колебательные процессы, то и методы исследования этих сигналов имеют много общего. В частности, при визуализации и анализе колебательных процессов различной природы одинаково успешно применяют *временное представление* сигнала и *спектральное представление* сигнала.

3.1. Гармонические колебания

3.1.1. Варианты представления колебаний

Временное представление сигнала – графическое изображение энергетической характеристики колебаний в зависимости от времени. Параметром q , характеризующим энергию колебаний, может выступать амплитуда колебаний (перемещение), скорость колебаний (скорость перемещения), ускорение и некоторые другие показатели. На рис. 3.1 (слева) представлена временная зависимость для периодических колебаний $q(t)$. Такое представление колебаний наиболее привычно для нас. Именно так будет выглядеть сигнал на экране осциллографа. Вместе с тем, для анализа сигнала рациональнее представлять его спектральной зависимостью (рис. 3.1 справа). При спектральном представлении сигнала $q(f)$ показывают зависимость параметра q (колебательной величины) от частоты колебаний f . В нашем примере колебания носят гармонический характер с одной и той же частотой $f_1 = \frac{1}{T_1}$, где T_1 – период колебаний.

$f_1 = \frac{1}{T_1}$, где T_1 – период колебаний.

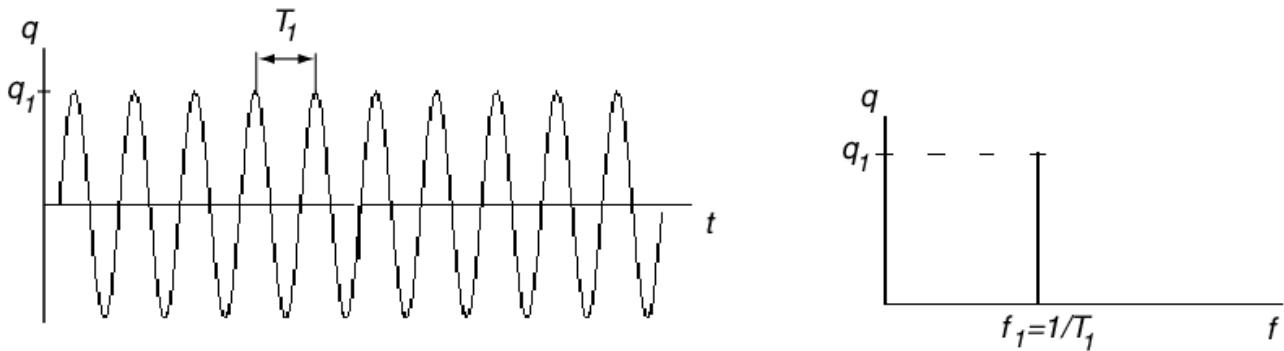


Рис. 3.1. Гармоническое колебание

Как известно, при гармонических (синусоидальных) колебаниях, значения колебательной величины пропорциональны синусу линейной функции времени так, что

$$q = q_a \sin(w \cdot t + j), \quad (3.1)$$

где q_a , w , j – постоянные величины, называемые параметрами гармонического колебания: q_a – амплитуда – наибольшее абсолютное значение,

достигаемое колебательной величиной (для рис. 3.1 $q_a = q_1$); $wt + j$ – фаза (фазовый угол) колебания, j – начальная фаза (начальный фазовый угол).

3.1.2. Сложение гармонических колебаний

В практике диагностики редко приходится иметь дело с сигналом, показанным на рис. 3.1. Такой сигнал мог бы быть получен при записи звука музыкального камертонна. Технический объект мало похож на музыкальный инструмент, хотя многие его отдельные элементы совершают колебательные процессы близкие к гармоническим. Так, например, звук, исходящий от работающего дизеля порожден многими колебательными процессами: вращением коленчатого вала, газораспределительного вала, вала турбокомпрессора, периодическим открытием и закрытием клапанов, возвратно поступательным движением поршней и другими. Многие из этих колебаний могут быть описаны уравнением (3.1), т. е. синусоидой, а слышим мы результат сложения этих синусоид. На рис. 3.2 приведен результат графического сложения временных и спектральных реализаций двух синусоидальных колебаний.

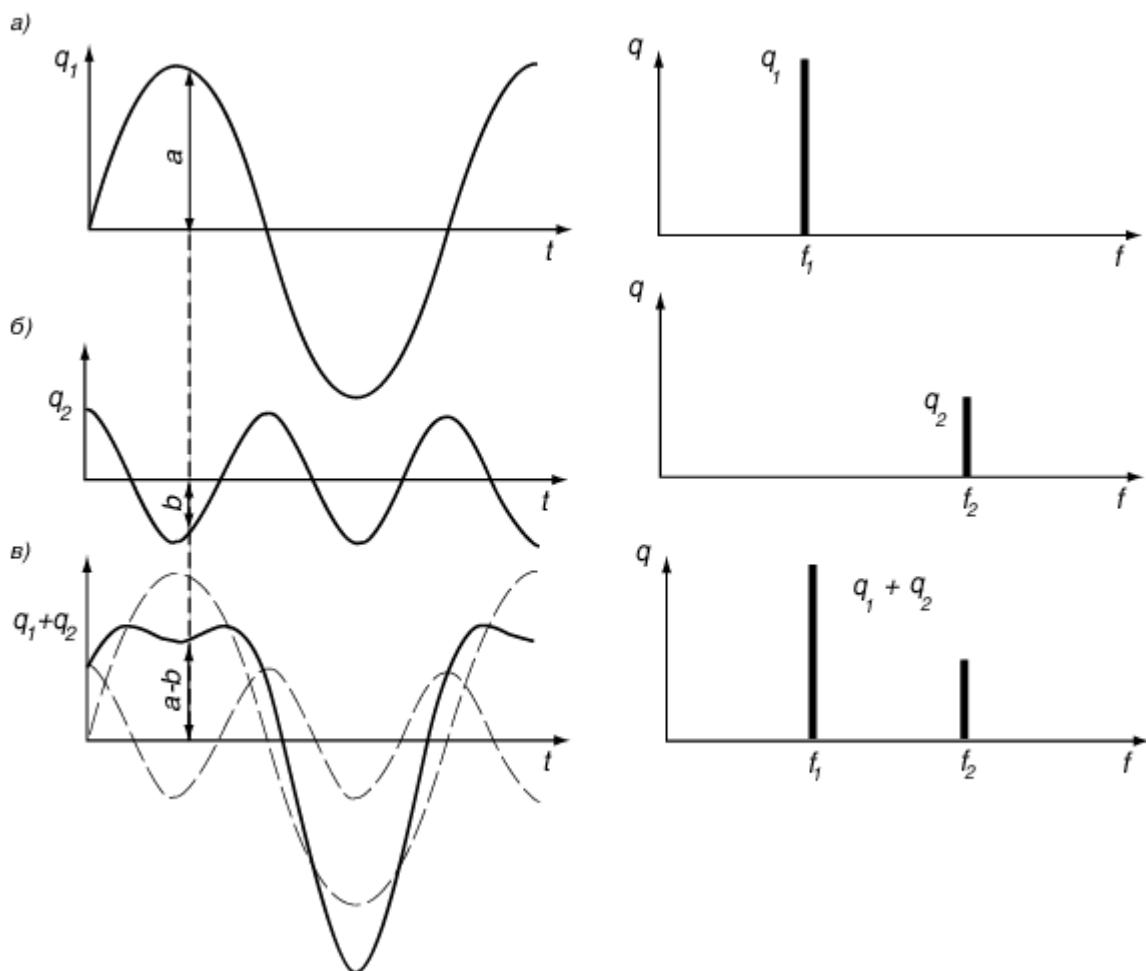


Рис. 3.2. Сложение гармонических колебаний: *а* – низкочастотное колебание; *б* – высокочастотное колебание; *в* – результат сложения колебаний

3.1.3. Гармонический анализ

На практике чаще приходится решать обратную по отношению к рассмотренной выше задачу – разложение некоторого сигнала на составляющие его гармонические колебания. В курсе математического анализа подобная задача традиционно решается разложением заданной функции в ряд Фурье, т. е. в ряд вида:

$$q(t) = \frac{a_0}{2} + (a_1 \cos wt + b_1 \sin wt) + (a_2 \cos 2wt + b_2 \sin 2wt) + \dots + (a_i \cos iwt + b_i \sin iwt) + \dots, \text{ где } i=1,2,3\dots \quad (3.2)$$

или

$$q(t) = S_0 + S_1 \sin(wt \pm j_1) + S_2 \sin(2wt \pm j_2) + \dots + S_i \sin(iwt \pm j_i) + \dots \quad (3.3)$$

Практическое разложение в ряд Фурье, называемое *гармоническим анализом*, состоит в нахождении величин $a_1, a_2, \dots, a_i, b_1, b_2, \dots, b_i$, называемых коэффициентами Фурье. По значению этих коэффициентов можно судить о доле в исследуемой функции гармонических колебаний соответствующей частоты, кратной w . Частоту w называют основной или несущей частотой, а частоты $2w, 3w, \dots, i \cdot w$ – соответственно 2-й гармоникой, 3-й гармоникой, i -й гармоникой. Применение методов математического анализа позволяет разложить в ряд Фурье большинство функций, описывающих реальные физические процессы. Применение этого мощного математического аппарата возможно при условии аналитического описания исследуемой функции, что является самостоятельной и, часто, не простой задачей.

Задача гармонического анализа может формулироваться как поиск в реальном сигнале факта присутствия той или иной частоты. Например, существуют методы определения частоты вращения ротора турбокомпрессора, основанные на анализе звука, сопровождающего его работу. Характерный свист, слышимый при работе двигателя с турбонаддувом, вызван колебаниями воздуха из-за движения лопаток рабочего колеса компрессора. Частота этого звука и частота вращения рабочего колеса пропорциональны. При использовании аналоговой измерительной аппаратуры в этих случаях поступают примерно так: одновременно с воспроизведением записанного сигнала с помощью генератора создают колебания заранее известной частоты, перебирая их в исследуемом диапазоне до возникновения резонанса. Частота генератора, соответствующая резонансу, будет равна частоте исследуемого сигнала.

Внедрение цифровой техники в практику измерений позволяет решать подобные задачи с применением расчетных методов. Прежде чем рассмотреть основные идеи, заложенные в этих расчетах, покажем отличительные особенности цифрового представления сигнала.

3.1.4. Дискретные методы гармонического анализа

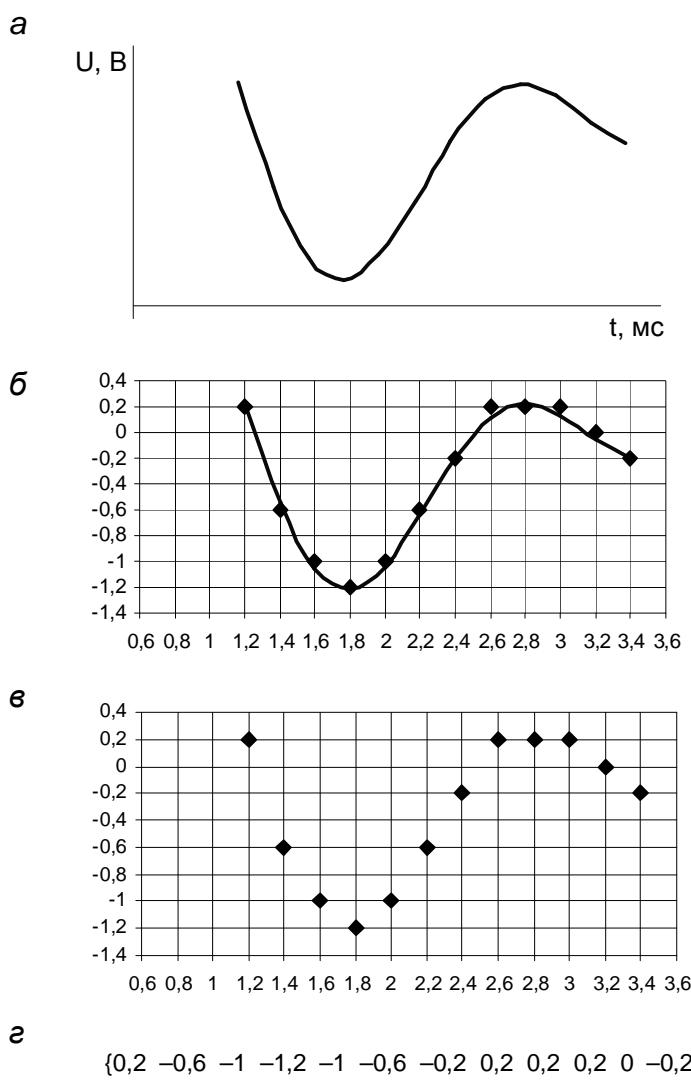


Рис. 3.3. Квантование по амплитуде и времени:
а – исходный сигнал; б – результат квантирования;
в, г – сохраненные данные

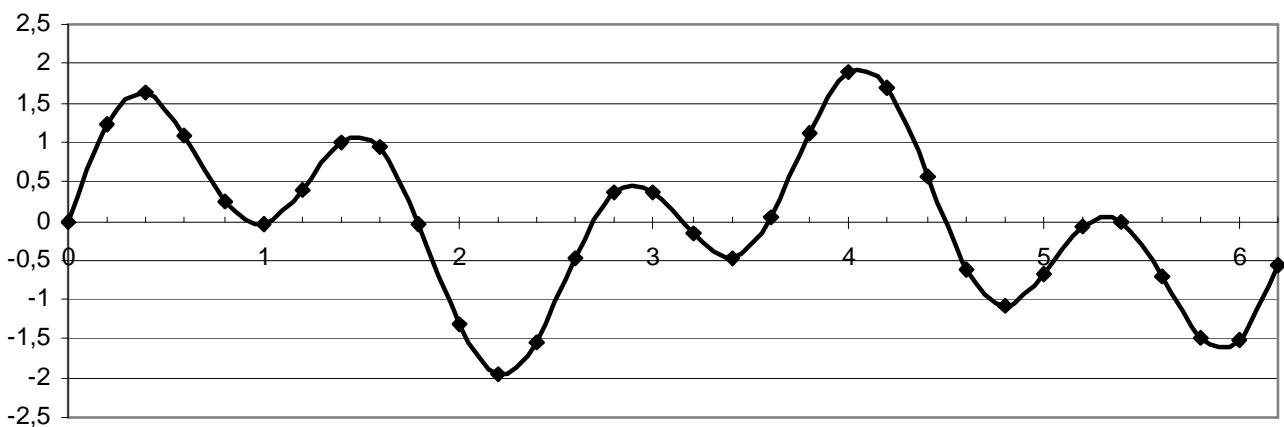
булевыми величинами («единица» или «ноль»), все возможные значения разрядности будут определяться как 2^n . Когда мы говорим, что звуковая карта нашего компьютера 16-разрядная, это означает, что весь допустимый интервал входной величины напряжения (ось ординат на рис. 3.3) будет разбит на $2^{16} = 65536$ равных интервалов.

При использовании цифровой аппаратуры реальный непрерывный сигнал (рис. 3.3, а) представляется набором точек, точнее значениями их координат. Для этого исходный сигнал, идущий, например, с микрофона или акселерометра, квантуется по времени и по амплитуде (рис. 3.3, б). Иначе говоря, измерение и запоминание величины сигнала происходит дискретно через некоторый интервал времени Δt , а само значение величины в момент измерения округляется до возможной ближайшей величины. Время Δt называют временем дискретизации, которое связано с частотой дискретизации обратной

зависимостью $f = \frac{1}{\Delta t}$. Количество интервалов, на которое разбита двойная амплитуда максимально допустимого сигнала, определяется разрядностью аппаратуры. Очевидно, что для цифровой электроники, оперирующей в конечном итоге

Как видно из рисунка, при цифровом способе измерения и хранения данных, часть исходной информации будет потеряна. Для повышения точности измерений следует повышать разрядность и частоту дискретизации преобразующей техники.

Вернемся к поставленной задаче – определению в произвольном сигнале присутствия определенной частоты. Для большей наглядности используемых приемов, рассмотрим сигнал, являющийся суммой двух гармонических колебаний: $q = \sin 2t + \sin 5t$, заданных с дискретностью $\Delta t = 0,2$ (рис. 3.4). В таблице рисунка приведены значения результирующей функции, которые будем далее рассматривать как пример некоторого произвольного сигнала.



t	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	...	5,8	6,0	6,2
q	0	1,231	1,626	1,073	0,243	-0,049	0,396	...	-1,487	-1,525	-0,569

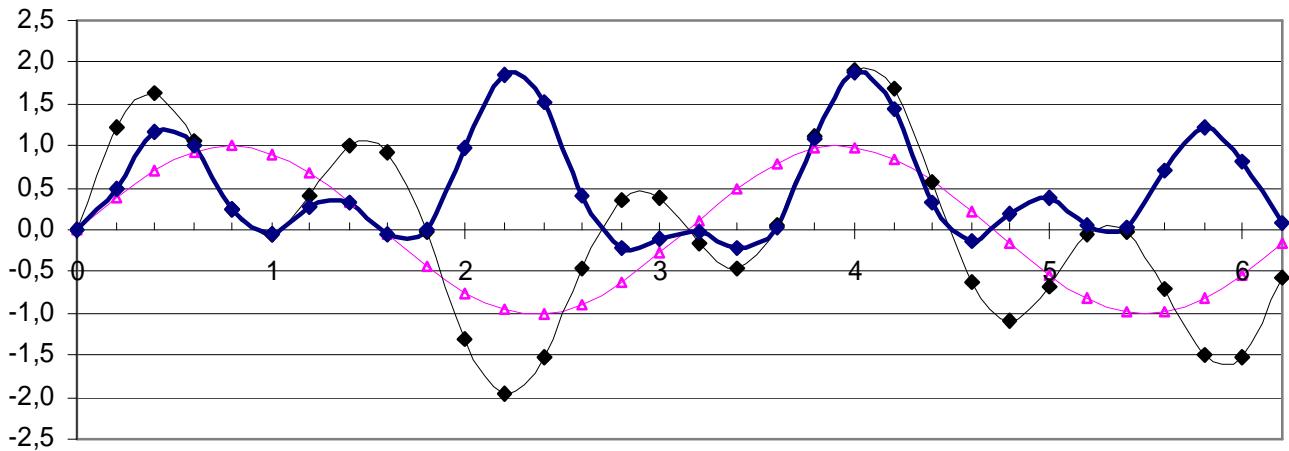
Рис. 3.4. Исследуемый сигнал

Для проверки присутствия в исследуемом сигнале интересующей нас частоты умножим исходную функцию на зависимость изменения колебательной величины при проверяемой частоте. После чего сложим (численно проинтегрируем) полученную функцию. Умножать и суммировать сигналы будем на определенном интервале – периоде несущей (основной) частоты. При выборе значения основной частоты, надо учитывать, что проверить возможно только большую, по отношению к основной, в n раз частоту. Выберем в качестве основной частоты $w = 1$, которой соответствует период $T = \frac{2\pi}{w} = 2\pi$.

Начнем проверку сразу с «правильной» (присутствующей в сигнале) частоты $y_n = \sin 2x$. На рис. 3.5 описанные выше действия представлены графически и численно. Следует обратить внимание, что результат умножения проходит преимущественно выше оси абсцисс, и поэтому сумма за-

метно больше нуля ($15,704 > 0$). Подобный результат был бы получен и при умножении исходного сигнала на $q_n = \sin 5t$ (пятая гармоника тоже присутствует в исследуемом сигнале). Причем результат подсчета суммы будет тем больше, чем больше амплитуда проверяемого сигнала в исследуемом.

—▲— Проверяемая частота —◆— Исследуемый сигнал —◆— Результат умножения



t	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	...	5,8	6,0	6,2
q	0	1,231	1,626	1,073	0,243	-0,049	0,396	...	-1,487	-1,525	-0,569
$\sin 2t$	0	0,389	0,717	0,932	0,999	0,909	0,675	...	-0,823	-0,537	-0,166
$q \cdot \sin 2t$	0	0,479	1,167	1,000	0,243	-0,045	0,268	...	1,223	0,818	0,094
											$\Sigma = 15,704$

Рис. 3.5. Проверка присутствия в исследуемом сигнале составляющей $q_n = \sin 2t$

Теперь выполним те же действия для не присутствующей в исследуемом сигнале частоты, например, для третьей гармоники $q_n = \sin 3t$ (рис. 3.6).

—▲— Проверяемая частота —◆— Исследуемый сигнал —◆— Результат умножения

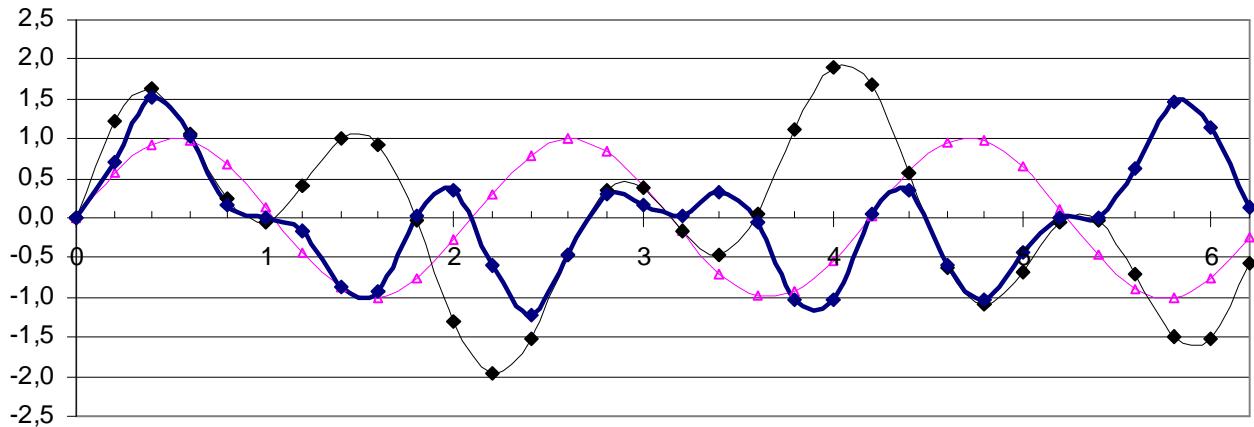


Рис. 3.6. Проверка присутствия в исследуемом сигнале составляющей $q_n = \sin 3t$

В этом случае кривая результата умножения (рис. 3.6) проходит как в области положительных амплитуд, так и отрицательных. Численное интегрирование этой функции даст результат, близкий к нулю ($\Sigma = -0.006$), что указывает на отсутствие этой частоты в исследуемом сигнале или, говоря другими словами, амплитуда исследуемой гармоники близка к нулю. Теоретически мы должны были получить ноль. Погрешность вызвана ограничениями дискретных методов из-за конечной величины разрядности и частоты дискретизации. Повторяя описанные выше действия нужное количество раз, можно выяснить наличие и уровень сигнала любой частоты, кратной несущей.

Не углубляясь в подробности можно сказать, что примерно такие действия выполняют в случае так называемого *дискретного преобразования Фурье*.

В рассмотренном примере для большей наглядности и простоты все сигналы имели одинаковый (нулевой) начальный фазовый сдвиг. Для учета возможных различных начальных фазовых углов описанные выше действия выполняют с комплексными числами.

Известно множество алгоритмов дискретного преобразования Фурье. Результат преобразования – спектр – часто представляют не линейчатым, а сплошным. На рис. 3.7 показаны оба варианта спектров для исследуемого в рассмотренном примере сигнала

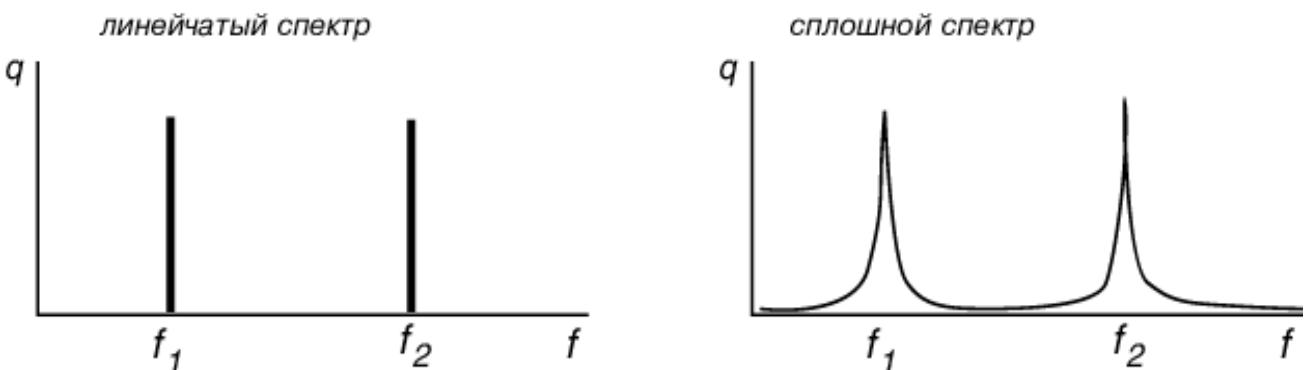


Рис. 3.7. Варианты спектров

Действительно, если бы мы в рассмотренном выше примере выполнили проверку не только для частот строго кратных основной, но и в окрестностях кратных частот, то обнаружили бы, что метод показывает наличие эти гармонических колебаний с амплитудой больше нуля. Применение сплошного спектра при исследовании сигналов обосновано еще и тем, что выбор основной частоты в исследованиях носит во многом случайный характер.

3.1.5. Затухающие колебания

Незатухающие периодические сигналы на практике являются нереализуемыми математическими абстракциями. Их рассмотрение в рамках данного раздела необходимо было для того, чтобы перейти к рассмотрению затухающего гармонического сигнала, представляющего большой интерес для задач диагностики. Варианты такого сигнала представлены на рис. 3.8.

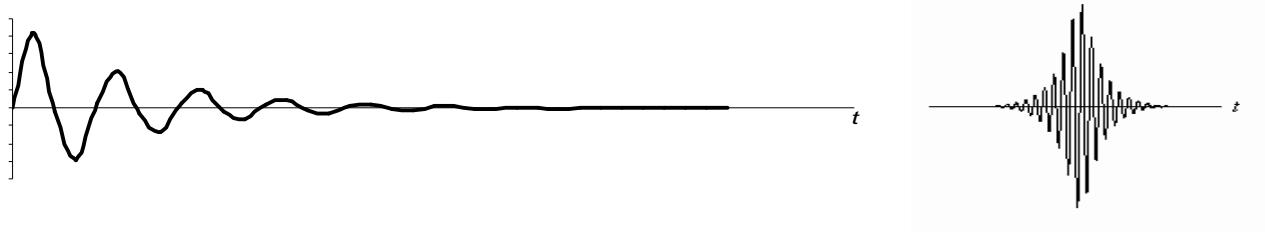


Рис. 3.8. Затухающие гармонические колебания

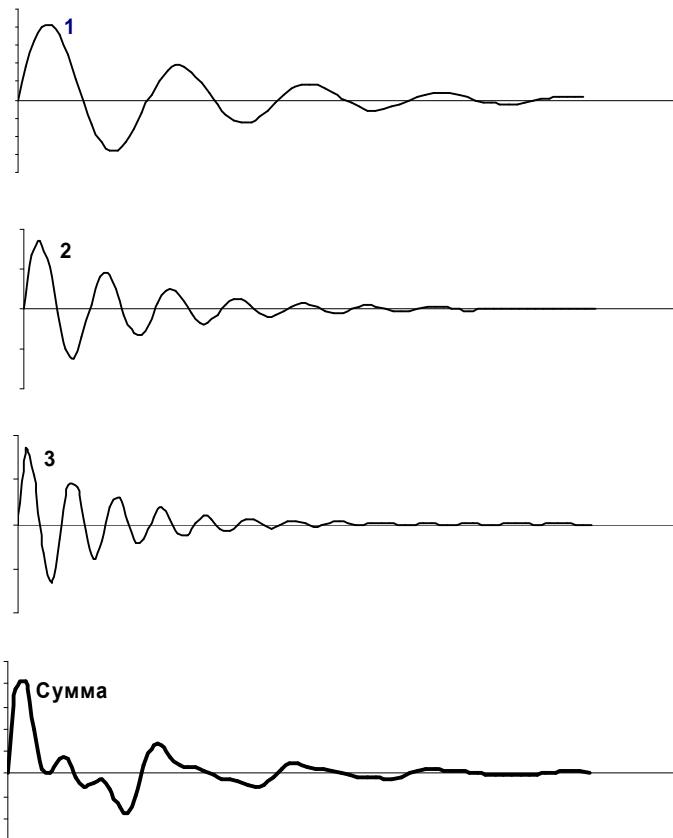


Рис. 3.9. Сложение затухающих колебаний

Строго говоря, такие затухающие синусоидальные сигналы гармоническими не являются, и называют их почти периодическими или квазипериодическими. Однако по сути это ничего не меняет. Как и чисто синусоидальный, затухающий гармонический сигнал тоже не имеет гармоник, и так же точно не может быть получен путем интерференции более простых его составляющих. Получают такой сигнал в результате ударного воздействия на колебательную систему. В зависимости от характера этого воздействия и свойств колебательной системы результат может иметь не только плавное снижение амплитуды (рис. 3.8 слева), но плавное ее повышение на первональном участке (рис. 3.8 справа).

Как правило, ударное воздействие вызывает колебание не одной, а нескольких систем, каждая из которых может иметь свою частоту f_0 . Ниже показано сложение трех затухающих колебаний с разной частотой (рис. 3.9). Отмеченные выше особенности сложения гармонических колебаний и обратного преобразования – гармонического анализа – распространяются и на затухающие процессы. Рис. 3.9 иллюстрирует еще один важный для нас

впоследствии момент – колебания с низкой частотой меньше затухают во времени по сравнению с высокочастотными колебаниями. Связано это, прежде всего, с большей энергией колебательного процесса низкой частоты. Графически энергию колебательного процесса можно оценить площадью временной реализации в пределах одного периода. Очевидно, что при равных амплитудах колебаниям низкой частоты соответствует большая площадь из-за увеличения периода.

Справедливо и обратное – для того, чтобы вызвать низкочастотные колебания, требуются большие затраты энергии.

Указанные различия колебательных процессов сказываются и на особенностях распространения колебаний в среде: высокочастотные колебания затухают ближе к источнику, низкочастотные – на большем удалении от источника. Эту особенность необходимо учитывать при измерении вибрационных сигналов.

3.2. Оборудование для измерения вибрационных сигналов

Структурно большинство измерительных устройств, основанных на преобразовании неэлектрической величины в электрический сигнал, состоит из следующих основных блоков (рис. 3.10): первичные преобразователи (датчики); измерительные цепи; преобразующие цепи; блок индикации.

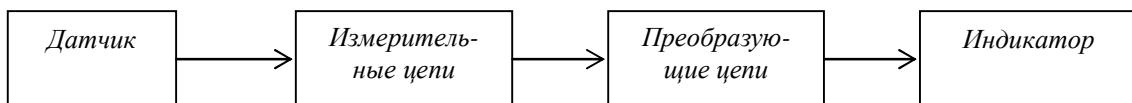


Рис. 3.10. Структурная схема устройств измерения

Как в качестве первичных преобразователей звука (акустоэлектрических преобразователей – микрофонов), так и преобразователей вибрации (вибропреобразователей) применяются конденсаторные, магнитострикционные, пьезокерамические, электромагнитные и другие преобразователи. Ввиду широкого распространения конденсаторных и пьезоэлектрических преобразователей рассмотрим их принципиальную конструкцию.

На рис. 3.11 представлена схема конденсаторного микрофона. Чувствительным элементом является мембрана, являющаяся одной из обкладок конденсатора. Второй обкладкой является корпус. При воздействии на мембрану звукового давления $P(t)$ она перемещается на величину x , вследствие чего

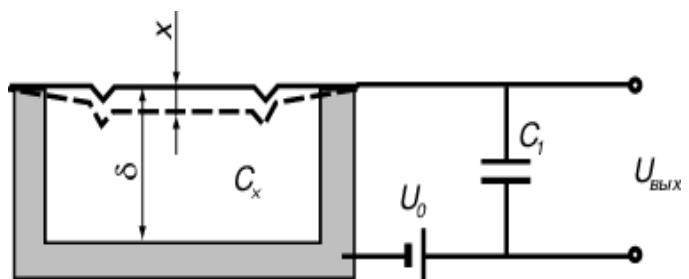


Рис. 3.11. Схема конденсаторного микрофона

уменьшается расстояние между обкладками конденсатора d , а следовательно, и его емкость C_x . Выходной сигнал – напряжение $U_{\text{вых}}$ для показанной схемы включения определяется еще напряжением питания U_0 и значением шунтирующей емкости C_1 :

$$U_{\text{вых}} = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_x}, \quad C_x = \frac{e_0 \cdot e \cdot S}{d - x_x},$$

где e_0 – диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха $e_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); e – относительная диэлектрическая проницаемость; S – площадь мембраны (обкладки конденсатора).

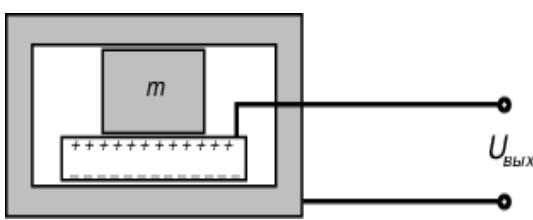


Рис. 3.12. Схема пьезопреобразователя ускорения

На рис. 3.12 приведена принципиальная схема устройства пьезопреобразователя, т. е. датчика, использующего пьезоэлектрический эффект. Функционально этот датчик является акселерометром, так как его выходная величина – заряд на обкладках кристалла, а следовательно, и напряжение $U_{\text{вых}}$, пропорциональны ускорению (второй производной перемещения по времени $x''(t)$). Количественно эта зависимость определяется уравнением:

$$U_{\text{вых}}(t) = a_u \cdot x''(t),$$

где a_u – чувствительность датчика по напряжению. Помимо свойств кристалла эта характеристика зависит и от минимального сопротивления элементов измерительной цепи (датчик, кабель или усилитель заряда). Это сопротивление должно быть как можно больше, чтобы слабый заряд на обкладках кристалла не гасился в виде теплоты на этом сопротивлении. Реально, при входном сопротивлении усилителя 10^9 Ом, типичные преобразователи обеспечивают $a_u = 3 \text{ мВ/м}\cdot\text{с}^{-2}$.

Практически все типы вибраакустических преобразователей, требуют усиления своего сигнала для передачи его на расстояния и последующего анализа (отображения). Влияние одной из важных характеристик усилителей – его входного сопротивления на результаты измерений только что рассматривалось. Добавим, что именно по этой причине не удается с помощью пьезоэффекта достоверно измерить перемещение элемента колебательной системы. Теоретически, деформируя кристалл в результате приложения извне некоторого усилия, мы вправе ожидать пропорционального этому усилию заряда и напряжения $U_{\text{вых}}$ столь долго, сколь долго будет приложено это усилие. В действительности, через некоторое время мы увидим, что $U_{\text{вых}} = 0$ вследствие описанного выше рассеяния сигнала в виде теплоты. Другой серьезной проблемой, вызванной характеристиками усилителей заряда является их нелинейность. Идеальный (линейный) усили-

тель обеспечил бы связь между входной и выходной величиной в соответствие с линейным законом: $U_{\text{вых}}(t) = k \cdot U_{\text{вх}}(t)$, где $k = \text{const}$. У реальных усилителей $k \neq \text{const}$, а может меняться в некоторых пределах в зависимости и от окружающих условий, и, что особенно плохо, от величины $U_{\text{вх}}$. Покажем, к чему приводит на практике нелинейность измерений. На рис. 3.13 изображен сигнал, искаженный в нелинейном усилителе. Как видно, это искажение приводит к смещению сигнала относительно оси t . В результате на спектре сигнала обнаружаются не только действительная частота (в примере 50 Гц), но и кратные ей частоты 100, 150 Гц и т. д.

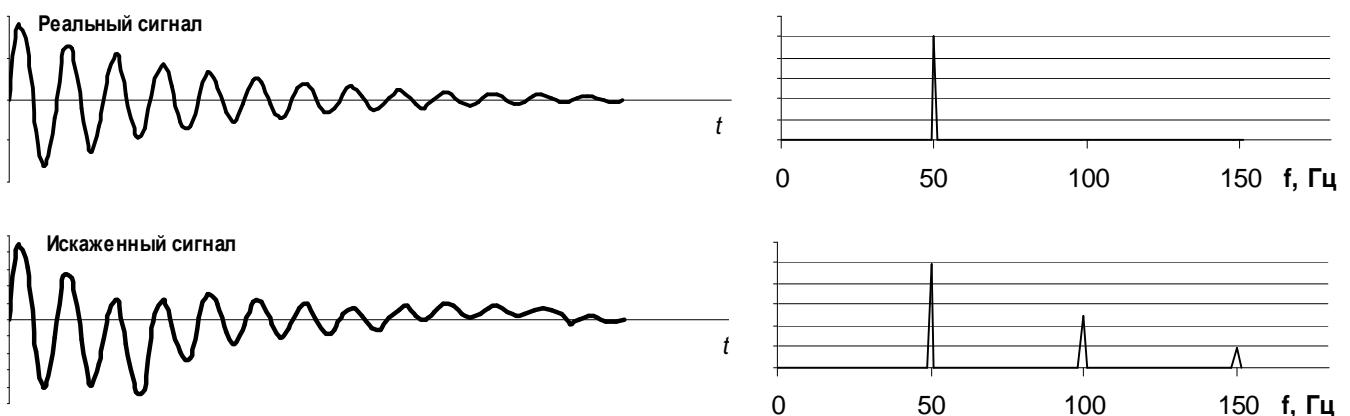


Рис. 3.13. Нелинейное искажение сигнала

Аналогичные искажения сигнала вибрации могут быть внесены в процесс распространения колебаний через среды, имеющие различные акустические характеристики. Отмеченную особенность следует учитывать при анализе реальных сигналов, так как нелинейные искажения присутствуют практически во всех случаях реальных измерений.

Усиленный сигнал может быть преобразован измерительным прибором должным образом в соответствии с назначением прибора. Наибольший интерес для целей вибродиагностики представляют приборы, предназначенные для анализа спектра – анализаторы спектра. Наряду с появившимися в последнее время цифровыми анализаторами преобразование временной зависимости в спектр возможно и с применением аналоговых приборов. Структурная схема такого устройства представлена на рис. 3.14.

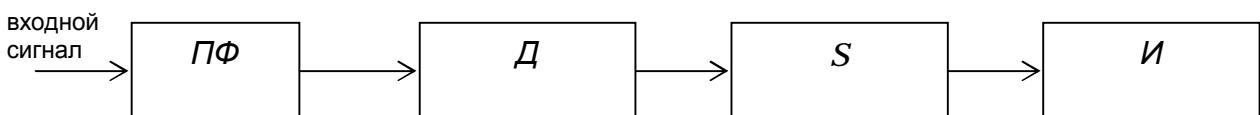


Рис. 3.14. Структурная схема аналогового анализатора спектра: ПФ – полосовой фильтр; Д – детектор; S – интегратор; И – индикатор

Входной сигнал предварительно подвергают фильтрации – выделению в нем определенной (исследуемой) частоты, после чего детектируют – определяют мгновенные значение амплитуды сигнала, которые накапливаются в интеграторе. Результат отображают с помощью устройств индикации. Большинство аналоговых анализаторов характеризуются последовательным подключением фильтров, в результате чего время анализа увеличивается. Применение параллельных фильтров значительно удорожает прибор. Этих недостатков лишены цифровые анализаторы (рис. 3.15).

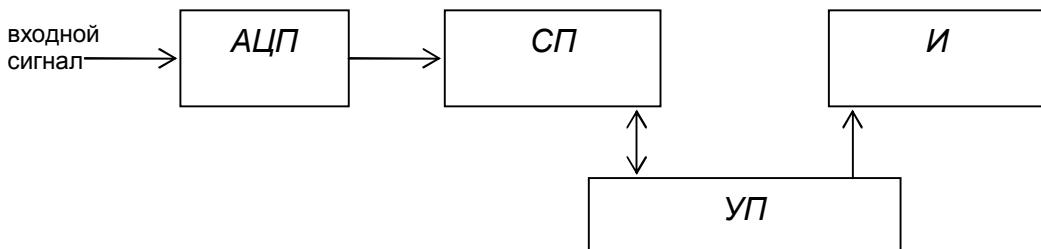


Рис. 3.15. Структурная схема цифрового анализатора спектра:
АЦП – аналого-цифровой преобразователь; СП – сигнальный процессор; УП – управляющий процессор; И – индикатор

Входной сигнал в цифровом анализаторе тоже может быть отфильтрован. Однако делают это не столько с целью последующего спектрального анализа, сколько для выделения наиболее информативного участка спектра и для устранения помех. Фильтрация осуществляется расчетами (цифровой фильтр), выполняемыми программой сигнального процессора. Здесь же происходит и вычисление спектра (как правило, по быстрым алгоритмам дискретного преобразования Фурье). Управляющий процессор отвечает за управление режимами работы устройства, отображением данных на дисплее (индикаторе) и т. д. Физически роль сигнального и управляющего процессоров может выполнять один микропроцессор.

3.3. Вибродиагностика анализом временных характеристик

При диагностике технических систем анализом временных характеристик можно выделить два направления: оценку энергии колебаний и оценку фазовых характеристик вибросигнала.

3.3.1. Количественные методы оценки временных характеристик

Работа многих машин и механизмов сопровождается вибрацией. В подавляющем большинстве случаев наблюдается взаимосвязь между уровнем вибрации и техническим состоянием объекта. Действительно, по мере

износа механизмов увеличиваются зазоры в сопряженных парах, а следовательно увеличивается кинетическая энергия ударных воздействий. К такому же результату приводят и появление трещин, раковин на поверхностях трения. Нарушение балансировки роторных машин также сказывается на уровне вибрации. В двигателях внутреннего сгорания повышенная вибрация установки может быть вызвана отклонениями в протекании внутрицилиндровых процессов. В этом случае можно говорить о связи вибрации с термодинамическими процессами. При работе лопаточных машин (турбины, компрессоры) оценкой их вибрации можно определить нарушения в газодинамике этих агрегатов, вызванные отрывными течениями газа, например, помпажный режим работы компрессора. Сравнительная простота оборудования и техники измерения вибрации наряду с универсальностью применения делает привлекательными такие методы диагностики. Для количественной оценки интенсивности колебательного процесса (вибрации) применяются следующие характеристики:

– среднее значение процесса

$$m_x = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt ; \quad (3.4)$$

– среднеквадратичное значение амплитуды сигнала (виброскорости, виброускорения и т. д.)

$$\bar{X} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} ; \quad (3.5)$$

– пик-фактор (коэффициент амплитуды), т. е. отношение максимального значения сигнала к его среднеквадратичному значению

$$K_a = \frac{X_{\max}}{\bar{X}} ; \quad (3.6)$$

– коэффициент формы

$$K_a = \frac{\bar{X}}{m_x} . \quad (3.7)$$

С точки зрения теории диагностики каждый из приведенных параметров может выполнять роль критерия диагностики.

В уравнениях (3.4)–(3.7) X – колебательная величина (виброперемещение, виброскорость или виброускорение); T – продолжительность времени (период), в течение которого оценивается вибрация; t – время.

Диагностика строится на сравнении принятого в каждом конкретном случае диагностического параметра с его пороговыми значениями. Это направление отличается простотой измерений и анализа. Но вместе с тем и малой информативностью. Как правило, подобные методы позволяют оценить исправность объекта в целом. Наблюдая за тенденциями изменения энергетических характеристик вибrosигнала можно прогнозировать сроки отказа оборудования. При этом локализовать неисправность можно не всегда.

Наибольшее практическое распространение имеет среднеквадратичное значение виброскорости и виброускорения. Так ГОСТ ИСО 10816-1-97 устанавливает пороговые значения для широкого класса механизмов. Например, для мощных первичных двигателей и других машин с врачающимися массами, жестко установленными на массивном фундаменте, ГОСТ регламентирует уровни виброскорости для 4 категорий (классов) машин (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Категория	Среднеквадратичное значение (СКЗ) виброскорости, мм/с	
	нормируемое	предельное
1	1,8	4,5
2	2,8	7,1
3	4,5	11,2
4	7,1	18,0

3.3.2. Оценка фазовых характеристик и формы сигнала вибрации

Второе направление анализа временной реализации сигнала вибрации – анализ фазовых характеристик вибrosигнала применяется для определения времени возникновения событий, сопровождающихся ударными воздействиями в механизмах. Например, при работе дизеля ударами сопровождается работа клапанов газораспределительного механизма, поршневой группы, форсунки и т. д.

На рис. 3.16 показана временная реализация вибрации, определенная с корпуса форсунки. Продолжительность вибросигнала хорошо согласуется с ходом иглы форсунки, что позволяет определить по параметрам вибрации продолжительность впрыска топлива, а при наличии отметок верхней мертвоточки (ВМТ), и угол, соответствующий началу подачи топлива. Эти характеристики являются ценными диагностическими параметрами топливной аппаратуры дизеля. Величина амплитуды сигнала в зонах 1 и 2 (рис. 3.16), а также форма сигнала содержат диагностическую информацию.

Диагностика технического состояния форсунки по параметрам вибрации может быть выполнена сравнением эталонной вибrogramмы с реальной. В некоторых случаях это сравнение легко выполнить визуально без применения расчетных статистических методов. Так, на рис. 3.17 представлены результаты виброметрии форсунок с заведомо известными дефектами. Видно, что в случае с поломанной пружиной второй импульс вибрации, возникающий в момент посадки иглы, характеризуется увеличенной продолжительностью колебательного процесса с заметно большими, чем у эталонной форсунки амплитудами. Это объясняется многократными ударными движениями иглы, вызванными колебаниями остаточного давления в топливопроводе, собственной инерцией иглы свободно движущейся между «седлом» и обломками пружины. При зависании иглы распылителя практичес-

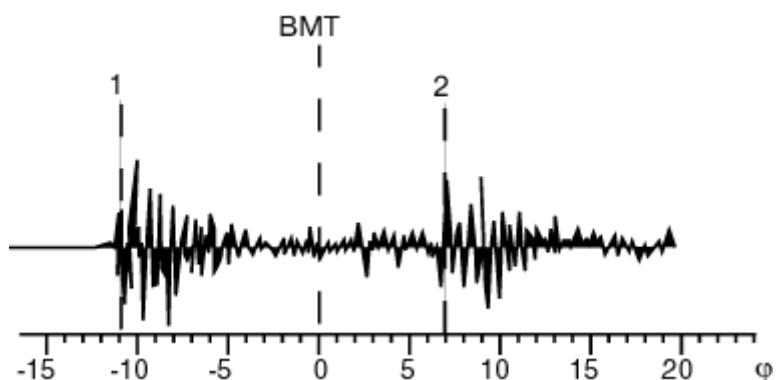


Рис. 3.16. Вибrogramма эталонной форсунки: ϕ – угол поворота коленчатого вала; 1 – начало подачи топлива (удар иглы распылителя об ограничитель); 2 – конец подачи топлива (удар иглы о посадочное место («седло»))

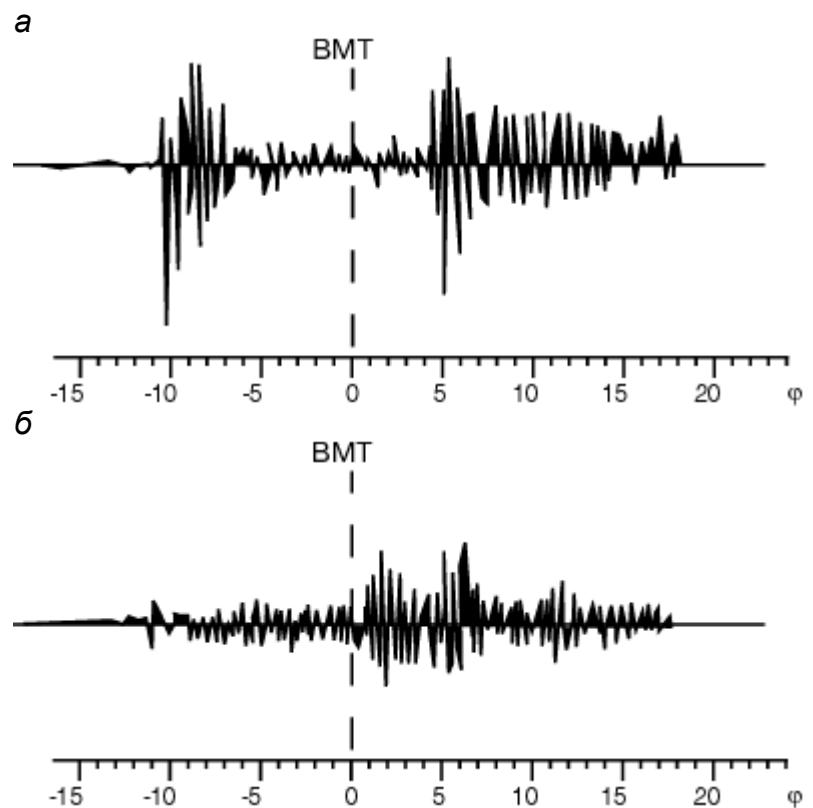
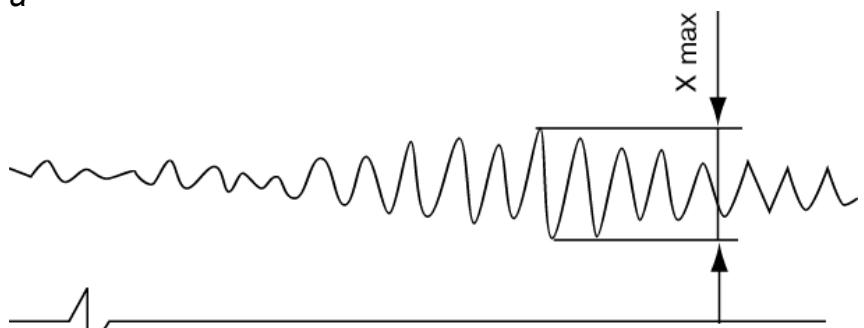


Рис. 3.17. Вибrogramмы дефектных форсунок: а – при поломке форсунки; б – при зависании иглы форсунки

ски отсутствует первый виброимпульс. В этом случае, постоянно открытый распылитель не позволяет получить нужные давления в полостях форсунки, вследствие чего скорость движения иглы, а значит и ее кинетическая энергия, оказываются недостаточными для удара иглы об ограничитель.

Другой пример диагностического анализа вибрации с учетом фазовых характеристик является метод оценки износа поршневой группы двигателя внутреннего сгорания. На рис. 3.18 приведены виброграммы, полученные с датчика, жестко установленного на цилиндровой втулке. Для определения положения ВМТ использовался индуктивный преобразователь. Сравнивались двигатели с новой поршневой группой и с изношенной до предельно допустимого в эксплуатации уровня. Виброграммы определялись на рабочем такте. Наблюдаемые колебания вызваны периодически повторяющимися ударами юбки поршня, качающегося на поршневом пальце, о стенки цилиндра.

а



б

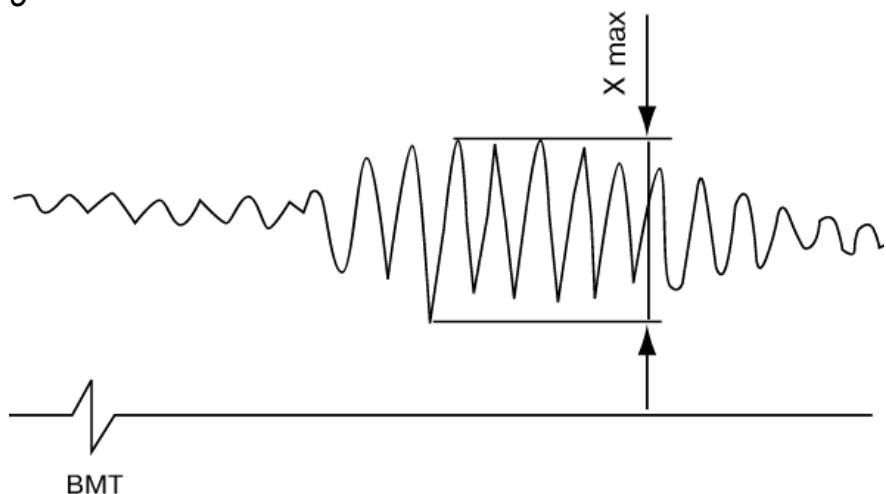


Рис. 3.18. Виброграммы втулки при перекладке поршня на такте рабочего хода: а – новая поршневая группа; б – изношенная поршневая группа

увеличение X_{\max} , может быть вызвано не только износом, но и детонационным сгоранием в цилиндре двигателя, а также другими отклонениями в протекании рабочего процесса двигателя. Это затрудняет применение данного метода в условиях рядовой эксплуатации.

Диагностическим параметром в этом случае может быть максимальная амплитуда вибрации X_{\max} , которая будет тем больше, чем больше зазоры между юбкой поршня и стенкой цилиндра. С этой точки зрения данный метод следовало бы отнести к первой группе – количественному анализу вибрации. Однако следует учитывать, что оценка амплитуды вибрации выполняется не в произвольном месте выборки, а в строго определенной временной (фазовой) зоне – после ВМТ.

Наряду с очевидными достоинствами, рассмотренные методы обладают и недостатками. Так, например, приходится учитывать, что

Дополнительная сложность вносится необходимостью привязки фазы вибрации к некоторому опорному временному событию: в рассмотренных примерах – к ВМТ.

Другим недостатком рассмотренных выше методов диагностики является существенное искажение полезного сигнала вибрации «шумами», сопровождающими работу сложного механизма. Отфильтровать последние зачастую невозможно, так как частоты исследуемых сигналов и «шумов» оказываются близкими. По этой причине рассмотренный выше метод вибродиагностики форсунок дизелей получил ограниченное применение. Наиболее достоверные результаты можно получить в ходе стендовых испытаний топливной аппаратуры, требующих частичной разборки двигателя.

3.4. Методы спектрального анализа в вибродиагностике

Основная идея всех методов диагностики спектральным анализом вибрации заключается в обнаружении периодически повторяющихся, как правило, ударных процессов в работе машины и сопоставлении им возможных дефектов. Очевидно, что последние должны проявляться на тех же частотах.

При наличии дефектов, оказывающих влияние на параметры вибрации, при работе неисправного механизма возникают новые периодические колебания, вызванные чаще всего ударами (микроударами). Причем, в большинстве случаев, анализируя периодичность этих ударов, можно установить и неисправный элемент. Действительно, если в одном подшипнике качения имеет место выбоина на наружном кольце, а в другом на внутреннем, то в обоих случаях анализ вибрации выявит удары тел качения при перекатывании по этим выбоинам. Но, во втором случае при прочих равных условиях, эти удары будут происходить чаще, чем в первом, так как частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу больше чем по наружному.

Техника диагностики во многом напоминает работу химика или металлурга, когда они по результатам спектра излучения материала неизвестного состава подбирают наиболее близкие, из имеющихся в наборе эталонных, спектры излучения известных материалов. В случае с вибродиагностикой также необходимо иметь (знать) набор спектров вибрации, вызванных характерными неисправностями машины или механизма.

Наибольшее распространение методы спектрального анализа получили применительно к роторным машинам. При ближайшем рассмотрении эти методы можно разделить на две группы: анализ прямого спектра и анализ спектра огибающей.

3.4.1. Метод прямого спектра

В случае применения прямого спектра гармоническому анализу подвергают непосредственно полученную в ходе измерения временную зависимость вибрации. До недавнего времени это был единственно применяемый в практике метод, и названия «прямой» не имел. Необходимо отметить, что поскольку периодичность ударных воздействий, вызванных де-

фектами механизма сравнительно велика (частота их мала), то и измерять сигнал следует избирательно: на низких и средних частотах. Высокочастотная вибрация порождена, как правило, силами трения в узлах машины и диагностической ценности не имеет. Отмеченной особенностью обусловлен существенный недостаток метода, заключающийся в невозможности локализовать место возникновения дефекта. Ведь низкочастотные колебания хорошо распространяются как по металлу, так и через воздушные зазоры, а значит, вибрация, измеренная датчиком, могла возникнуть не только вблизи места его установки, но и на значительном удалении от него. Этого недостатка лишен метод спектра огибающей.

3.4.2. Особенности метода «спектр огибающей»

Как известно, высокочастотным колебаниям свойственно быстрое затухание. Это помогает при диагностике локализовать неисправный элемент системы. Удары, в том числе и низкочастотные, возникающие при работе неисправного элемента, сопровождаются появлением и высокочастотных сигналов. Поэтому, если при диагностике некого объекта «прослушивать» высокочастотную вибрацию в разных местах, то можно найти место, в котором уровень этих колебаний особенно высок. Справедливо предположить, что неисправным элементом будет ближайший к месту установки датчика вибрации. Но как при этом идентифицировать неисправность? Спектральный анализ самого высокочастотного сигнала не имеет смысла. Природа этой вибрации объясняется проявлением сил трения при контакте подвижных элементов системы и чаще всего если и содержит периодические составляющие, то во многом случайные, без присущих низкочастотным колебаниям закономерностей.

Революционным в этом направлении было открытие коллектива советских ученых под руководством профессора А.В. Баркова. Оказалось, что если построить огибающую высокочастотного сигнала (рис. 3.19), а затем подвергнуть ее спектральному анализу, то наблюдаются практически те же закономерности, что и при анализе низкочастотных колебаний. Вызвано это тем, что определяемые измерительной системой высокочастотные колебания являются модулированными колебаниями низкой частоты. Иначе говоря, высокочастотные колебания выполняют роль «транспорта», доставляющего до датчика колебания низкой частоты. А так как этот «транспорт» не может «передвигаться» на большие расстояния, то этим методом можно не только идентифицировать дефект, но и локализовать его.

Рассмотрим подробнее реализацию метода на примере диагностики подшипников качения.

3.4.3. Диагностика подшипников качения

3.4.3.1. Диагностическая модель подшипника качения

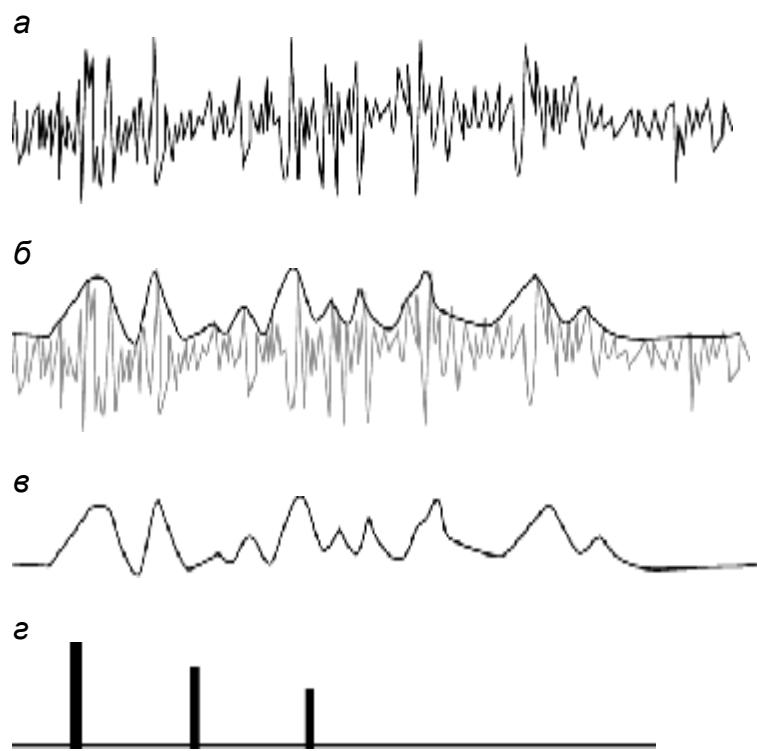


Рис. 3.19. Схема метода: а – измеренный высокочастотный сигнал; б – построение огибающей; в – огибающая сигнала; г – спектр огибающей

Несмотря на многообразие конструктивного исполнения подшипников качения (ПК), при построении его диагностической модели достаточно знать следующие геометрические характеристики ПК (рис. 3.20):

- диаметр наружного кольца d_h ;
- диаметр внутреннего кольца d_e ;
- диаметр тел качения d_{mk} ;
- диаметр сепаратора $d_c = \frac{d_h + d_e}{2}$;

– угол контакта тела качения с поверхностью качения α (рис. 3.21, 3.22).

Эти характеристики должны быть известны к моменту диагностического эксперимента. В большинстве случаев их значения определяют по справочной литературе, не прибегая к натурным измерениям. Угол контакта α для многих типов ПК составляет 0° .

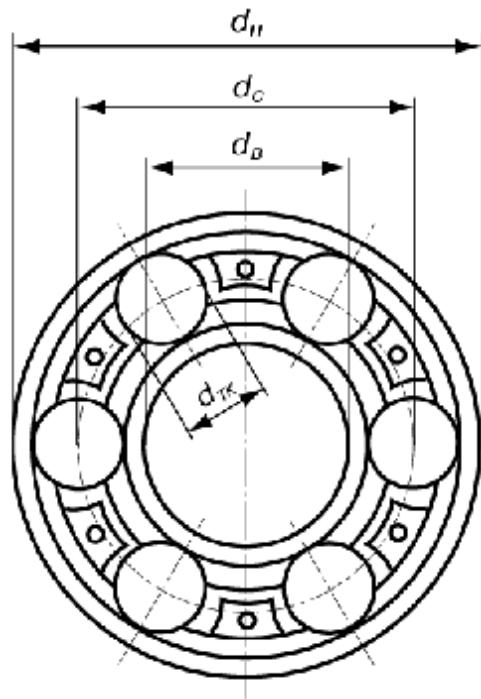


Рис. 3.20. Шарикоподшипник

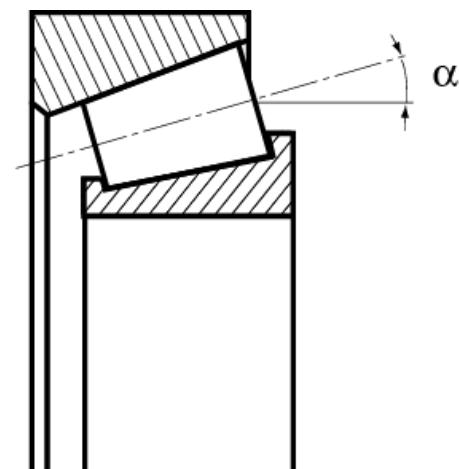


Рис. 3.21. Конический роликоподшипник

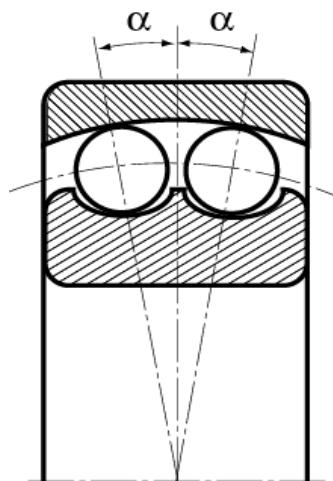


Рис. 3.22. Сферический подшипник

Реальное влияние на параметры вибрации оказывают следующие виды дефектов подшипников качения:

- перекос наружного кольца;
- износ наружного и внутреннего кольца;
- выкрашивание, трещины на поверхностях колец и тел качения;
- износы тел качения и сепаратора.

Отдельно можно выделить нарушения режимов работы, подшипника качения, влияющие на параметры вибрации. К ним относятся:

- обкатывание наружного (неподвижного) кольца;

- неоднородный радиальный натяг;
- сухой контакт поверхностей трения (удары о поверхности трения).

Наконец, на вибрацию подшипника сказываются дефекты других узлов машины. В первую очередь это:

- неуравновешенность ротора;
- дефекты соединительных муфт;
- ослабление креплений подшипниковых узлов к малине или машины к фундаментным конструкциям;
- дефекты соединенных с валом узлов, в том числе шестерен и т. п., создающие ударные нагрузки на подшипник.

Как отмечалось выше, основная идея идентификации неисправностей при спектральных методах вибродиагностики заключается в поиске тех периодических колебаний, которые связаны с возможной неисправностью объекта. Очевидно, что при этом следует знать, на каких частотах будут проявляться те или иные неисправности. В первую очередь, на это влияют конструктивные особенности и режим работы объекта. Для подшипников качения основными диагностическими частотами являются:

- частота вращения $f_{\text{вр}}$;
- частота вращения сепаратора (сепараторная частота) f_c ;
- частота контакта точки тела качения с кольцом подшипника (собственная частота тел качения) f_{mk} ;
- частота перекатывания тел качения по наружному кольцу подшипника f_h ;
- частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу f_e .

Для подшипника с вращающимся внутренним кольцом и неподвижным наружным (наиболее распространенное исполнение) частота вращения $f_{\text{вр}}$ измеряется в процессе эксперимента как частота вращения ротора машины, а остальные диагностические частоты рассчитываются по формулам (3.8)–(3.11):

$$f_c = \frac{1}{2} f_{\text{вр}} \left(1 - \frac{d_{mk}}{d_c} \cdot \cos a \right); \quad (3.8)$$

$$f_{mk} = f_c \left(\frac{d_c}{d_{mk}} + \cos a \right); \quad (3.9)$$

$$f_h = \frac{1}{2} f_{\text{вр}} z \left(1 - \frac{d_{mk}}{d_c} \cdot \cos a \right); \quad (3.10)$$

$$f_e = \frac{1}{2} f_{ep} z \left(1 + \frac{d_{mk}}{d_c} \cdot \cos a \right), \quad (3.11)$$

где z – число тел качения.

3.4.3.2. Примеры определения неисправностей ПК

Значительные различия в особенностях формирования сигнала вибрации позволяют выделить среди перечисленных выше дефектов подшипников, режимов работы, дефектов других узлов 12 групп неисправностей:

- 1) обкатывание наружного (неподвижного) кольца;
- 2) неоднородный радиальный натяг;
- 3) перекос наружного (неподвижного) кольца;
- 4) износ наружного кольца;
- 5) раковины, трещины на наружном кольце;
- 6) износ внутреннего кольца;
- 7) раковины, трещины на внутреннем кольце;
- 8) износ тел качения и сепаратора;
- 9) раковины, сколы на телах качения;
- 10) сложный составной дефект;
- 11) проскальзывание кольца;
- 12) дефект смазки.

Обкатывание наружного кольца (рис. 3.23) является не дефектом подшипника, а отклонениями в режиме его работы, сопровождающимися повышенной нагрузкой на подшипник в радиальном направлении. В машинах с горизонтальным расположением вала это указывает либо на сильную неуравновешенность ротора, либо на бой вала. Признаком этой неисправности является появление в спектре огибающей вибрации небольшого (3-4) числа гармонических составляющих с частотами $k f_{ep}$, где $k = 1, 2, 3\dots$

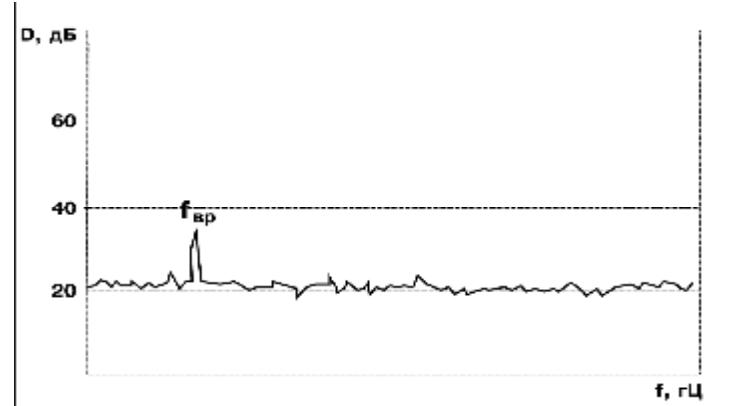


Рис. 3.23. Спектр огибающей при обкатывании наружного кольца ПК

44

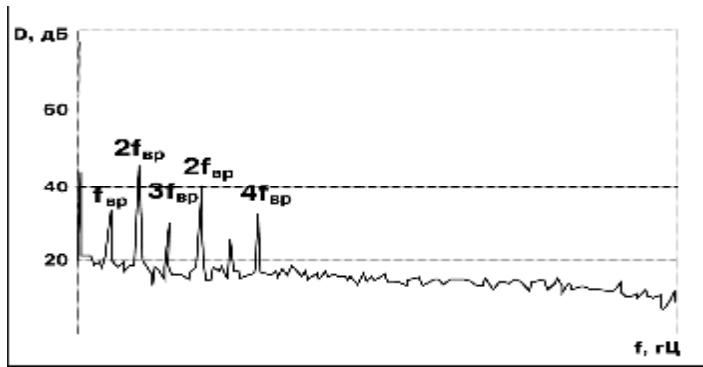


Рис. 3.24. Спектр огибающей при неоднородном радиальном натяге

тоты вращения. Такой же спектр будет получен и при посадке внутреннего кольца подшипника на вал без натяга.

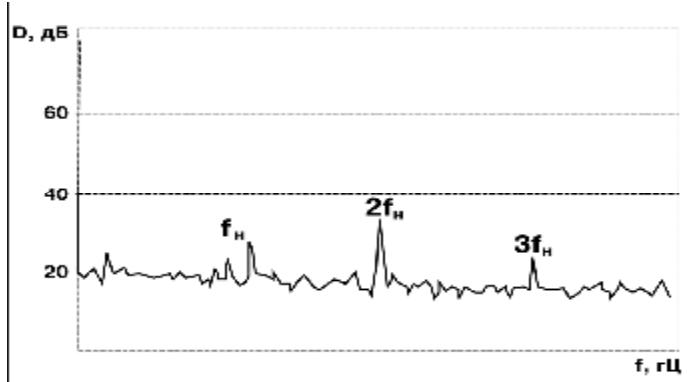


Рис. 3.25. Спектр огибающей при перекосе наружного кольца

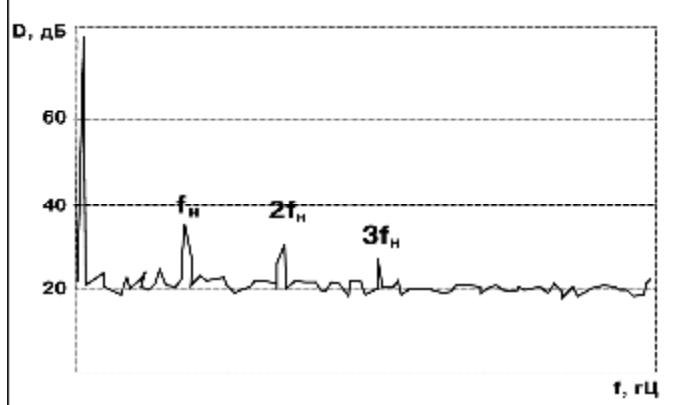


Рис. 3.26. Спектр огибающей при износе наружного кольца
быстро падает.

Неоднородный радиальный натяг подшипника (рис. 3.24) является обычно дефектом его сборки. Наиболее часто встречающейся причиной этого является посадка подшипника на вал, диаметр которого больше допустимого. Признаком этого дефекта является рост гармонических составляющих на четных гармониках (2, 4, 6 ...) частоты вращения.

Перекос наружного кольца (рис. 3.25) возникает обычно при монтаже подшипника из-за дефектов посадочного места. Проявляется на гармониках, кратных частоте перекатывания тел качения по наружному кольцу f_h . Наибольший рост наблюдается на кратных гармониках и особенно на второй.

Износ наружного кольца (рис. 3.26) происходит локально, изменяя коэффициент трения на отдельных участках поверхности наружного кольца. В результате появляется плавная модуляция высокочастотной вибрации на частотах kf_h . Причем наибольший рост происходит на первой гармонике, а амплитуда кратных гармоник

Раковины (трещины) на наружном кольце (рис. 3.27) приводят к появлению коротких ударных импульсов при контакте каждого тела качения с раковиной. В результате появляется ряд гармоник с частотами $k f_h$. Отличительной особенностью спектра от предыдущего является большое число слабозатухающих гармоник.

Раковины (трещины) на внутреннем кольце подшипника (рис. 3.28) приводят к появлению коротких ударных импульсов при контакте каждого тела качения с раковиной. В результате в спектре составляющей появляется ряд гармоник с частотами $k f_e$, причем из-за того, что при слабом радиальном натяге в подшипнике величина удара зависит от нагрузки, т. е. от угла поворота кольца, у ряда гармоник в спектре огибающей появляются боковые составляющие, отличающиеся на $\pm k_1 f_{ep}$.

Износ тел качения и сепаратора (рис. 3.29). По спектру огибающей вибрации, в первую очередь, обнаруживается дефект, представляющий собой выкрашивание поверхности. Это проявляется в спектре составляющей ростом составляющих с частотой f_c (при статических нагрузках) или $f_{ep} - f_c$.

Дополнительным признаком является быстрое уменьшение по амплитуде гармоник, кратных этим частотам.

Раковины, сколы на телах качения сопровождаются появлением ударных импульсов, действующих между телом качения и каждой из поверхностей колец (рис. 3.30). Поэтому основная частота ударов происходит при $2f_{mk}$.

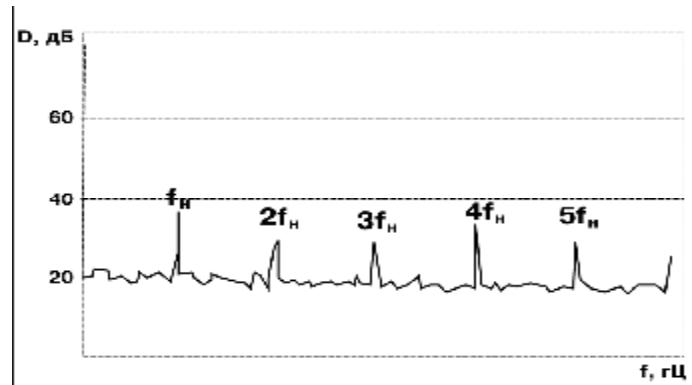


Рис. 3.27. Спектр огибающей при появлении раковин на наружном кольце

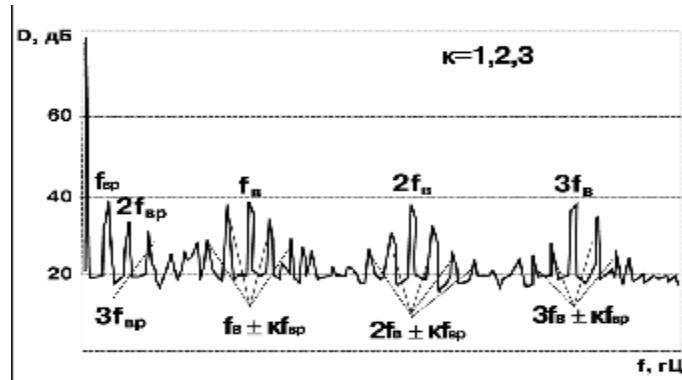


Рис. 3.28. Спектр огибающей при появлении раковин на внутреннем кольце

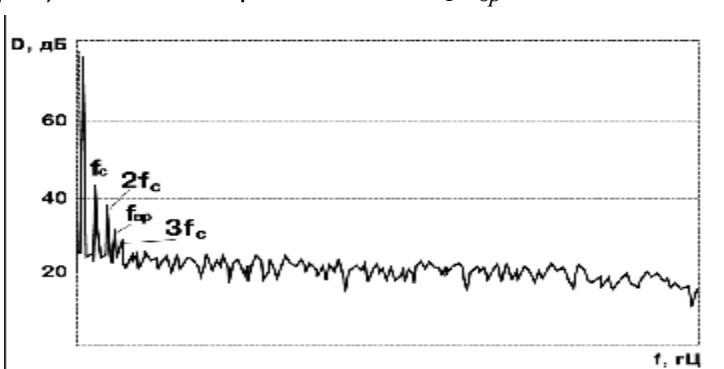


Рис. 3.29. Спектр огибающей при износе тел качения и (или) сепаратора

Но так как амплитуды ударных импульсов, действующих между телом качения и каждой из поверхностей могут отличаться и зависят, кроме того, от угла поворота сепаратора, в спектре огибающей появляются дополнительные составляющие в окрестностях частоты $2f_{mk}$. В случае износа сепаратора эти составляющие могут иметь случайную модуляцию, результатам которой являются спектры, показанные на рис. 3.30.

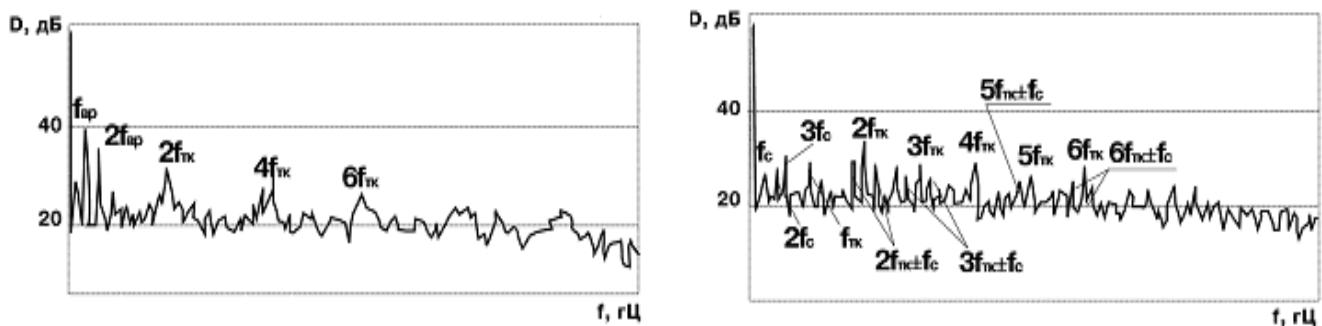


Рис. 3.30. Спектры огибающей при наличии раковин на телах качения

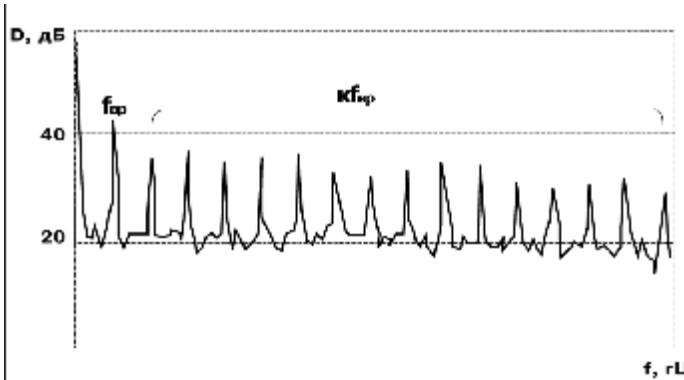


Рис. 3.31. Спектр огибающей при проскальзывании кольца

Проскальзывание кольца в месте посадки (рис. 3.31) является достаточно редким дефектом. Фактически это означает, что обнаруживается случай, когда подшипник заклинило, и сепаратор не вращается относительно колец подшипника. При этом наблюдаются удары с частотами kf_{bp} , а удары на других частотах отсутствуют.

Амплитуда гармоник для всех рассмотренных выше спектров может служить количественной оценкой степени дефекта. Современные системы диагностики, строящиеся на базе компьютеров, используют количественную характеристику вибрации не только для определения степени дефекта, но и для прогнозирования его развития. В этом случае необходимо, как правило, иметь результаты нескольких, выполненных с определенной периодичностью, измерений.

3.4.3.3. Сводные правила идентификации неисправностей ПК

Представленные выше примеры определения вида дефекта ПК по результатам спектрального анализа высокочастотной составляющей вибрации позволяют сформулировать правила, которые для удобства практического использования приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Правила идентификации дефектов ПК

Вид дефекта	Признаки в спектре огибающей	
	основные	дополнительные
1. Бой вала (муфты)	$kf_{\text{вр}}, k < 10$	нет роста ВЧ
2. Неоднородный радиальный натяг	$2f_{\text{вр}}$	$2kf_{\text{вр}}$ нет роста ВЧ
3. Перекос наружного кольца	$2f_{\text{H}}$	$2kf_{\text{H}}$ нет роста ВЧ
4. Износ наружного кольца	f_{H}	$kf_{\text{H}}, k \leq 3$
5. Раковины (трещины) на наружном кольце	$kf_{\text{H}}, k > 3$	рост ВЧ
6. Износ внутреннего кольца	$kf_{\text{вр}}$	kf_{B} , рост ВЧ
7. Раковины (трещины) на внутреннем кольце	$k_1 f_{\text{B}} \pm k_2 f_{\text{вр}}$	$kf_{\text{вр}}$, рост ВЧ
8. Износ тел качения и сепаратора	$f_{\text{C}}, (f_{\text{вр}} - f_{\text{C}})$	$kf_{\text{C}}, k(f_{\text{вр}} - f_{\text{C}})$, рост ВЧ
9. Раковины, сколы на телах качения	$2kf_{\text{TK}}$	$k_1 f_{\text{TK}} \pm k_2 f_{\text{C}}$, рост ВЧ
10. Неуравновешенность ротора	$f_{\text{вр}}$	нет $kf_{\text{вр}}$
11. Дефект смазки	рост ВЧ	нет сильных составляющих
12. Дефект муфты	$kf_{\text{вр}}, k > 7$	нет роста ВЧ
13. Неидентифицированный дефект		рост других гармонических составляющих

Контрольное задание № 3

а) Письменно ответить на вопрос:

Таблица 3.3

№ вопроса	Последняя цифра шифра	Вопрос
1	0–1	Какова практическая цель гармонического анализа?
2	2–3	В чем особенность дискретных методов преобразования Фурье?
3	4–5	Какими характеристиками оценивается энергия вибрации?
4	6–7	Какие методы вибродиагностики вы знаете? В чем их суть?
5	8–9	Дайте сравнительный анализ методов прямого спектра и спектра огибающей.

б) Решить задачу.

Для указанного (табл. 3.4) типоразмера подшипника качения рассчитать основные диагностические частоты и построить ожидаемые спектры огибающей высокочастотного сигнала для заданных неисправностей (при построении графиков ось частот должна быть масштабной).

Таблица 3.4

№ варианта (пред-последняя цифра шифра)	Обозначение подшипника	Частота вращения ротора, 1/мин	Неисправности, для которых следует показать спектры
1	SU208	1200	Проскальзывание наружного кольца, раковина на наружном кольце
2	SU206		Трещина на внутреннем кольце, неоднородный радиальный натяг
3	SU209		Обкатывание наружного кольца, износ сепаратора
4	SU176311	300	Износ тел качения, проскальзывание наружного кольца
5	SU2077140		Сколы на телах качения, перекос наружного кольца
6	SU2119	600	
7	SU27310		
8	SU212	1050	
9	SU27312		
0	SU27315		

Методические указания к решению задачи:

Частота вращения n , 1/мин связана с Гц равенством $f = n / 60$.

Для определения диагностических частот используйте уравнения (3.8)–(3.11). Необходимые для расчета геометрические характеристики можно найти в справочной литературе или в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Геометрические характеристики некоторых подшипников качения

Обозначение	d_b , мм	d_h , мм	d_{mk} , мм	a , град	z
SU208	40	80	12,7	0	9
SU206	30	62	9,53	0	9
SU209	45	85	12,7	0	9
SU2077140	200	310	24,9	14	26
SU176311	55	120	20,64	26	10
SU2119	95	145	12,0	0	22
SU212	60	110	15,88	0	10
SU27310	50	110	13,7	28	14
SU27312	60	130	16	27	16
SU27315	75	160	20,6	29	15

Графики ожидаемых спектров следует строить, используя полученные при расчетах численные значения частот. Первоначально рекомендуется привести графики отдельно для каждой неисправности, а затем совместить их, используя одинаковый масштаб для оси абсцисс (частот).

4. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЕЙ

При разработке диагностических систем дизельных двигателей традиционно основное внимание уделяется работе топливной аппаратуры (ТА). Вызвано это двумя причинами. Во-первых, именно настройкой топливной аппаратуры определяются важнейшие характеристики процесса сгорания – момент воспламенения топлива в цилиндре и качество его последующего сгорания. Во-вторых, как показывают многочисленные исследования, на долю топливной аппаратуры приходится значительное количество отказов в эксплуатации. В зависимости от типа двигателя и его конструкции процент неисправностей, приходящихся на ТА, колеблется в пределах 12–30 %. Следует отметить, что официальные цифры занижены. Вызвано это тем, что не всегда удается в эксплуатации достоверно определить отклонения в работе топливной аппаратуры. Специально проведенные исследования показали, что при обследовании 100 двигателей ЯМЗ238НБ, установленных на тракторах «Кировец» К-700 55 % форсунок имели заниженное и 12 % завышенное давление начала подъема иглы. 60 % двигателей имели отклонения в цикловой подаче (30 % в сторону увеличения и 30 % в сторону уменьшения). 54 % двигателей имели отклонения в момент начала подачи топлива: 30 % до 4° п.к.в. и 24 % до 3° п.к.в.

Современное состояние системы ремонта локомотивов предъявляет свои специфические требования к диагностическим системам. В первую очередь это универсальность диагностического оборудования, применимость его к различным типам двигателей. Во-вторых, это возможность выполнения диагностических работ на частичных режимах работы двигателей или даже на холостом ходу.

При выборе метода диагностики топливной аппаратуры традиционно рассматриваются три метода: вибраакустический, по ходу иглы форсунки и по давлению в топливопроводе высокого давления (ТВД).

4.1. Обзор методов диагностики ТА

4.1.1. Вибраакустический метод диагностики ТА

Основная идея метода базируется на том, что при работе форсунки возникают периодические ударные импульсы, которые могут быть зафиксированы виброизмерительной аппаратурой. С точки зрения проведения диагностического эксперимента метод отличается простотой. Роль первичного преобразователя выполняет, как правило, пьезоэлектрический акселерометр, устанавливаемый с помощью магнита на корпус форсунки или, как это показано на рис. 4.1, с помощью винтовой струбцины на трубку высокого давления. И в том и другом случае причиной измеряемых колебаний являются, преимущественно, ударные явления в форсунке.



Рис. 4.1. Установка виброакселерометра на ТВД

По фазовым характеристикам этих возмущений могут быть определены такие важнейшие показатели работы ТА, как момент начала подачи топлива, момент окончания подачи топлива, а значит, и продолжительность подачи топлива (см. рис. 3.16). По форме и амплитуде вибрации можно определить ряд характерных неисправностей форсунок (см. рис. 3.17). Как показала практика и специально проведенные исследования, достоверное определение характеристик топливоподачи оказывается крайне затруднительным. Сложности возникают, в частности, по причине отсутствия ожидаемых ударных импульсов у форсунок даже с незначительными отклонениями в работе, что приводит к неработоспособности метода в этих случаях. С другой стороны, в связи с тем, что для анализа фазовых характеристик невозможно применить методы спектрального анализа высокочастотной вибрации, рассматриваются «шумы» низкой частоты. Последние, как известно, хорошо распространяются по металлическим деталям дизеля, а значит, наряду с полезным сигналом от элементов форсунки, на вибrogramму будут наложены посторонние «шумы» от перекладки поршня, ударов клапанов и др. Ситуация усугубляется в многоцилиндровых дизелях. По этим причинам, несмотря на заманчивую простоту оборудования и диагностического эксперимента, этот метод в последнее время применяется редко, как правило, на безмоторных стендах.

4.1.2. Диагностика ТА по ходу иглы форсунки



Рис. 4.2. Установка индуктивного датчика на форсунке

Значительно большей достоверностью и диагностической ценностью, по сравнению с сигналом вибрации, обладает диаграмма, полученная с помощью датчика перемещения. Как правило, это индуктивный датчик, установленный на форсунке таким образом, что его приемная часть – подвижный шток, перемещается вместе с иглой форсунки (рис. 4.2). Очевидно, что не всякая конструкция двигателя это позволяет. С точки зрения универсальности этот метод не может быть оценен высоко. Типичная диаграмма хода иглы форсунки приведена на рис. 4.3.

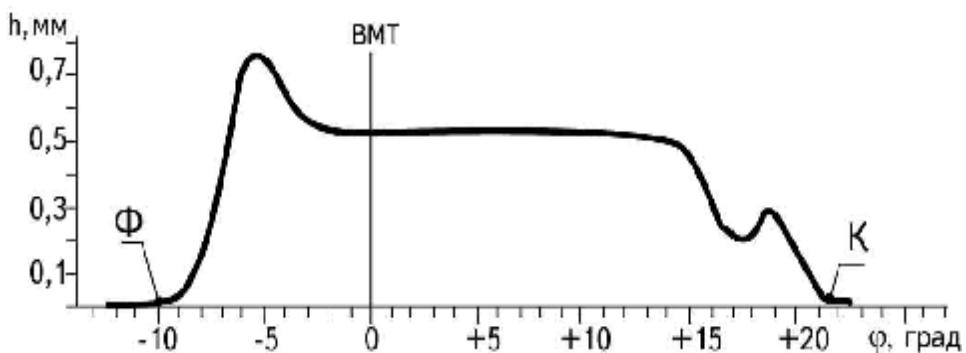


Рис. 4.3. Диаграмма хода иглы форсунки: Φ – начало подачи топлива (начало движения иглы); K – окончание подачи топлива (посадка иглы)

Наряду с фазовыми характеристиками по диаграмме определяется высота подъема иглы, наличие колебаний иглы в процессе топливоподачи, «подвздыски». Рассчитываются темп (скорость) подъема иглы, темп посадки иглы и другие характеристики. В совокупности, все эти параметры позволяют определить многие неисправности форсунки и топливного насоса высокого давления.

Недостатком метода, кроме отмеченной выше малой универсальности, является и низкая надежность индуктивного датчика, имеющего в своей конструкции изнашиваемые подвижные механические элементы. Это сказывается не только на работоспособности оборудования, но и может привести к заметным искажениям действительной картины

4.1.3. Диагностика ТА по диаграмме давления

Диагностический анализ диаграммы давления получает в последнее время все большее распространение, в первую очередь, благодаря появлению легко устанавливаемых на топливопровод высокого давления датчиков накладного типа (рис. 4.4). Чувствительным элементом такого преобразователя является пленка 8, обладающая пьезоэлектрическим эффектом, благодаря которому незначительные деформации стальной трубы, вызванные в свою очередь изменяющимся давлением топлива, преобразуются в электрический сигнал. Разность потенциалов на выводах датчика прямо пропорциональна усилию, воспринимаемому пьезоэлементом, а, следовательно, и давлению. Необходимо отметить, что наряду с очевидными для условий рядовой эксплуатации достоинствами такой способ измерения давления вносит и некоторое ограничение, заключающееся в сложности точного определения величины давления. Вызвано это тем, что усилие, создаваемое деформирующейся трубкой на чувствительную часть датчика зависит не только от давления, но и от жесткости стенок трубопровода, их толщины, качества поверхности трубопровода и от расположения в пространстве датчика при установке его на трубке. Учесть все эти

факторы и оттариовать показания датчика возможно лишь в лабораторных условиях. В эксплуатации ограничиваются качественной характеристикой изменения давления от угла поворота коленчатого вала, без его количественной оценки.

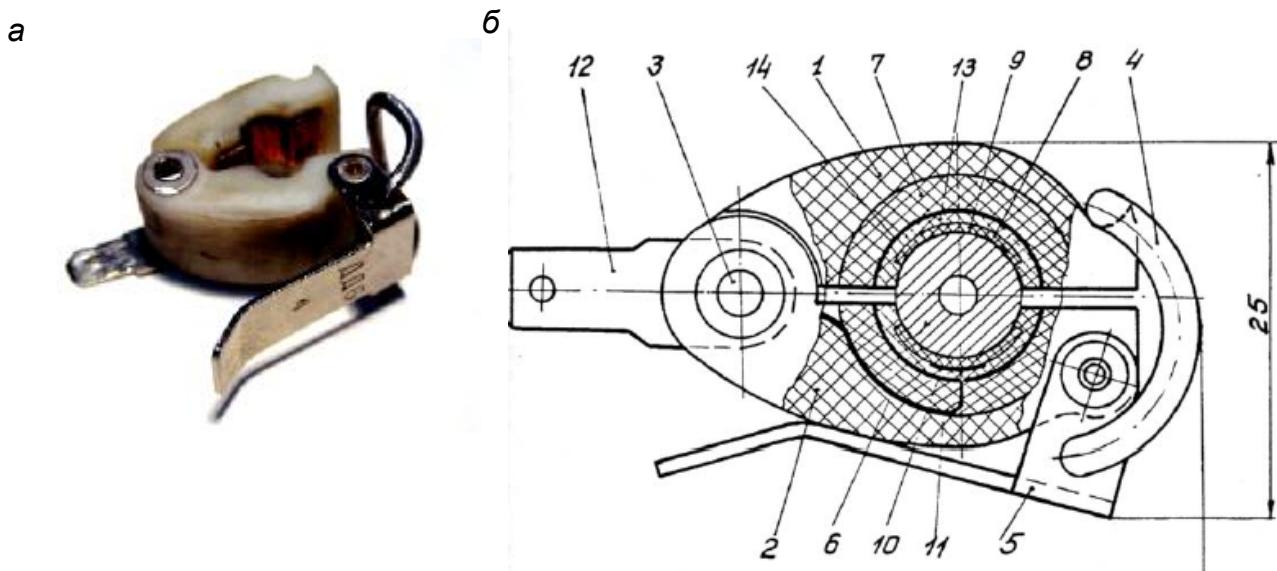


Рис. 4.4. Накладной датчик давления: а – фотография; б – конструкция; 7 – упругий элемент; 8 – чувствительный элемент; 9 – защитный элемент

На рис. 4.5 приведена типичная для двигателя 10Д100 диаграмма давления в ТВД.

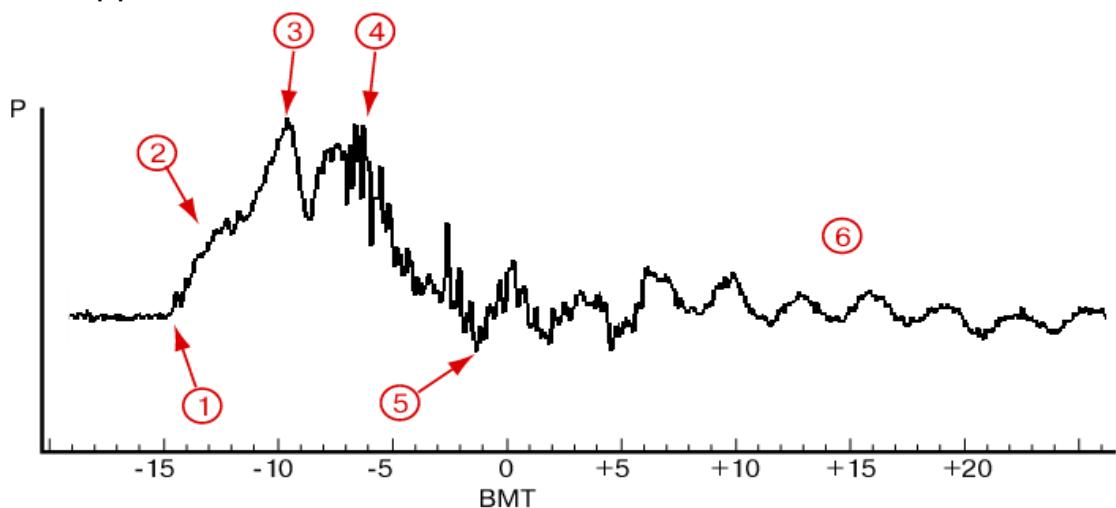


Рис. 4.5. Диаграмма давления топлива в ТВД дизеля типа 10Д100 (участок впрыска)

Рассмотрим связь между работой топливной аппаратуры дизеля и характером изменения давления в топливопроводе. На протяжении большей части цикла дизеля давление в ТВД остается постоянным и равным величине остаточного давления. В точке 1 (рис. 4.5) начинается рост давления,

вызванный нагнетательным ходом плунжера насоса и открытием нагнетательного клапана насоса, вследствие чего надплунжерная полость насоса и ТВД сообщаются друг с другом. Открытие нагнетательного клапана вызывает волну давления, наблюданную на фоне продолжающегося роста давления (зона 2 диаграммы). Игла форсунки остается неподвижной до тех пор, пока давление в ТВД не превысит усилие затяжки пружины форсунки. Начавшийся в точке 3 впрыск топлива форсункой приводит к снижению давления в трубопроводе, но продолжающийся в это время нагнетательный ход плунжера может вызвать новое повышение давления, на которое накладываются прямые и отраженные волны давления топлива в трубе. В зависимости от цикловой подачи и расходного коэффициента форсунки количество и амплитуда колебаний давления после точки 3 может отличаться от приведенных на рисунке. Окончание нагнетательного хода плунжера сопровождается падением давления (точка 4). Момент закрытия (окончание посадки) иглы форсунки обычно связывают с точкой 5 диаграммы, когда давление достигает своего минимума. После этого топливопровод оказывается вновь закрытым как со стороны насоса, так и со стороны форсунки, что способствует лучшему отражению волны на границах трубы, и как следствие этого появлению на диаграмме слабозатухающих колебаний остаточного давления (зона 6).

Таким образом, к диагностическим признакам диаграммы давления в общем случае можно отнести следующие параметры:

– величины давлений в момент начала подачи топлива (точка 3) и в других характерных точках диаграммы;

– фазовые характеристики топливоподачи:

- а) начало подачи топлива насосом;
 - б) начало впрыска топлива форсункой;
 - в) окончание подачи топлива насосом;
 - г) окончание подачи топлива форсункой;
 - д) продолжительность перечисленных участков;
- амплитуда колебаний давления на участке «сжатия» топлива;
- амплитуда колебаний остаточного давления.

4.2. Примеры выявления неисправностей ТА по диаграмме давления в ТВД

4.2.1. Влияние цикловой подачи топлива

На рис. 4.6 приведены диаграммы, полученные экспериментально на одном комплекте ТА с различными цикловыми подачами. Видно, что увеличение количества впрыскиваемого топлива можно обнаружить не только по увеличению продолжительности впрыска $\Delta t_{впр}$, но и по увеличению площади диаграммы на участке впрыска (показано штриховкой).

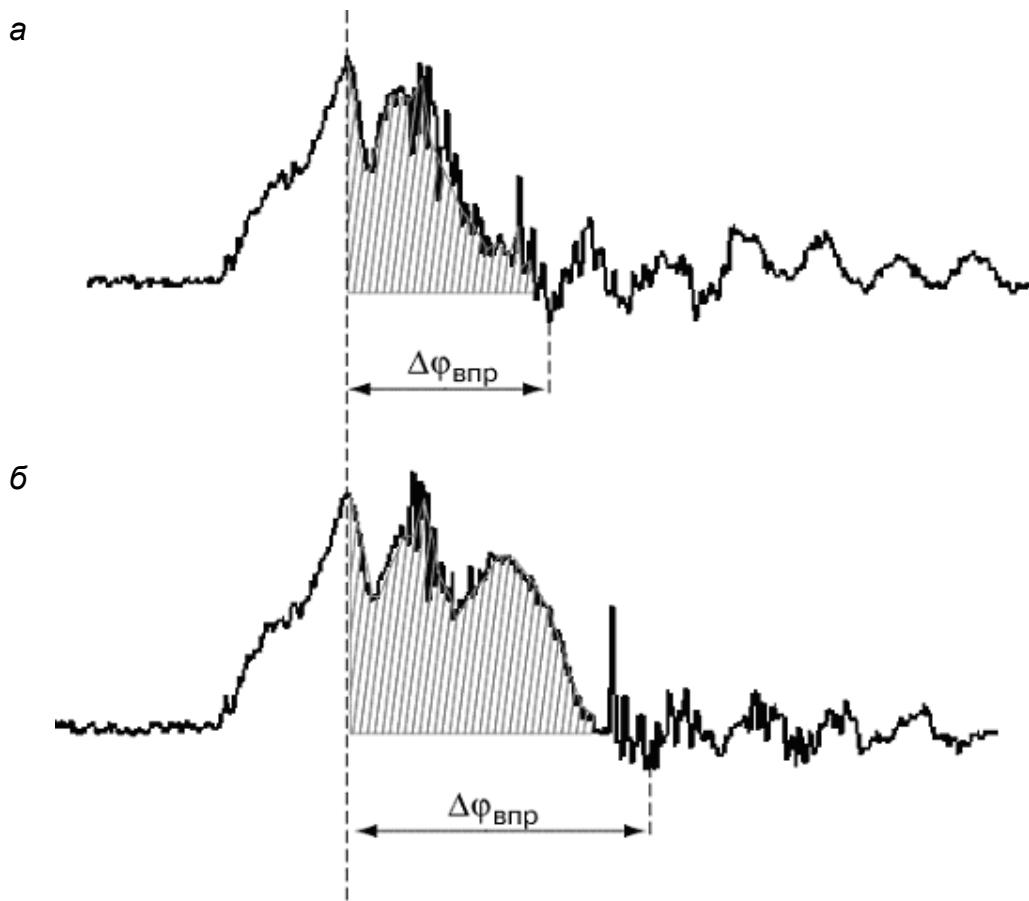


Рис. 4.6. Диаграммы давления в ТВД при различных цикловых подачах топлива: а – $B_{\text{Ц}} = 0,19 \text{ г/цикл}$; б – $B_{\text{Ц}} = 0,37 \text{ г/цикл}$

Действительно, цикловая подача топлива может быть определена с помощью известного из курса гидравлики уравнения

$$B_{\text{Ц}} = \int_{j_1}^{j_2} \frac{r_m \cdot m \cdot f_c}{6n} \sqrt{2 \frac{p_\phi - p_u}{r_m}} \cdot dj , \quad (4.1)$$

где m – коэффициент расхода сопел (определяется формой и размерами сопел); f_c – суммарная площадь сопловых отверстий форсунки; p_ϕ, p_u – соответственно давление перед соплами форсунки (давление топлива в ТВД) и давление после сопел (давление в цилиндре); r_m – плотность топлива; n – число оборотов вала.

Упрощенно полагая, что все входящие в уравнение параметры, за исключением p_ϕ , величины постоянные, уравнение (4.1) можно привести к

виду $B_{\text{Ц}} \approx \int_{j^1}^{j^2} k \cdot p_{\phi}^{0,5} \cdot dj$, показывающему, что площадь диаграммы на

участке впрыска пропорциональна квадрату цикловой подачи. При проведении диагностических работ следует учитывать, что суммарная площадь сопловых отверстий форсунки изменяется в процессе эксплуатации как в сторону увеличения – при износе сопел, так и в сторону уменьшения – при коксовании.

4.2.2. Влияние усилия затяжки пружины форсунки

Наиболее типичным отклонением в работе форсунок является ослабление затяжки пружины, приводящее к соответствующему снижению давления начала впрыска. Наиболее просто эта неисправность могла бы быть обнаружена при количественном анализе диаграммы по ординате точки, соответствующей началу впрыска. Однако в силу указанных выше причин такой анализ при применении датчиков деформации ТВД ограничен. В случаях, когда другие дефекты в форсунке отсутствуют, неисправность можно локализовать по перепаду давлений на участке «начало подачи форсункой – отсечка топлива плунжером» (рис. 4.7).

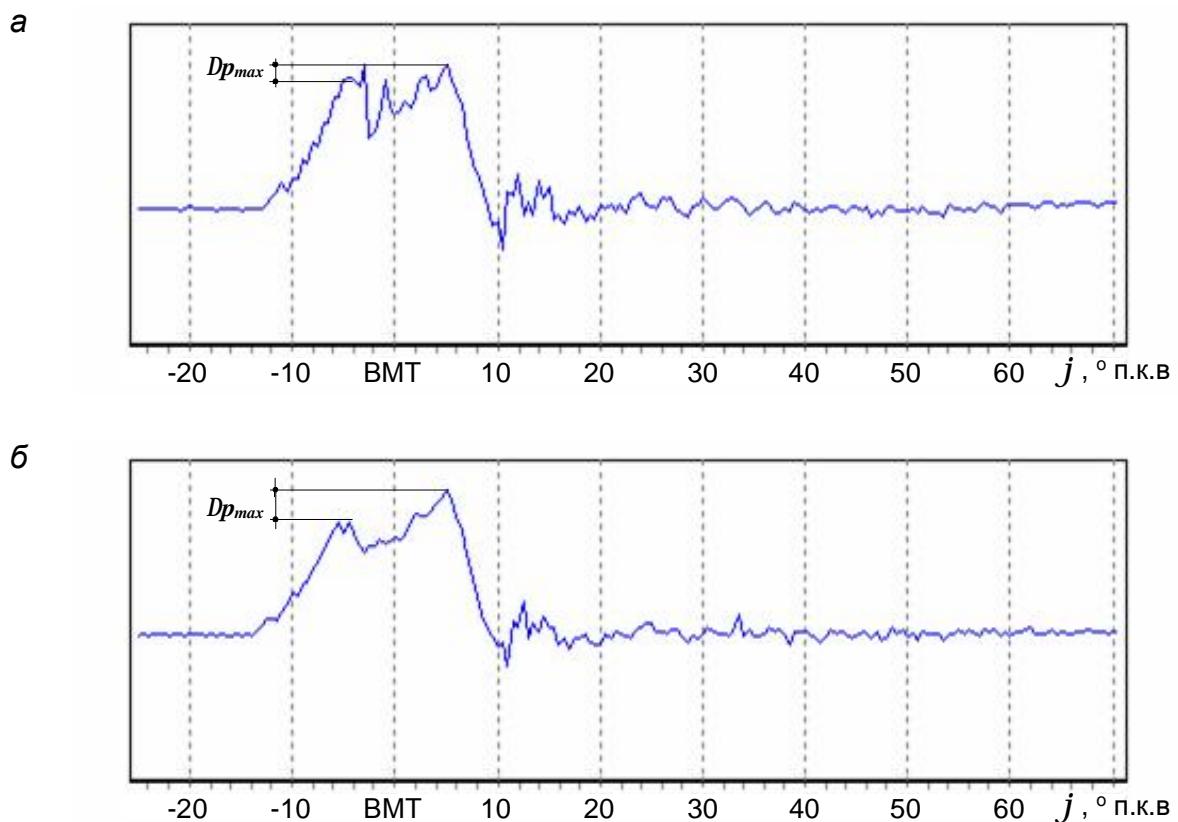


Рис. 4.7. Диаграммы давления при различном давлении начала впрыска:
а – 21,5 МПа; б – 17,5 МПа

Для режима максимальной подачи топлива и близких к нему координат этих точек на диаграммах, полученных вблизи штуцера насоса определяются достаточно просто, как два локальных максимума. Так как величина максимального давления в процессе впрыска определяется преимущественно скоростью движения плунжера и расходной характеристикой форсунки, значение этого максимума существенно не изменится при изменении давления начала подачи топлива.

При анализе диаграмм обнаруживается также и изменение темпа и величины снижения давления после открытия форсунки по мере уменьшения усилия предварительной затяжки пружины форсунки, что объясняется снижением расхода топлива через форсунку при меньшем перепаде давлений в полостях до и после сопел распылителя. В совокупности отмеченные признаки позволяют идентифицировать данную неисправность по результатам только качественного анализа диаграммы впрыска.

Следует отметить, что выявленные признаки обнаруживаются и на диаграммах, полученных вблизи форсунки, однако их анализ затруднен из-за более развитых в этом сечении колебательных процессов.

4.2.3. Снижение плотности распылителя форсунки

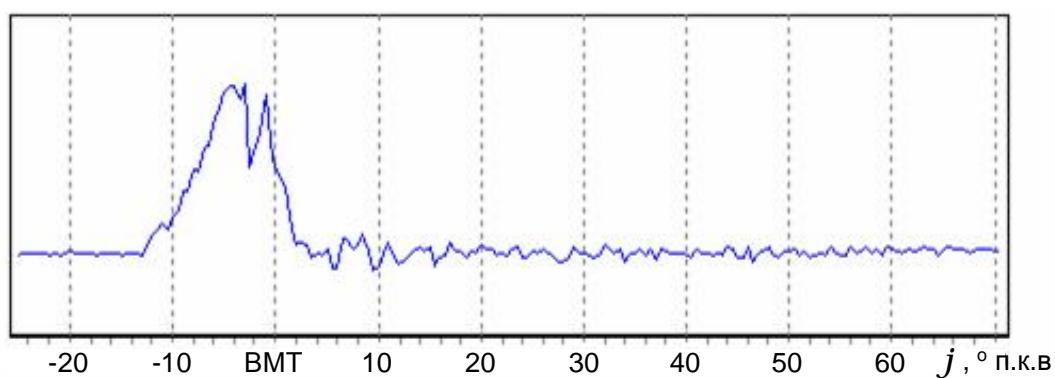
Появление неплотностей в распылителе форсунки может произойти в результате использования низкокачественного топлива, дефектов изготовления или сборки форсунки. Наличие неплотностей приводит к «подтеканию» форсунки, что в условиях высоких температур способствует повышенному коксообразованию.

При стендовых исследованиях на различных нагрузочных и температурных режимах работы наиболее повторяемым признаком оказалась частота колебаний остаточного давления. Для форсунок с пониженной герметичностью запорного конуса и малых нагрузочных режимах наблюдался заметный рост высокочастотной составляющей этих колебаний (рис. 4.8). Возможным объяснением этого является следующее. При малых цикловых подачах топлива импульс давления, порождающий колебания топлива вблизи насоса имеет трапециoidalную форму. Этим колебаниям остаточного давления характерен сравнительно большой период и своей формой они напоминают основной участок диаграммы (рис. 4.8, а). При неплотном запорном конусе распылителя появляется дополнительный возбудитель – просачивание топлива в цилиндр, что, вероятно, и приводит к резкому снижению давления топлива уже после посадки иглы. Последнее явление может служить причиной возникновения высокочастотных колебаний, наблюдавшихся не только вблизи форсунки, но и вблизи насоса (рис. 4.8, б).

При больших нагрузках насоса отмеченные закономерности сохраняются вплоть до режима максимальной подачи топлива. Однако из-за роста энергии основных возмущений картина может становиться менее отчетли-

вой. Другим фактором, влияющим на интенсивность этого процесса является температура топлива. При снижении температуры до 30 °С высокочастотные колебание были менее выраженные, что можно рассматривать косвенным подтверждением наблюдаемого явления. Действительно, рост температуры снижает вязкость топлива, и, следовательно, приводит к большему расходу топлива через неплотность запорного конуса форсунки.

а



б

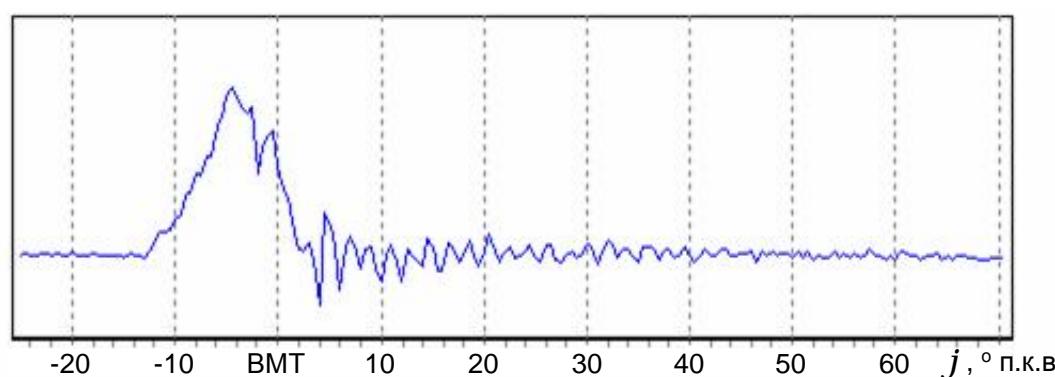


Рис. 4.8. Диаграммы давления: *а* – эталонная; *б* – при сниженной герметичности запорного конуса распылителя

4.2.4. Влияние неплотности плунжерной пары

Развитие данного дефекта в эксплуатации связано с износом трущихся поверхностей плунжерной пары, который протекает особенно интенсивно при работе на низкокачественном топливе. Увеличение радиального зазора между плунжером и гильзой приводит к повышению доли топлива, перетекающего через зазор в полости с низким давлением, что вызывает рост расхода топлива в дренажной магистрали насоса. При равных значениях скорости плунжера повышенные перетекания топлива приводят к «затягиванию» участка сжатия топлива и к уменьшению угла опережения подачи топлива форсункой (рис. 4.9). Наиболее четко границы этого участка видны при измерении диаграмм вблизи форсунки.

При частоте вращения 400 об/мин продолжительность этого участка для топливной аппаратуры дизеля 10Д100 увеличивается примерно на 2,5°. Из-за соответствующего сокращения расходного хода плунжера (при откры-

той форсунке) снижается продолжительность подачи топлива и цикловая подача, что также хорошо видно на диаграммах. Необходимо отметить, что из-за одинаковой природы возникновения к аналогичным изменениям диаграммы приводит и уменьшение вязкости топлива, например с ростом температуры. Для эталонного комплекта ТА с плотностью плунжерной пары более 25 с изменение температуры от 30 до 70 °С увеличило протяженность этого участка при прочих равных условиях примерно на 2° п.к.в. Еще большее влияние на протяженность участка сжатия топлива оказывает уменьшение числа прокладок ТНВД, приводящее к снижению скорости движения плунжера из-за работы на «наполнительном» участке профиля кулачка. В этом случае увеличение продолжительности сжатия может составлять 100 % и более.

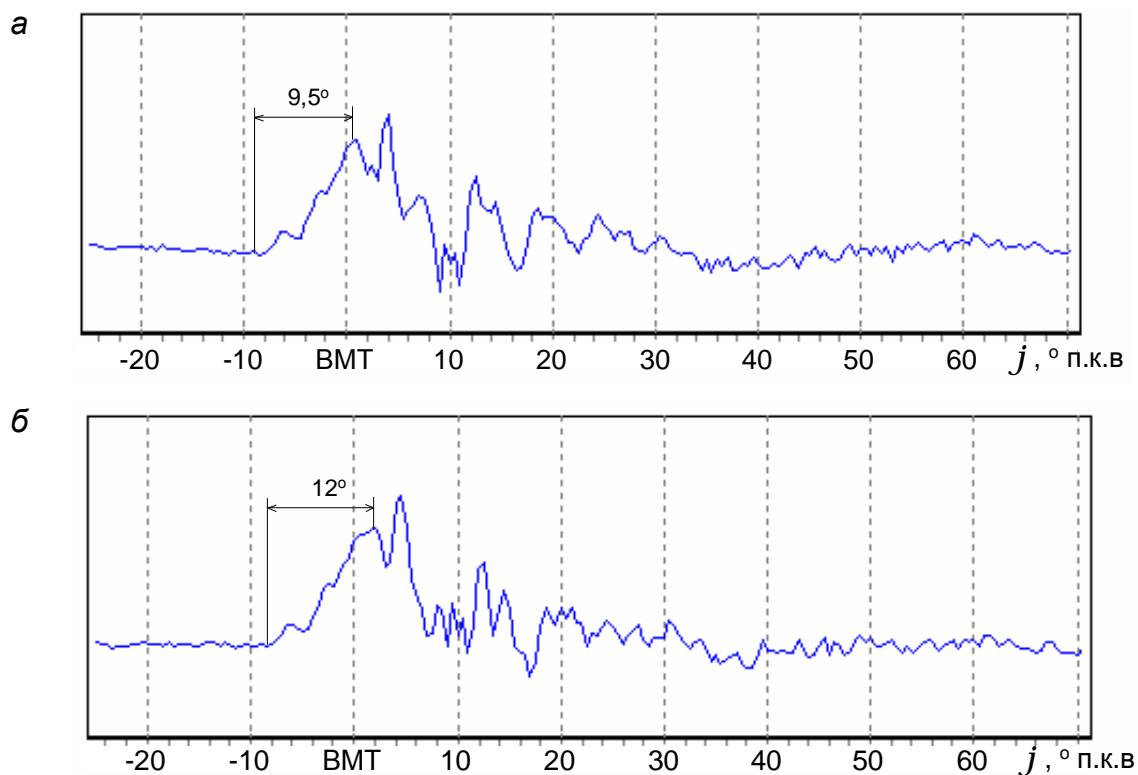


Рис. 4.9. Диаграммы давления при нормальной (а) и браковочной (б) плотности плунжерных пар

4.2.5. Влияние герметичности нагнетательного клапана насоса

Причиной неплотности нагнетательного клапана является чаще всего его износ. Как и в случае неплотности распылителя форсунки нарушается герметичность ТВД после впрыска топлива, что приводит к отмеченным выше особенностям – снижению амплитуды колебаний остаточного давления.

Отличительной особенностью диаграммы с неплотным нагнетательным клапаном является отсутствие колебаний давления на участке сжатия, равно как и плавное нарастание давления в начале этого участка (рис. 4.10).

Вызвано это тем, что из-за имеющих место неплотностей, давление перед самим нагнетательным клапаном нарастает плавно, в результате чего и открытие клапана происходит с меньшей начальной скоростью. Поэтому энергии движения клапана оказывается недостаточно для формирования наблюдаемой выше волны давления.

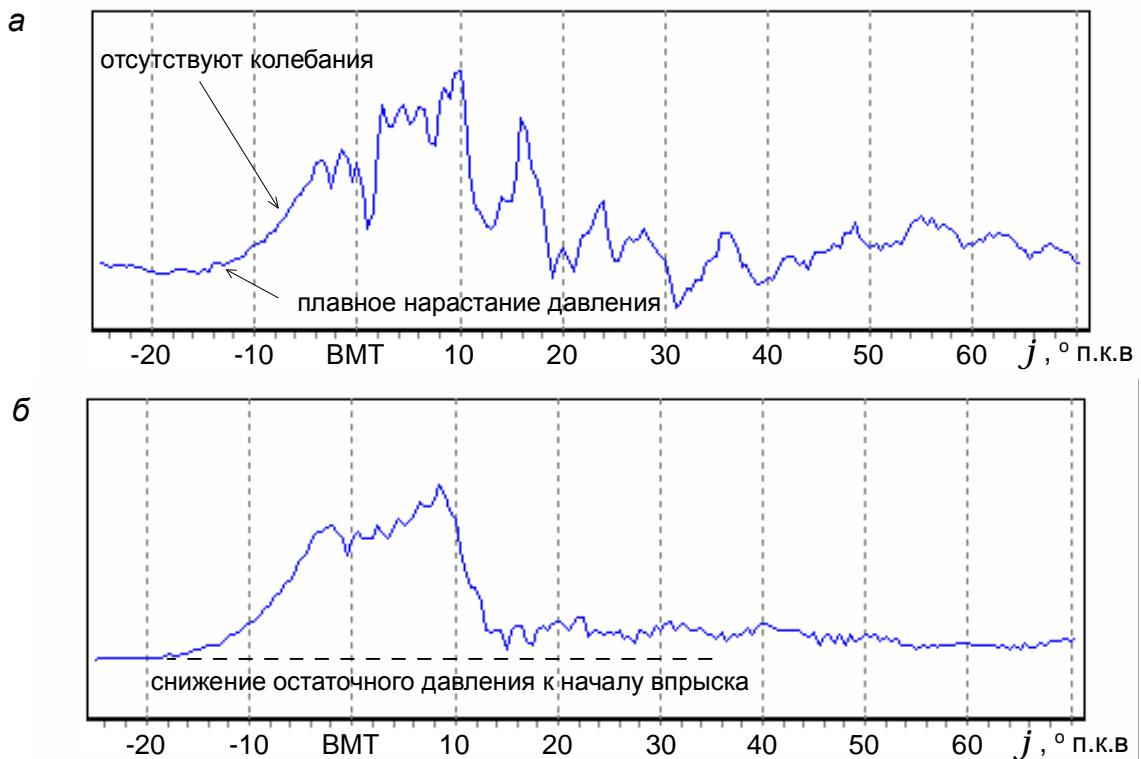


Рис. 4.10. Диаграммы давления в ТВД при потере герметичности нагнетательного клапана измеренные: а – вблизи форсунки; б – вблизи насоса

Повышение давления в ТВД наступает раньше, так как топливо начинает перетекать из надплунжерного пространства в ТВД еще до того, как перекроется наполнительное отверстие. Этому способствует снижение остаточного давления из-за перетеканий топлива из ТВД в наполнительную магистраль. Этот признак является третьим характерным признаком, который наиболее заметен на диаграммах, полученных вблизи насоса (рис. 4.10).

4.2.6. Влияние серьезных повреждений форсунки

Рассмотренные выше неисправности форсунки хотя и ухудшают рабочий процесс дизеля, но в целом остаются работоспособными. По диаграмме давления топлива легко определяются неисправности другой группы, приводящие к отказам в работе форсунки и цилиндра дизеля. Для эксплуатации дизеля 10Д100 типичными для этой группы дефектами являются заедание иглы форсунки (в открытом или закрытом состояниях) и поломка пружины форсунки.

В случае с поломанной пружиной, как и при зависании иглы в открытом состоянии, впрыск осуществляется, по сути, через форсунку открытого типа. На диаграммах давления во всех сечениях отсутствуют заметные колебания вплоть до окончания нагнетательного хода плунжера при любых нагрузочных режимах, в том числе и при максимальной подаче топлива (рис. 4.11). Наиболее удобными, и в этом случае, являются диаграммы, полученные вблизи насоса по причине отсутствия колебаний и на участке остаточного давления. Диаграммы этого сечения имеют форму неравнобокого треугольника, высота которого определяется продолжительностью нагнетательного хода плунжера. Волна давления, вызванная подъемом нагнетательного клапана, выражена слабо, что объясняется начавшимся к этому времени расходом топлива через распылитель форсунки. Снижение скорости нарастания давления, наблюдаемое на диаграмме, объясняется малой величиной остаточного давления в ТВД из-за того, что трубка оказывается практически всегда открытой со стороны форсунки.

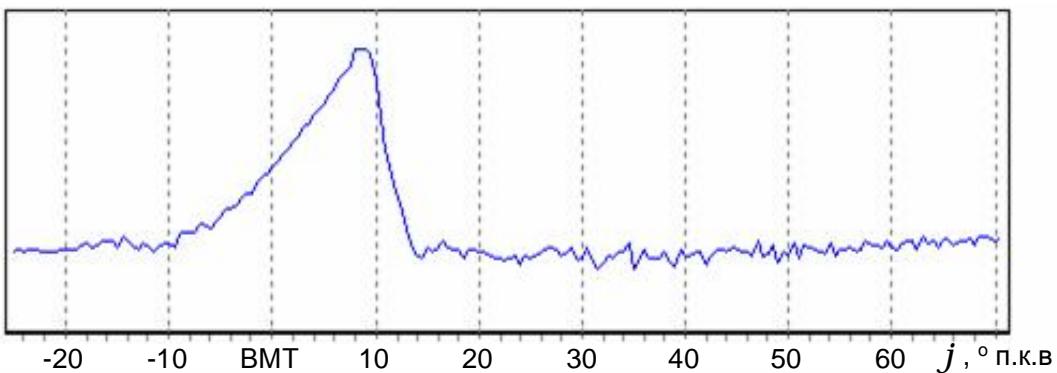


Рис. 4.11. Диаграмма при поломке пружины форсунки и максимальной подаче топлива

В случае, когда игла потеряла подвижность, находясь в закрытом состоянии, диаграмма давления при положении рейки «на упоре» выглядит так, как показано на рис. 4.12.

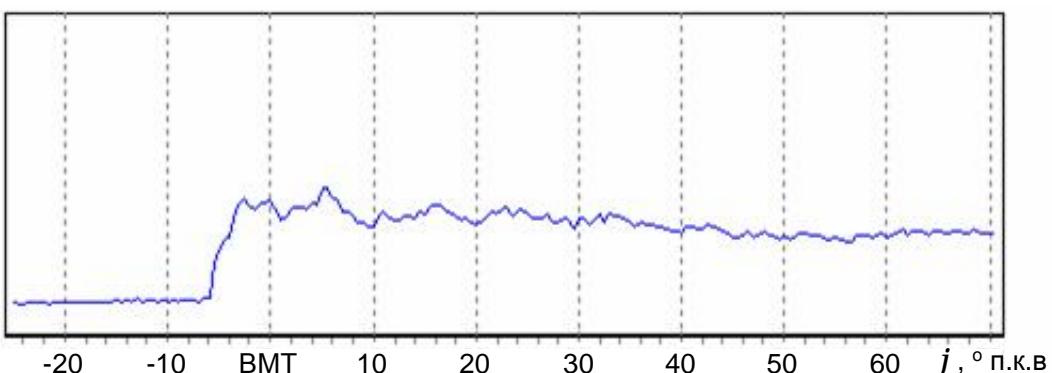


Рис. 4.12. Диаграмма при заклинивании иглы форсунки в закрытом состоянии

При таком дефекте значение остаточного давления достигает чрезмерно больших значений, так как на протяжении всего нагнетательного хода плунжера трубопровод остается закрытым. Высокое остаточное давление приводит к резкому нарастанию давления на переднем фронте импульса, после которого линия на диаграмме, полученной возле штуцера насоса, принимает форму горизонтальной прямой, с маловыраженными колебаниями давления. На диаграмме давления, полученной вблизи форсунки, эти колебания более заметны, в остальном закономерности повторяются. Субъективно работа ТА воспринимается как жесткая, с заметным увеличением расхода топлива в дренажной магистрали. Продолжительная работа двигателя с такой неисправностью влечет за собой выход из строя насоса.

4.2.7. Определение угла опережения подачи топлива

Как следует из вышесказанного, из всех рассмотренных методов только настоящий метод диагностики ТА позволяет определить как момент начала подачи топлива насосом (начало рабочего хода плунжера), так и момент начала подачи топлива форсункой (действительной подачи топлива в цилиндр). Это значительно повышает эффективность метода применительно к регулировке угла опережения подачи топлива.

Контрольное задание № 4

а) Письменно ответить на вопрос:

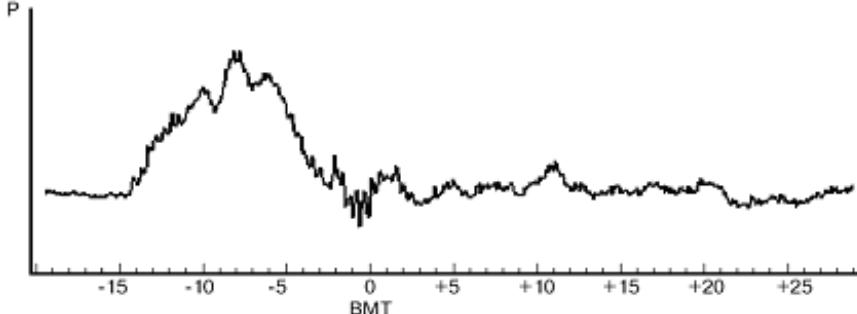
Таблица 4.1

№ вопроса	Последняя цифра шифра	Вопрос
1	2, 8	Укажите достоинства и недостатки методов вибродиагностики топливной аппаратуры.
2	1, 9	Укажите достоинства и недостатки метода диагностики топливной аппаратуры по ходу игры форсунки
3	0, 7	Укажите достоинства и недостатки метода диагностики топливной аппаратуры по диаграмме давления в ТВД.
4	3, 5	Какие методы диагностики ТА вы знаете? В чем их суть?
5	4, 6	Какой из методов диагностики ТА позволяет наиболее достоверно определить угол опережения подачи топлива и почему?

б) По заданной диаграмме определить действительный угол опережения подачи топлива и продолжительность подачи топлива в цилиндр двигателя.

Таблица 4.2

№ диаграммы	Пред- следняя цифра шифра	Диаграмма
1	0, 3	
2	1, 4	
3	2, 5	
4	6, 8	

№ диаграммы	Предпо- следняя цифра шифра	Диаграмма
5	7, 9	 <p>The diagram shows a pressure-time curve (P-V diagram) for a diesel engine cycle. The vertical axis is labeled 'P' (pressure) and the horizontal axis is labeled 'BMT' (crankshaft angle). The curve starts at a low pressure level, rises to a sharp peak around -5 degrees BMT, and then falls sharply before settling into a noisy baseline. The x-axis has major tick marks at -15, -10, -5, 0, +5, +10, +15, +20, and +25 degrees BMT.</p>

При оформлении задачи перерисуйте диаграмму, соблюдая масштаб по оси абсцисс, укажите тип заданной диаграммы (вибrogramма, диаграмма хода иглы форсунки или диаграмма давления в ТВД). Проставьте на диаграмме точки, соответствующие началу подачи топлива форсункой и окончание подачи топлива. Приведите комментарии, поясняющие ваши действия.

5. ДИАГНОСТИКА ДИЗЕЛЯ АНАЛИЗОМ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

5.1. Параметры, характеризующие рабочий процесс, и оборудование для их измерения

При работе дизеля параметры термодинамических процессов, протекающих в его цилиндрах, могут быть измерены с помощью специального оборудования. К таким параметрам, в первую очередь, относят давление и температуру рабочего тела (газа). Отметим, что в зависимости от применяемого оборудования, могут быть измерены мгновенные значения этих величин в любой точке цикла, а также средние или максимальные значения за цикл.

Наиболее доступными и распространенными в условиях рядовой эксплуатации являются следующие приборы:

- 1) максиметр – прибор для измерения максимального за цикл давления в цилиндре;
- 2) пимметр – прибор для измерения среднего давления цикла;
- 3) термоэлектрический термометр – для измерения температуры газов в проточной части двигателя, например, на выходе из цилиндра.

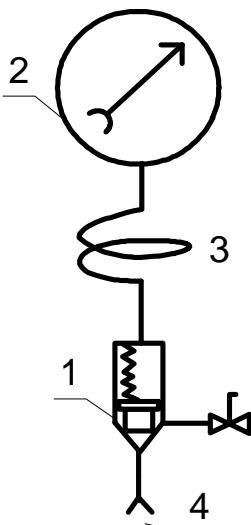


Рис. 5.1. Схема максиметра: 1 – обратный клапан; 2 – трубчато-пружинный манометр; 3 – аккумулятор; 4 – приемник давления

Основными элементами максиметра (рис. 5.1) являются трубчато-пружинный манометр 2, рассчитанный на измерение больших давлений (до 16 МПа и выше), обратный клапан 1, аккумулятор 3 и приемник давления 4.

При установке максиметра на индикаторный кран цилиндра газы откроют клапан 1 только в том случае, если давление в аккумуляторе 3 будет меньше, чем в цилиндре. Аккумулятор изготавливают в виде витой трубы с 2 ... 3 витками с тем, чтобы обеспечить теплоотвод в окружающую среду и защитить манометр от термического повреждения.

С помощью максиметра измеряют максимальное давление сгорания p_z , МПа и давление в конце процесса сжатия p_c , МПа (компрессию). В последнем случае на время измерения отключают подачу топлива в цилиндр. На рис. 5.2 эти параметры показаны на индикаторных диаграммах.

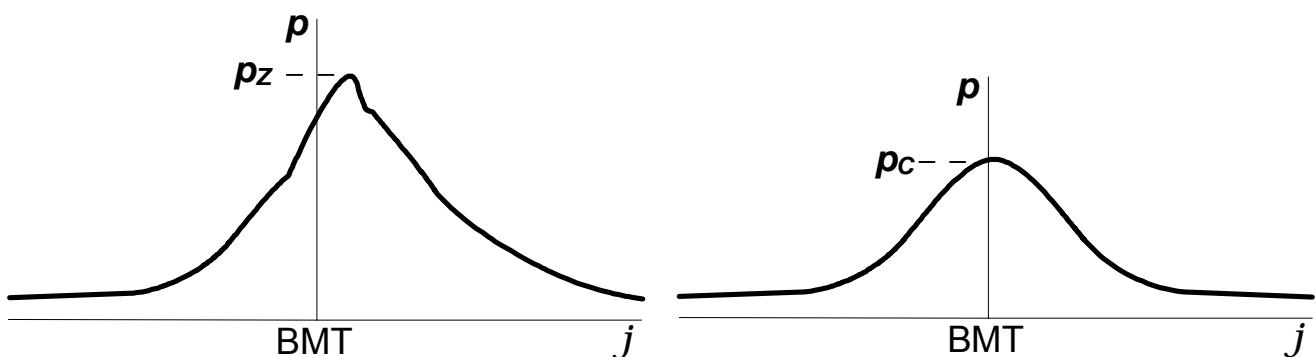


Рис. 5.2. Развернутые индикаторные диаграммы: а – рабочего режима; б – насосных ходов двигателя

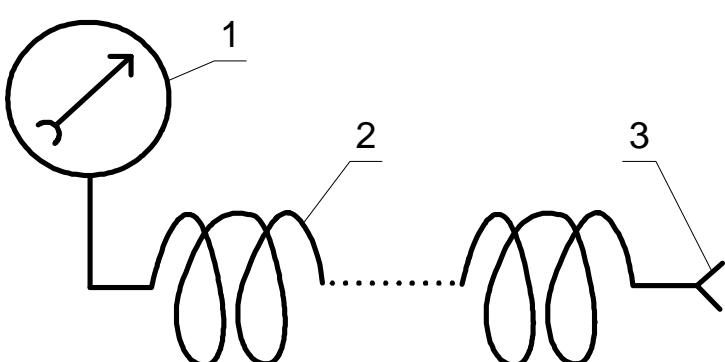


Рис. 5.3. Схема пимметра: 1 – трубчато-пружинный манометр; 2 – витая трубка (аккумулятор); 3 – приемник давления

Устройство пимметра (рис. 5.3) отличается отсутствием обратного клапана и значительно большим числом витков трубы аккумулятора 2. При этом внутренний диаметр трубы не превышает 1 мм. Благодаря этому аккумулятор является еще и значительным гидравлическим сопротивлением для газа. Пульсации внутрицилиндрового

давления в таком устройстве сглаживаются, и стрелка манометра 1 показывает некое усредненное давление в цилиндре. Сечение трубы и ее длину подбирают так, чтобы показания манометра соответствовали среднему индикаторному давлению p_{mi} (рис. 5.4).

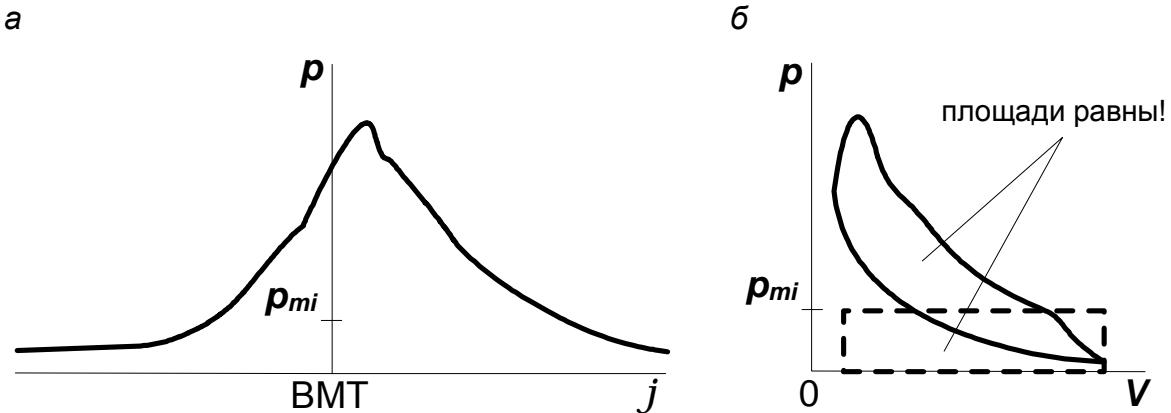


Рис. 5.4. Представление о среднем индикаторном давлении p_{mi} : а – развернутая диаграмма; б – свернутая диаграмма

Следует иметь ввиду, что измеренное пимметром давление лишь приблизительно соответствует p_{mi} , точное значение которого определяют при обработке действительной индикаторной диаграммы.

Для справки: Средним индикаторным давлением называют такое условно постоянное давление в цикле, при котором за один ход поршня совершается работа равная полезной работе газов за весь цикл (рис. 5.4, б).

Термоэлектрический термометр (рис. 5.5), называемый также термопарой, получил в практике испытаний ДВС широкое распространение благодаря своей простоте и способности измерять высокие температуры. Принцип действия прибора основан на явлении термоэлектрического эффекта, проявляющегося в возникновении электродвижущей силы (ЭДС) в месте контакта двух разнородных проводников электрического тока – термоэлектродов 2. Величина ЭДС пропорциональна разнице температур «горячего» и «холодного» спая – места соединения термоэлектродов с компенсационными проводами 3. Величина этой ЭДС не велика и поэтому для ее измерения применяется милливольтметр 4. Из-за корпуса 1, защищающего электроды от повреждения и агрессии

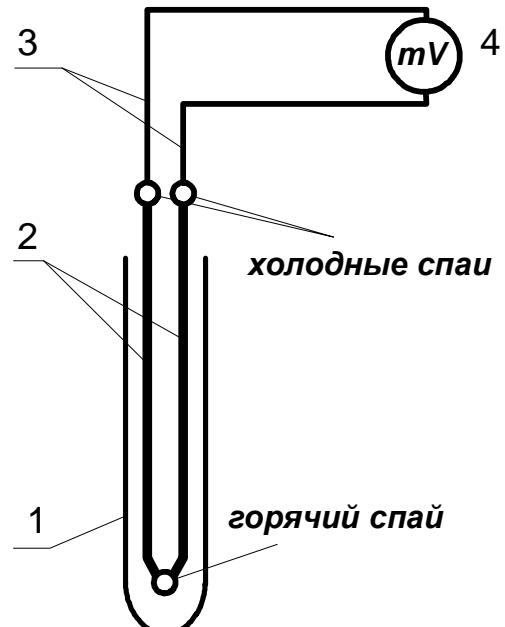


Рис. 5.5. Термоэлектрический термометр: 1 – корпус; 2 – термоэлектроды; 3 – компенсационные провода; 4 – милливольтметр

сивной среды, прибор обладает заметной инерционностью, не позволяющей измерить мгновенные значения температуры. Обычно термопары применяют для измерения температуры отработавших газов p_{mi} . Термопары устанавливают на дизеле в специальные адаптеры – «карманы», с помощью которых можно измерить температуру отработавших газов конкретного цилиндра.

Среди приборов, способных регистрировать быстропротекающие процессы в цилиндрах двигателя, практически значимыми являются индикаторы. Под индикатором будем понимать устройство, предназначенное для измерения развернутой индикаторной диаграммы. Как видно из рис. 5.2, а и 5.4, а развернутая индикаторная диаграмма – это зависимость мгновенного значения давления в цилиндре двигателя p от угла поворота коленчатого вала Φ .

На рис. 5.6 показана схема пневмоэлектрического индикатора МАИ – 2.

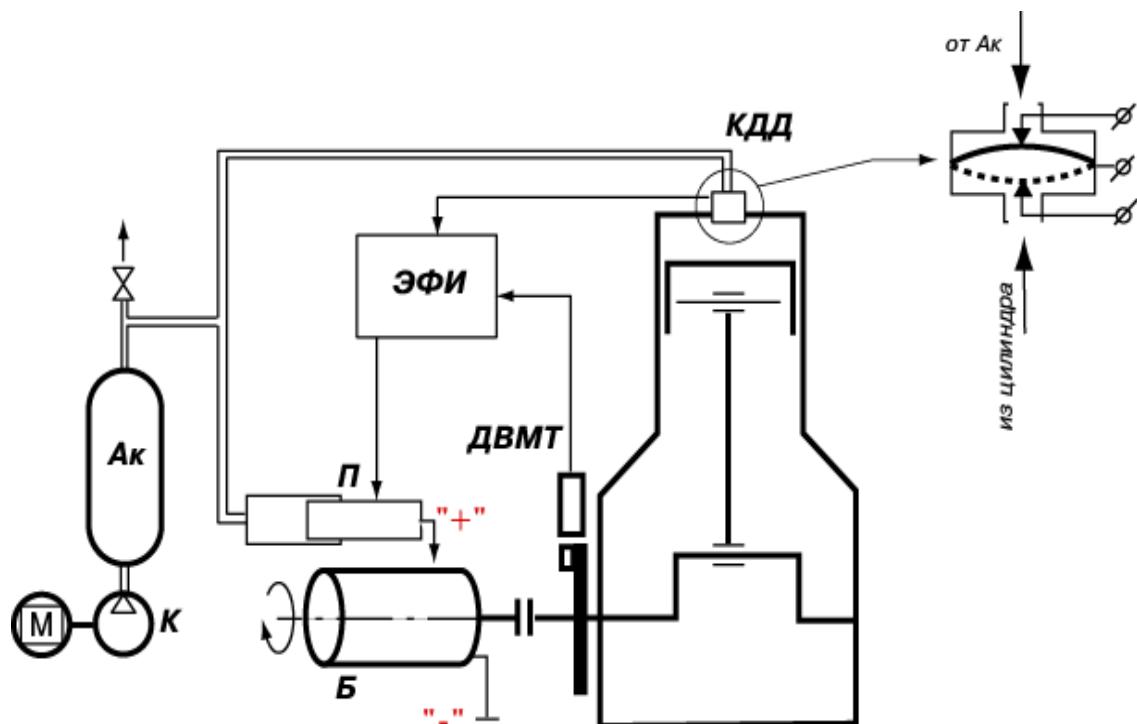


Рис. 5.6. Схема пневмоэлектрического индикатора

Принцип работы индикатора следующий. Перед испытанием двигателя в аккумулятор **Ак** с помощью компрессора **К** нагнетается воздух до давления, заведомо превышающего ожидаемые значения p_z , после чего мотор **М** компрессора отключают. Коленчатый вал дизеля соединяют с барабаном **Б**, на поверхности которого закреплена токопроводящая бумага. Перо пишущего устройства может перемещаться вдоль оси барабана благодаря движению поршенька **П**, управляемого давлением в аккумуляторе **Ак**. След на бу-

маге (точка) будет оставаться только тогда, когда между первом и барабаном есть разность электрических потенциалов, достаточная для возникновения искры – пробоя воздушного зазора. Высокое напряжение к перу подается от электронного формирователя импульсов **ЭФИ** в момент равенства давлений в аккумуляторе и цилиндре. Это равенство определяется размыканием контактов мембранны компараторного датчика давления **КДД**, работа которого понятна из схемы. Дополнительно **ЭФИ** формирует электрический импульс, а, следовательно, на бумаге появляется точка в момент прохождения поршнем ВМТ. С этой целью индикатор снабжается датчиком **ДВМТ**.

Как было сказано выше, перед измерениями в **Ак** создается давление, большее максимально возможного в цилиндре. В процессе измерения воздух из аккумулятора **Ак** стравливают в атмосферу. При этом за каждый цикл двигателя индикатор наносит на бумагу до трех точек: первую – на линии сжатия, вторую – на линии расширения, третью – в момент прохождения ВМТ. Таким образом, получают осредненную по нескольким сотням циклов индикаторную диаграмму.

Менее трудоемко в условиях рядовой эксплуатации использование электронного индикатора (рис. 5.7) с применением персонального компьютера (ПК).

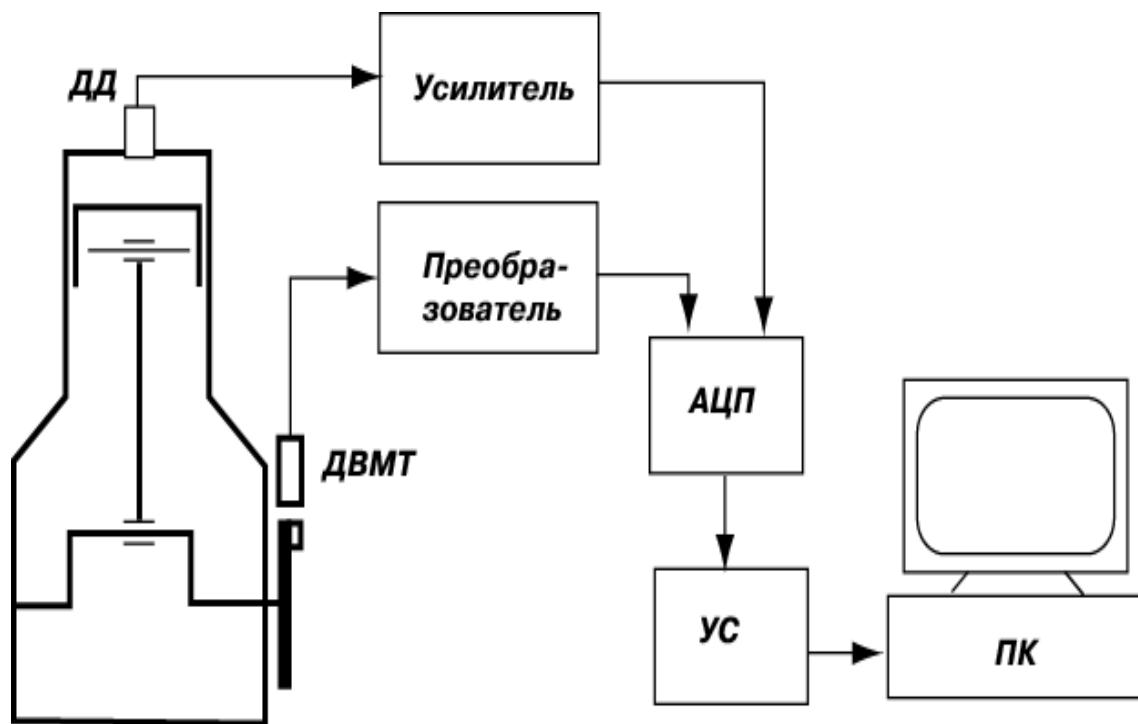


Рис. 5.7. Структурная схема электронного индикатора

В этом устройстве давление преобразуется датчиком давления **ДД** в электрический сигнал, пропорциональный по току или напряжению величине давления. Этот сигнал вместе с сигналом от датчика **ДВМТ** преобра-

зуется в цифровой вид аналого-цифровым преобразователем **АЦП** и посредством устройства согласования **УС** передается программе компьютера. С помощью такого индикатора измеряют диаграммы каждого цикла, иначе называемые одноцикловыми диаграммами. Программная обработка позволяет получить осредненные по заданному числу циклов диаграммы и автоматически рассчитать требуемые параметры.

Приведенная на рис. 5.7 обобщенная структурная схема соответствует многим диагностическим комплексам, в том числе и применяемым на железнодорожном транспорте: «Магистраль», «Кипарис», «Локомотив» и др.

5.2. Диагностические параметры рабочего процесса

Наряду с перечисленными выше параметрами p_z , p_c , t_Γ , p_{mi} в случае измерения индикаторной диаграммы появляется возможность оценивать качество протекания процесса с помощью ряда дополнительных параметров и, в первую очередь, благодаря возможности фазовой оценки характеристики давления. К таким параметрам относят:

Φ_z – угол, соответствующий p_z на диаграмме;

p_φ – давление, соответствующее фиксированному углу поворота коленчатого вала Φ относительно ВМТ, например, p_{30} – давление в цилиндре при повороте коленчатого вала на 30° после ВМТ.

p_{exp} – среднее давление на линии расширения;

J – «жесткость» процесса – максимальная скорость нарастания давления в цикле;

Φ_J – угол, соответствующий максимальной скорости нарастания давления;
– др. параметры.

По результатам расчета p_{mi} и известной частоте вращения коленчатого вала n_d можно рассчитать индикаторную мощность цилиндра, всего двигателя, а, сопоставив эти результаты с измеренной эффективной мощностью, оценить механические потери в двигателе.

Кроме того, дополнительными измерениями могут быть получены параметры, опосредованно связанные с рабочим процессом поршневой машины, например, давление наддувочного воздуха p_{int} , средняя температура газов перед турбиной и др. Отметим, что измерение этих параметров не представляет технической сложности, а некоторые из них могут быть определены с помощью штатных приборов тепловоза.

5.3. Методы диагностики дизеля по индикаторной диаграмме

Полученные в результате индицирования параметры позволяют наиболее объективно оценить распределение мощности по цилиндрям, определив недогруженные и перегруженные цилиндры. Воздействуя на двигатель предусмотренными конструкцией регулировками, можно добиться равномерного распределения нагрузки по отдельным цилиндрам многоцилиндрового двигателя. Для тепловозного дизеля в условиях эксплуатации доступны только два пути воздействия на протекание процесса в каждом цилиндре, а именно, изменение угла опережения подачи топлива и цикловой подачи топлива. Поэтому для практики в первую очередь желательно по результатам анализа рабочего процесса получить ответ на вопрос: что именно и на сколько надо изменить в этих регулировках, чтобы улучшить рабочий процесс?

Кроме того, в эксплуатации нередки случаи развития дефектов, приводящих к снижению уплотнения рабочей камеры, ухудшению качества распыливания и сгорания топлива. Все эти причины могут быть выявлены анализом индикаторных диаграмм. Следует отметить, что непосредственный диагностический анализ индикаторных диаграмм требует от специалиста глубоких знаний теории рабочего процесса, изложение которых выходит за рамки настоящего курса. Вместе с тем различными авторами предложен ряд формальных методов, представляющих практический интерес. Ниже рассмотрим методы идентификации неисправностей, нашедшие применение в современной практике диагностирования дизелей.

5.3.1. Параметрический метод идентификации неисправностей

Данная группа методов основывается на сравнении результатов диагностического эксперимента с заведомо известными эталонными значениями. Существует большое множество диагностических параметров и схем сравнения их с эталонами. Рассмотрим один из апробированных методов, применение которого можно рекомендовать для условий локомотиворемонтного предприятия.

Суть метода заключается в следующем.

По результатам обработки действительной индикаторной диаграммы и других замеров, выполненных на работающем дизеле, находят следующие 6 параметров:

- 1) p_{int} – среднее давление наддува;
- 2) p_C – давление в конце сжатия;
- 3) $p_Z - p_C$ – разность между максимальным давлением сгорания и давлением в конце сжатия;
- 4) p_{mi} – среднее индикаторное давление в цилиндре двигателя;
- 5) Φ_Z – угол поворота коленчатого вала, соответствующий максимуму давления в цилиндре;
- 6) t_Γ – температура газов на выходе из цилиндра.

Для каждого режима работы двигателя должны быть известны или могут быть рассчитаны эталонные значения каждого из этих параметров. Кроме того, для каждого параметра задается предельно допустимое отклонение Δ в большую $+\Delta$ или меньшую $-\Delta$ сторону. Если реальные отклонения всех параметров не превышают Δ , двигатель (цилиндр двигателя) исправен, в противном случае комбинация отклонений идентифицирует существующий дефект. Возможные комбинации отклонений представлены матрицей неисправности (табл. 5.1).

Например, если давление наддува p_{int} меньше эталонного, температура газов t_G больше, а остальные параметры в норме, то согласно табл. 5.1 получаем диагноз: загрязнение проточной части турбокомпрессора или его повреждение. Подобным образом определяются и другие дефекты.

Кроме неисправностей собственно двигателя рассмотренный метод может выявить и неисправности аппаратной части комплекса: колонке с шифром 6 соответствует повышение давления в конце сжатия (компрессии цилиндра) при отсутствии других отклонений, что не может иметь места в действительности.

Таблица 5.1

Матрица неисправностей

Эталонное значение параметра	Допуск (симптом)	Шифр неисправности						
		1	2	3	4	5	6	7
p_{int}	+D1							
	- D1							
p_c	+D2							
	- D2							
$p_z - p_c$	+D3							
	- D3							
p_{mi}	+D4							
	- D4							
j_z	+D5							
	- D5							
t_G	+D6							
	- D6							

Шифры неисправностей:

- 1 – нарушение плотности цилиндра из-за износа или поломки поршневых колец, прогара выпускного клапана и других повреждений;
- 2 – слишком поздний впрыск топлива;
- 3 – слишком ранний впрыск топлива;
- 4 – загрязнение проточной части турбины, компрессора или их повреждение;
- 5 – плохое распыливание топлива;
- 6 – неисправность измерительной аппаратуры;
- 7 – закоксовывание соплового аппарата

Отметим, что работоспособность метода снижается при возникновении двух и более дефектов одновременно. Кроме того, определенную сложность представляет задача определения эталонных значений параметров для всего диапазона режимов, возможных при испытаниях. Наконец, нельзя не учитывать, что индикаторный канал (канал, соединяющий камеру сгорания с мембранным датчиком) вносит заметные искажения в действительную индикаторную диаграмму, определяемые еще и состоянием этого канала, в первую очередь, загрязнениями. Это также ограничивает возможности подобных методов.

5.3.2. Методы графического сравнения диаграмм

Авторами программно-аппаратного комплекса «Магистраль» реализован метод идентификации неисправностей, лишенный, отчасти, недостатков рассмотренного выше метода.

В основе метода лежит предположение, что в многоцилиндровом двигателе рабочий процесс одного из цилиндров можно принять за эталон. Поэтому, если измерение диаграмм произвести одновременно во всех цилиндрах двигателя, то задача нахождения эталона сводится к выбору из множества всех измеренных диаграмм лучшей диаграммы. Остальные диаграммы сравниваются с этой эталонной диаграммой и по отклонению характеристик идентифицируется ряд дефектов двигателя. В качестве характеристик авторы используют не только зависимость $p(\phi)$, но и производные этой характеристики: $p'(\phi)$ – скорость и $p''(\phi)$ – ускорение изменения давления в цилиндре в зависимости от угла поворота коленчатого вала. В качестве иллюстрации работы метода покажем изменение вида диаграмм $p(\phi)$ при отклонениях регулировок угла опережения подачи топлива и цикловой подачи топлива в цилиндр.

При позднем впрыске топлива в цилиндр (рис. 5.8) начало видимого сгорания (характерный перегиб вблизи ВМТ) наступает позже, чем в эталонном процессе с меньшими скоростями изменения давления в сравнении с эталонным процессом

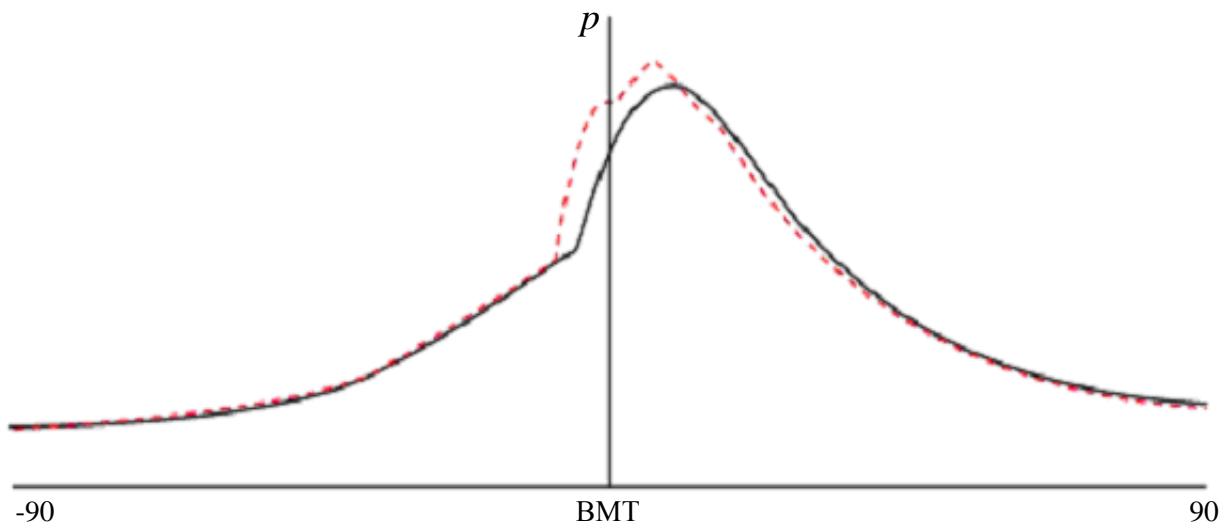


Рис. 5.8. Пример определения слишком поздней подачи топлива: —— – эталон; —— – фактически

И, наоборот, при ранней подаче топлива начало сгорания лежит на рисунке (рис. 5.9) левее, чем в эталонном процессе.

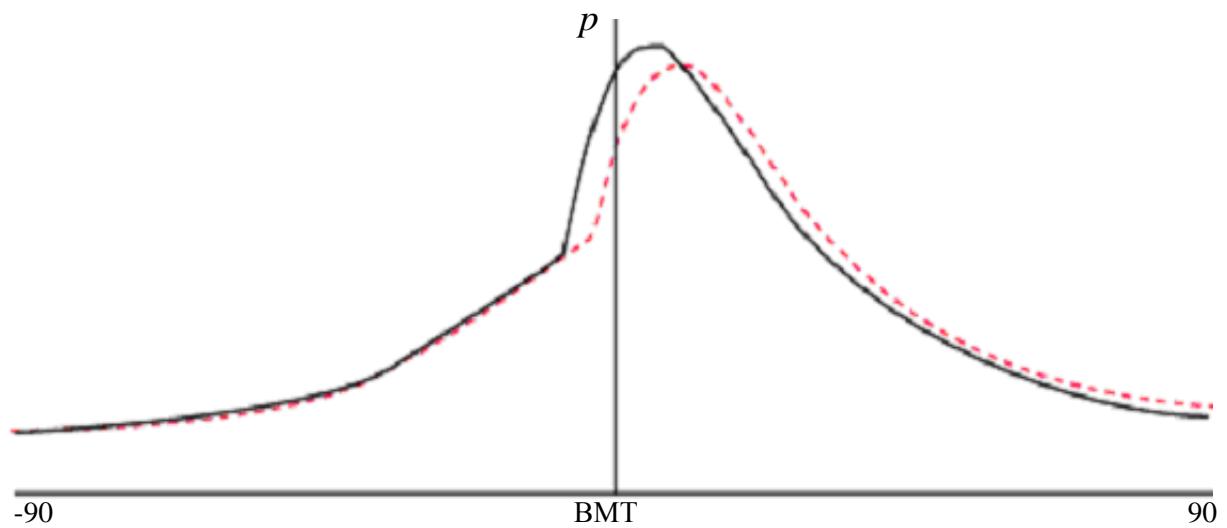


Рис. 5.9. Пример определения слишком ранней подачи топлива: —— – эталон; —— – фактически

При изменениях цикловой подачи топлива и отсутствии других отклонений, изменения сказываются на полноте диаграммы участка «горение-расширение» (рис. 5.10). Линии $p(\phi)$ на эталонной и действительной диаграммах совпадают только на начальном участке основной фазы сгорания.

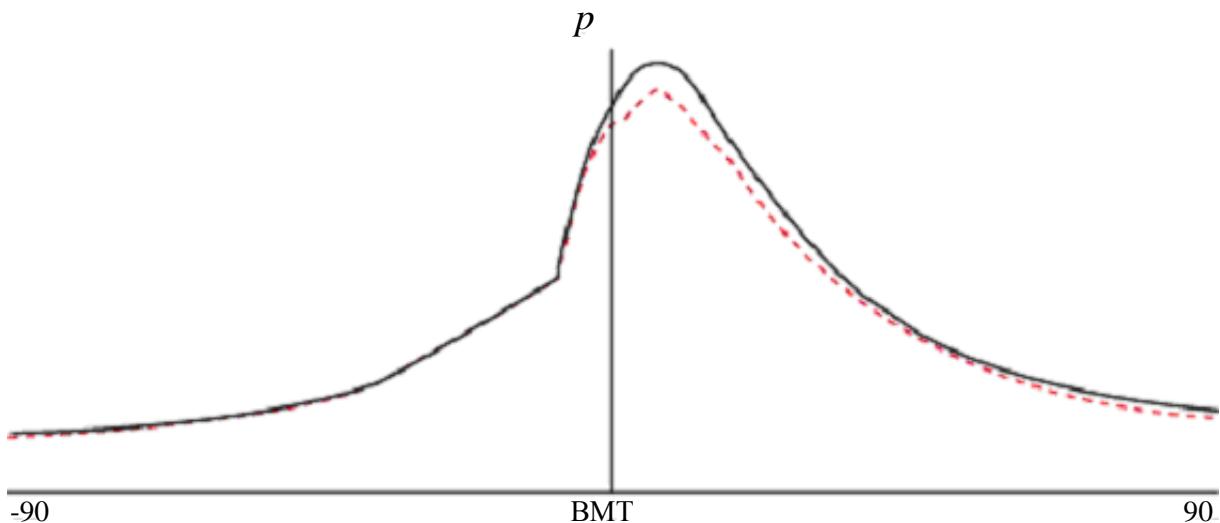


Рис. 5.10. Пример определения «перегруженного» по цикловой подаче цилиндра: —— — эталон; —— — фактически

Отметим, что приведенные примеры выбраны лишь для иллюстрации принципа графического сравнения и могут показаться достаточно простыми и очевидными. В действительности алгоритмы определения отклонений в техническом состоянии двигателя, применяемые в комплексе «Магистраль» значительно сложнее изложенных выше замечаний и позволяют определять одновременно существующие неисправности двигателя с их количественной оценкой.

Контрольное задание № 5

Для указанного типа дизеля привести комбинацию диагностических параметров рабочего процесса, соответствующую заданной неисправности при испытании двигателя на номинальном режиме. Тип дизеля (табл. 5.2) определяется последней цифрой шифра, а неисправность – предпоследней.

Таблица 5.2

Исходные данные для выполнения задания № 5

Выбор типа дизеля		Выбор неисправности	
Последняя цифра шифра	Дизель	Предпоследняя цифра шифра	Неисправность, для которой следует составить комбинацию параметров
1	ПД1М	1	
2	Д50М	2	Нарушение плотности цилиндра
3	10Д100	3	
4	14Д40	4	Ранняя подача топлива
5	11Д45	5	
6	2Д70	6	Поздняя подача топлива
7	1А-5Д49	7	
8	1Д49	8	Некачественный распыл топлива
9	2-2Д49	9	Загрязнение соплового аппарата турбины
0	ЗА-6Д49	0	

Методические указания к решению задачи:

Найдите в матрице неисправностей столбец с кодом, соответствующим заданной неисправности. Помеченные ячейки указывают на параметр и направление (больше – меньше), для которых будут иметь место отклонения действительных значений от эталонных.

Для определения действительных числовых значений параметров используйте данные табл. 5.3 как эталоны. Предельные значения отклонений можно ориентировочно принять равными:

- для давления наддува p_{int} принять $\pm \Delta 1 = 5\%$ эталонного;
- для давления в конце сжатия p_c принять $\pm \Delta 2 = 0,3$ МПа ;
- для разницы давлений $p_z - p_c$ принять $\pm \Delta 3 = 0,2$ МПа ;
- для среднего индикаторного давления p_{mi} принять $\pm \Delta 4 = 0,06$ МПа ;
- для угла Φ_z принять $\pm \Delta 5 = 5^\circ$ п.к.в. ;
- для температуры газов t_g принять $\pm \Delta 6 = 40$ $^\circ\text{C}$.

Окончательно приведите численные значения всех шести диагностических параметров, входящих в матрицу неисправностей.

Таблица 5.3

Некоторые параметры работы тепловозных дизелей на режиме номинальной мощности

Параметр	Дизели									
	ПД1М	Д50М	10Д100	14Д40	11Д45	2Д70	1А-5Д49	1Д49	2-2Д49	ЗА-6Д49
Давление наддува, МПа	0,162	0,139	0,221	0,201	0,219	0,230	0,235	0,31	0,26	0,1
Давление в конце сжатия, МПа	4,2	4,4	8,4	6,6	5,8	7,8	7,36	9,9	7,85	7,05
Максимальное давление сгорания, МПа	6,8	6,8	9,8	10,6	10,8	11,3	11,5	13,0	11,0	9,5
Среднее индикаторное давление	1,06	0,901	1,140	0,981	1,101	1,420	1,425	2,011	1,280	1,164
Температура газов перед турбиной, $^\circ\text{C}$	525	480	410	500	495	500	533	583	523	550
Угол, соответствующий максимальному давлению сгорания, гр. п.к.в. после ВМТ	3 ... 5		4 ... 6		5 ... 7		7 ... 9		7...10	

6. ДИАГНОСТИКА МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ПО СОСТАВУ СМАЗКИ

Большинство механизмов локомотива требует смазки для снижения трения и износов. Несмотря на это, износ, с той или иной интенсивностью, всегда имеет место. При этом в смазку переносятся частицы вещества с изношенной поверхности, количественная оценка которых позволяет определить текущее состояние изнашиваемых узлов машины, а, в случае многократных периодических замеров, прогнозировать развитие износа. Кроме износа деталей, состав смазки позволяет оценить и некоторые дефекты не связанные непосредственно с износом, например, загрязнение фильтров, обводнение и «старение» смазочных материалов и др. Поэтому в организации оперативного диагностического контроля тепловозного дизеля важное место принадлежит методам и средствам анализа работавшего масла.

6.1. Методы и средства определения элементов износа

Рассмотрим методы определения химического состава, получившие распространение в практике работы локомотиворемонтных предприятий применительно для анализа моторного масла тепловозного дизеля. Для количественной оценки элементов износа в работавшем масле существует ряд методов: спектральный анализ, колориметрические, индукционные, метод вставок и др. (рис. 6.1).

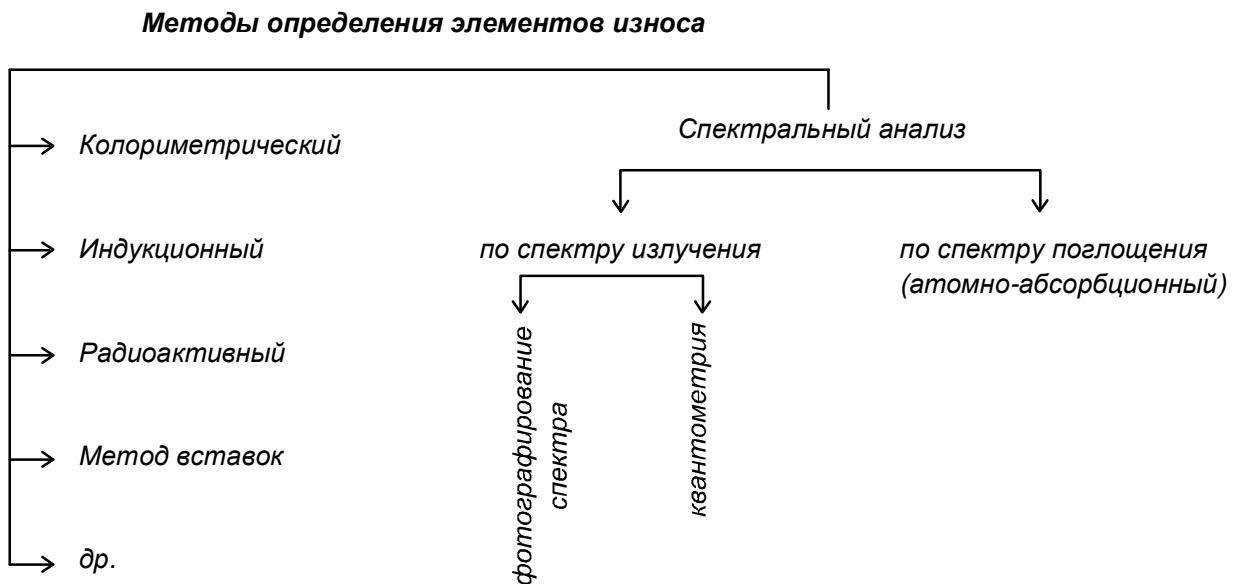


Рис. 6.1. Схема классификации методов количественного определения элементов износа

Колориметрические методы («color» цвет) основаны на измерении оптической плотности стандартного раствора и раствора, полученного путем

обработки пробы работавшего масла. Метод отличается большой трудоемкостью, так как требует озления пробы работавшего масла (до 2 часов) и приготовления исходных растворов. Перед проведением анализов строится тарировочный график, по которому определяется оптическая плотность рабочих растворов, что требует, в свою очередь, приготовления эталонного раствора. Пробы масла анализируют на содержание железа, меди или алюминия. В нормальных условиях работы дизеля содержание этих элементов не должно превышать соответственно 15,5 и 4 г/м³. В дизеле со сверхнормативным износом трущихся частей содержание указанных элементов соответственно равно 24,1 и 5 г/м³.

Применение индукционного метода отличается простотой, оперативностью измерений, но позволяет определить в масле только один элемент – железо. Принцип действия приборов, для определения концентрации железа в масле понятен из рис. 6.2.

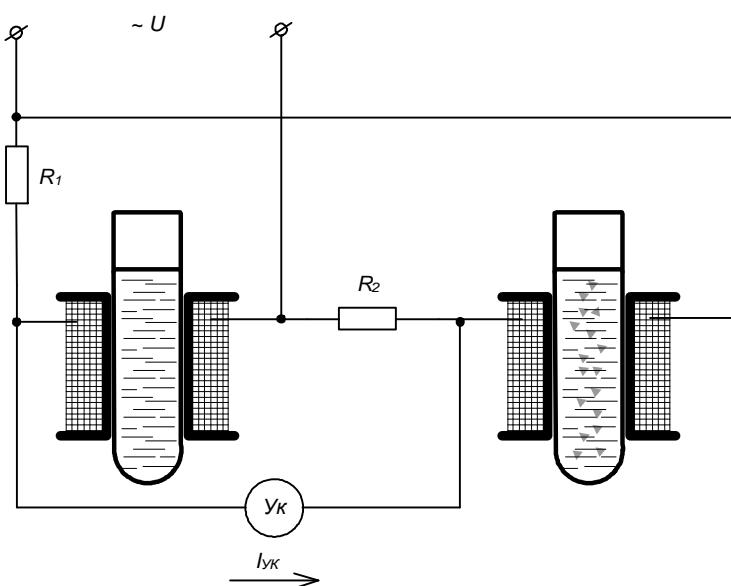


Рис. 6.2. Схема прибора для определения концентрации железа индукционным методом

При работе прибора измеряется ток указателя $I_{УК}$ в плече полного резистивного моста, образованного постоянными сопротивлениями R_1 , R_2 и двумя индуктивными сопротивлениями – катушками, сердечником которых являются пробирки с маслом. Одна из пробирок заполняется чистым (эталонным) маслом, вторая – работавшим. При наличии в последнем ферромагнитных частиц индуктивное сопротивление катушки изменяется, что приводит к разбалансировке моста

и появлению тока $I_{УК}$, пропорционального концентрации железа вработавшем масле.

Определение продуктов износа в масле можно производить методом радиоактивных изотопов. Предварительно необходимо активировать изнашиваемые детали двигателя. Активация деталей может осуществляться:

- введением радиоактивного изотопа при их отливке;
- облучением деталей нейтронами в атомном реакторе;
- нанесением на поверхность детали радиоактивного электролитического покрытия;
- введением вставок-свидетелей.

Метод вставок получил наибольшее распространение. Вставки изготавливаются из проволоки, состоящей из кобальта (44 %), никеля (54 %),

углерода, магния и фосфора. Проволока облучается нейтронами в атомном реакторе, что создает радиоактивный изотоп с атомной массой 60.

Радиоактивность измеряют счетчиками Гейгера-Мюллера или сцинтиляционными счетчиками.

Применяя активацию различными изотопами для различных узлов двигателя, можно впоследствии идентифицировать степень износа каждого из них.

Данный анализ, обладая исключительно высокой чувствительностью и точностью, позволяет осуществлять непрерывную регистрацию измерений непосредственно при работе двигателя. Основным недостатком его является сложность переоборудования двигателя, высокая стоимость измерительной аппаратуры и потребность в биологической защите обслуживающего персонала. Количество определяемых элементов, как правило, ограничивается и не превышает двух.

Метод нейтронной активации работавшего масла не требует переоборудования двигателя для диагностики, так как проба масла, взятая из него, облучается затем в реакторе мощным потоком нейтронов, после чего продукты износа становятся радиоактивными. Однако сама активация и расшифровка результатов представляет весьма сложную задачу. Данному методу присущи те же достоинства и недостатки, что и радиоактивному.

Разновидностью метода вставок является применение вставок из характерных не активированных материалов, отличных от материалов изнашиваемых деталей. Эти вставки устанавливаются так, чтобы до достижения критических износов деталей материал вставки не попадал бы в масло. Поэтому, его появление в масле означает превышение допустимого для эксплуатации порога износа и сигнализирует о необходимости замены или восстановления контролируемого узла. Практически применение этого метода требует доработки конструкции двигателя и ограничено заложенной на стадии проектирования контролепригодностью двигателя.

Одновременно определить концентрацию в масле большого количества элементов позволяет спектральный анализ. Известно большое множество методов спектрального анализа. Во всех методах используется известная, характерная для каждого вещества, зависимость распределения интенсивности светового и инфракрасного (ИК) излучения атомов на разных частотах. Переход атомов из одного энергетического состояния в другое, например, при сжигании вещества, сопровождается излучением, лежащим в большей части в ИК-области спектра. Любое вещество имеет свой, совершенно определенный, спектр. На этом эффекте основана работа установок спектрального анализа по спектру излучения. На рис. 6.3. приведен спектр картерного масла, полученный на спектрометре – устройстве, графически фиксирующем разложенное в спектр излучение. В самых простейших случаях используется фотографирование спектра.

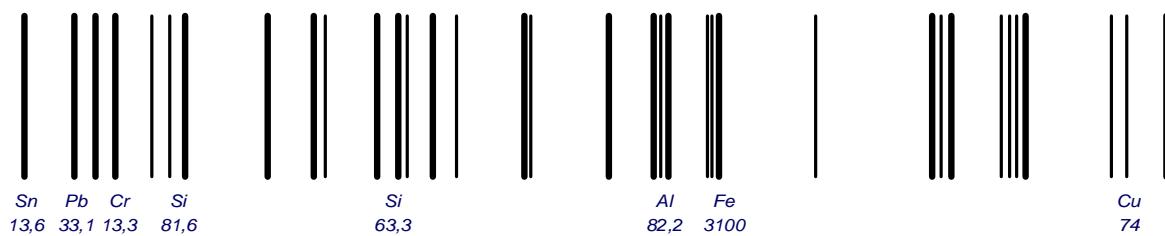


Рис. 6.3. Фрагмент спектра картерного масла

Другая группа устройств (спектрофотометры) измеряет интенсивность излучения в характерных его зонах, каждой из которых, как следует из рис. 6.3, соответствует свой химический элемент. Метод получил название эмиссионного спектрального анализа.

Рассмотрим принцип работы квантотометрических устройств на примере установки для экспрессного анализа масла типа МФС-3.

Пробу масла помещают в ванночку так, что при вращении подвижного электрода 2, масло постоянно подается в зону электрической дуги между электродами 2 и 3. Высокое напряжение, необходимое для пробоя зазора между электродами создается генератором 1, питаемым в свою очередь переменным током напряжением 220В, 50Гц. ИК-излучение фокусируется на призму, после прохождения которой разлагается в спектр. С помощью системы зеркал 5 отдельные выделенные участки излучения попадают на фотоэлементы 7, ток в выходных цепях которых оказывается пропорциональным интенсивности падающего на них света. Электронная оснащение установки МФС-3 позволяет автоматически измерить и зафиксировать интенсивность излучения в отдельных участках и линиях спектра.

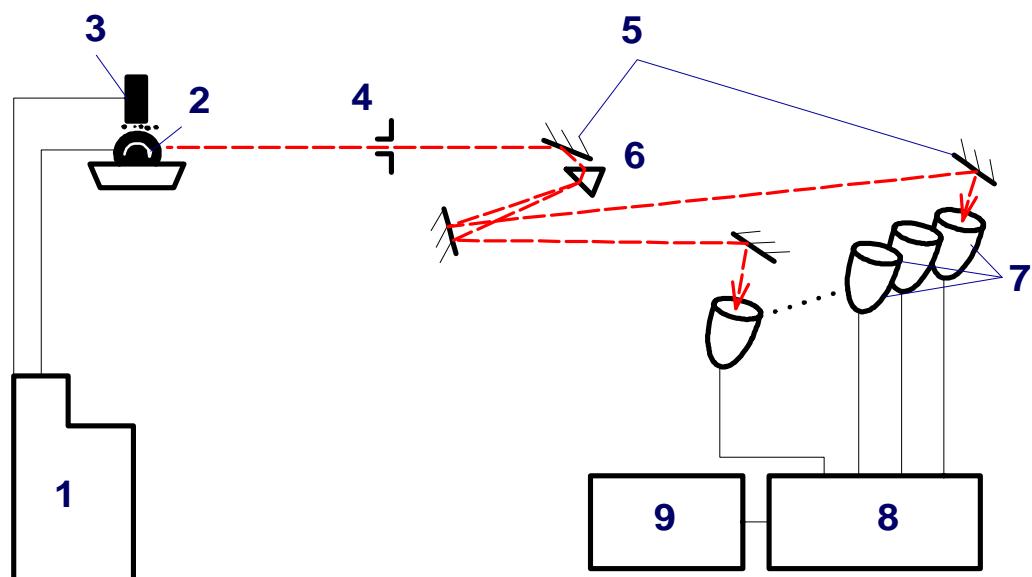


Рис. 6.4. Структурная схема установки типа МФС-3: 1 – генератор; 2, 3 – электроды; 4 – микрометрическая щель; 5 – зеркала; 6 – кварцевая призма; 7 – фотоэлементы; 8 – электронный блок преобразования; 9 – устройства индикации и регистрации измерений

Однозначность спектров элементов связана с закономерностями структуры энергетических состояний электронов в атоме. При этом интенсивность излучения (лучистый поток) E , Вт определяется уравнением

$$E = mK^R, \quad (6.1)$$

где m , R – постоянные, определяемые опытным путем; K – концентрация элемента в масле.

В настоящее время в ряде дорожных химико-технологических лабораторий используется современный спектрометр МФС-7 (рис. 6.5). Принципиальных отличий в его работе по сравнению с рассмотренной установкой МФС-3 нет. Обновление связано с использованием одноплатного контроллера, работающего под управлением IBM-совместимого компьютера. Программа компьютера обеспечивает автоматическое управление и контроль технического состояния системы, автоматическую обработку аналитических сигналов, в том числе усреднение и оценку погрешности результатов измерений, расчет оптимальных регрессионных моделей градуировочных характеристик, учет фона, графическое представление градуировочных кривых, оценку погрешности градуировки; автоматическую корректировку градуировки; расчет результатов анализа в единицах концентраций. В табл. 6.2. приведены пределы обнаружения концентрации продуктов износа деталей двигателя в смазочном масле и сходимость результатов измерения, полученные по одной из аналитических программ. Максимальное число определяемых одновременно элементов увеличено в МФС-7 до 24.

Значительное повышение точности определения количественного состава масла достигается при использовании метода взаимного абсорбционного анализа. Он основан на излучении атомных спектров резонансного поглощения. Атомы способны не только излучать свет определенной длины волны, но и поглощать его. Особенно эффектив-

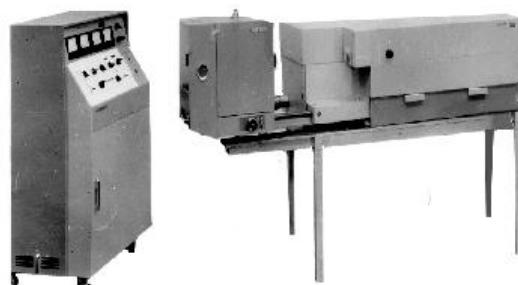


Рис. 6.5. Спектрометр МФС-7

Таблица 6.1

**Результаты определения
концентраций продуктов износа
в смазочном масле**

Элемент	Длина волны, нм	K , % по массе	s , %
Fe	259,9	0,00002	7,0
Cr	267,7	0,00001	4,0
Pb	283,3	0,00003	5,0
Si	288,1	0,00003	4,0
Al	308,2	0,00002	12,0
Sn	317,5	0,00001	4,0

тивно поглощается свет той длины волны, которая соответствует переходу атома в возбужденное состояние с основного нижнего энергетического уровня (так называемое резонансное поглощение).

Чтобы добиться атомно-резонансного поглощения, необходимо задать резонансное излучение, соответствующее спектру искомого элемента, и пропустить через него атомизированную пробу. Если измерить исходное излучение до прохождения пробы и после неё, то при наличии атомов искомого элемента в пробе первоначальное излучение уменьшится вследствие поглощения излучения данного элемента и в тем большей степени, чем больше его в пробе. По уменьшению интенсивности заданного излучения можно судить о количестве искомого элемента.

Для анализа масла данным методом (рис. 6.6) используется спектрофотометр С-302. При работе этого прибора жидкую пробу масла распыляется и поступает в пламя пропан – воздух, где атомизируется, а излучение определенной длины волны искомого элемента задается специальным излучателем прибора. Падение интенсивности излучения измеряется после прохождения пара пробы через пламя.

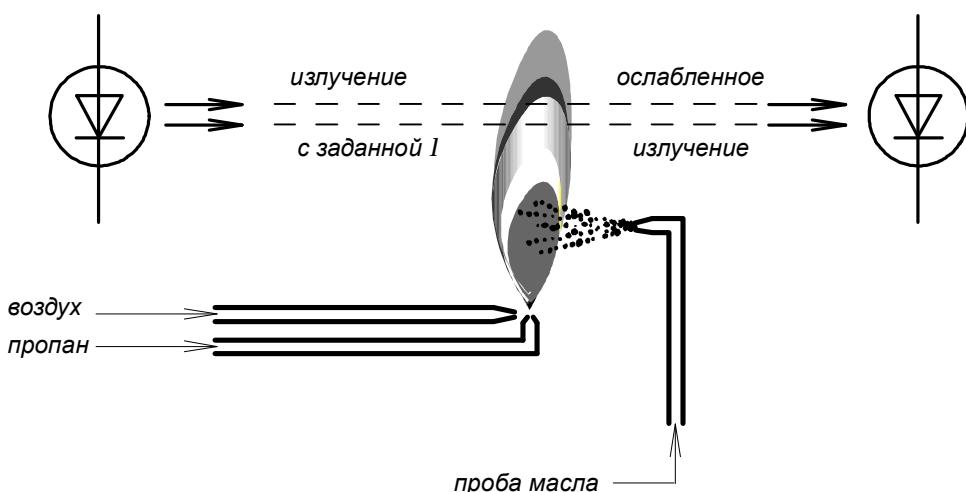


Рис. 6.6. Схема аборбционного метода

Чувствительность этого метода в 1000 раз выше рассмотренного ранее эмиссионного метода. С его помощью легко определить 1 атом из миллиона и даже более других атомов пробы.

6.2. Состав картерного масла как диагностический показатель

Анализ проб масла из картера двигателя и отложений в масляном фильтре выполняется с целью определения количественного содержания не только для продуктов износа, но и примесей, попадающих в масло извне, а также элементов, входящих в паспортный состав масла.

По концентрации железа Fe, алюминия, Al, хрома Cr, свинца Pb, олова Sn и других металлов можно судить о скорости изнашивания конкретных, содержащих эти элементы, деталей двигателя. Например, по измерению концентрации железа в работавшем масле оценивают износ таких деталей, как гильзы цилиндров, поршневые кольца, шейки коленчатых валов. В табл. 6.2 приведены ориентировочные сведения, позволяющие соотнести концентрацию элемента с изнашиваемым узлом. Более точные сведения могут быть получены только с учетом типа двигателя, его конструктивных особенностей и условий эксплуатации.

Продукты почвенной пыли (кварц, кальций, окислы алюминия и др.) характеризуют состояние воздушного тракта и фильтров, а также состояние и работу маслоочистителей. Например, плохая работа воздухоочистителя или нарушение герметичности воздушного тракта (подсос нефильтрованного воздуха) приводит к попаданию в цилиндр большого количества абразивных частиц, вследствие чего резко повышается износ деталей цилиндропоршневой группы, а при смешивании частиц с маслом в воздушном клапанном канале нарушается герметичность впускного клапана.

По изменению содержания элементов, входящих в состав присадок к маслу (барий, фосфор, молибден и др.), можно судить о работоспособности масла и своевременно производить его замену. Появление в масле комплекса таких элементов, как натрий, бор, хром свидетельствует о попадании в масло охлаждающей жидкости из-за потери герметичности системы охлаждения.

Таблица 6.2

Диагностическая ценность состава картерного масла

Химический элемент	Диагностический признак	Причина, неисправность
Железо	рост концентрации	износ гильзы цилиндров, поршневых маслосъемных колец, шеек коленчатого вала
Алюминий	рост концентрации	износ поршней
Медь	рост концентрации	износ подшипника скольжения турбокомпрессора
Хром	рост концентрации	износ поршневых компрессионных колец
Кремний	рост концентрации	плохая работа воздухоочистителей
Барий, фосфор, молибден	снижение концентрации	выработка (старение) масла
Натрий, бор, хром	рост концентрации	разгерметизация системы охлаждения

6.3. Методика определения скорости изнашивания деталей двигателя

Как показывает опыт, при условии своевременной доливки масла концентрация элементов износа в картерном масле зависит прежде всего от скорости изнашивания деталей двигателя. После наработки (через 120–150 ч работы) уровень концентрации стабилизируется и в условиях данного вида работ может незначительно колебаться около некоторого уровня.

Справедливо сопоставить скорость износа деталей двигателя и скорость поступления продуктов износа в картерное масло, а, следовательно, и концентрацию этих элементов в пробе. Рассмотрим наиболее общие закономерности изменения этих характеристик во времени на примере «жизненного цикла» двигателя, оценивая только один элемент – железо, повышение концентрации которого связано с износом стальных и чугунных деталей двигателя (рис. 6.7).

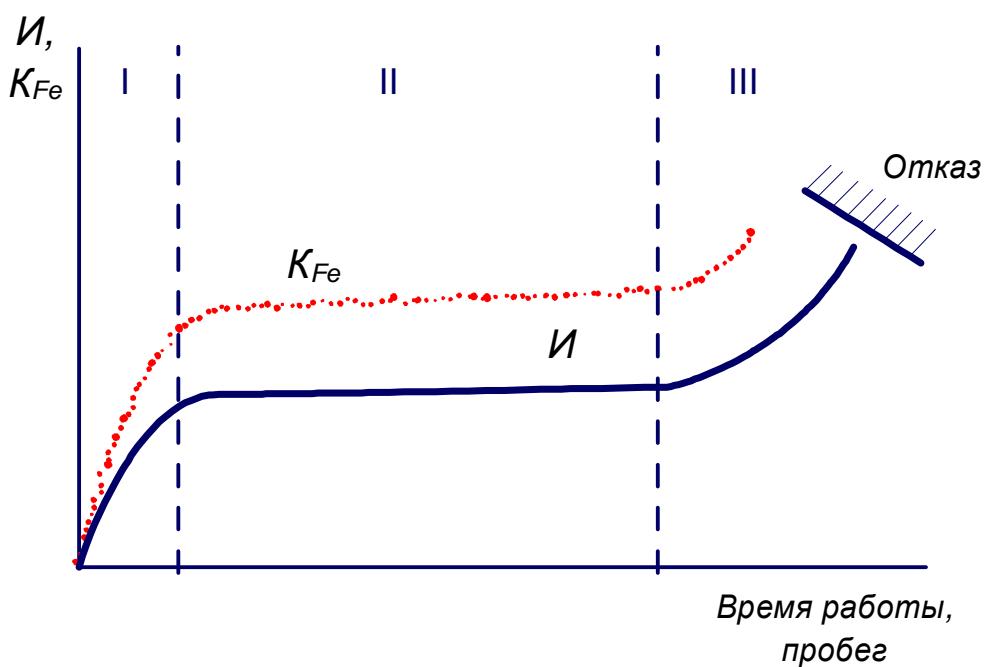


Рис. 6.7. Связь износа I и концентрации K_{Fe} продуктов износа (железа) в масле: I – этап приработки; II – нормальный износ; III – повышенный износ

Из рисунка следует, что, наблюдая за скоростью изменения концентрации железа в масле, можно вполне объективно прогнозировать приближение отказа и своевременно предотвратить его. Некоторая сложность возникает в связи с тем, что масло в двигателе за весь его жизненный цикл меняется несколько десятков раз, а в период между заменами может доливаться из-за нормального или повышенного расхода «на угар». Замена и очистка фильтров масляной системы также изменяет текущую концен-

трацию элементов износа в картерном масле. Поэтому, методика расчета скорости концентрации продуктов износа должна учитывать и эти факты.

Количество железа G_{Fe} , мг поступившее в масло за период t , ч определяется уравнением

$$G_{Fe} = gt, \quad (6.2)$$

где g – скорость поступления железа в масло, мг/ч;

В любой момент времени существует баланс, устанавливаемый равенством

$$G_{Fe} = G_{FeM} + G_{FeO} + G_{FeY}, \quad (6.3)$$

где G_{FeM} – количество железа в картерном масле, мг; G_{FeO} – железо, содержащееся в отложениях фильтра, мг; G_{FeY} – железо, потерянное с израсходованным (на угар) маслом, мг.

Перепишем это уравнение баланса, представив каждое слагаемое произведением концентрации железа на количество масла

$$QK_{Fe} = Q_M K_{FeM} + Q_O K_{FeO} + Q_Y K_{FeY}, \quad (6.4)$$

где K_{FeM} , K_{FeO} , K_{FeY} – концентрации железа, соответственно в картерном масле, отложениях фильтра и израсходованном масле, мг/кг; Q – количество масла, кг, поступившее в двигатель с учетом первой заправки и доливок за интервал времени t ; Q_M , Q_O , Q_Y – количество, кг, соответственно картерного масла, отложений фильтра, израсходованного на угар масла за время t .

Если период t приравнять к промежутку времени между сменами масла и учсть количество очисток (замен) фильтра n и доливок m масла, то скорость поступления железа в масло можно рассчитать из равенства

$$g \cdot t = Q_M K_{FeM} + \sum_{i=1}^n Q_{O_i} K_{FeO_i} + \sum_{i=1}^m Q_{Y_i} K_{FeY_i}. \quad (6.5)$$

Наблюдая за динамикой изменения g , можно своевременно прогнозировать чрезмерный износ деталей и оценивать текущее состояние двигателя.

7. ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЕПЛОВОЗА

Современные тепловозы имеют электрическую передачу мощности от источника энергии – дизеля – к колесным парам, где эта мощность реализуется в тягу. Тяговые электродвигатели (ТЭД) располагают непосредственно на колесных парах, образующих вместе с редуктором колесомоторный блок. В результате условия работы ТЭД во многом определяются условиями окружающей среды. Опыт локомотивных депо показывает, что в период с ноября по март, при низких температурах и высокой влажности окружающей среды, количество отказов ТЭД резко возрастает. Основной причиной отказов является нарушение изоляции. На Сахалинской железной дороге из-за высокого уровня осадков в зимний период и близости морского побережья тепловозы оснащаются гидравлической передачей мощности. Сегодня это единственная в нашей стране дорога, на которой эксплуатируются магистральные тепловозы с гидропередачей. В последние годы намечено переоснащение Сахалинской железной дороги и, возможно, что в ближайшее время современные тепловозы с электропередачей заменят морально устаревшие тепловозы ТГ16. В табл. 7.1 приведены сведения о типах электрических машин магистральных тепловозов, работающих на железных дорогах нашей страны. Анализ приведенных данных показывает, что большинство ТЭД, в том числе и современных тепловозов, являются машинами постоянного тока. Наличие коллекторного узла снижает надежность этих машин. Износ, неправильная установка щеток вызывают возникновения дуги – пробоя воздушного зазора между щеткой и коллектором. Этот процесс сопровождается выделением значительной энергии, которая частично расходуется на эрозию – перенос частиц вещества деталей коллекторного узла, а остальная часть выделяется в виде теплоты. Очевидно, что обе эти составляющие отрицательно сказываются на техническом состоянии машины. При развитом искрении дуга с одной коллекторной пластины может переброситься на соседние пластины. В этом случае возникает эффект «кругового огня».

Таблица 7.1

Электрические машин магистральных тепловозов

Серия тепловоза	Электрическая машина			
	Генератор		ТЭД	
	Тип	Род тока	Тип	Род тока
2ТЭ10В	ГП311БУ2	постоянный	ЭД118А	постоянный
2ТЭ10Л			ЭД118БУ1	
3ТЭ10М			ЭД108АУ1	
ТЭП60			ЭД118А	
2ТЭ116	ГС501АУ2	переменный	ЭД121АУ1	постоянный
ТЭП70			ЭД900У1	
ТЭ120	A711У2		ЭД127У1	
ТЭП75	A713У2		ЭД126УХЛ1	постоянный
2ТЭ121	A714УХЛ			

Схема, изложенная на рис. 7.1, дает представление о наиболее типичных для эксплуатации дефектах ТЭД.



Рис. 7.1. Распространенные дефекты ТЭД

Определению неисправностей электрических машин локомотивов в эксплуатации посвящено множество работ. Среди их авторов ученые железнодорожных вузов страны Глущенко М.Д., Попов В.Н., Гиоев В.Г., Зеленчеко А.П. и многие другие. Вопросами исследования качества коммутации занимаются ученые и нашего университета. В настоящей главе пособия будут рассмотрены основные методы оценки состояния изоляции обмоток электрических машин и качества коммутации в коллекторных узлах. Первоочередное внимание уделено методам, позволяющим выявить изменение технического состояния элементов на ранних стадиях развития дефектов.

7.1. Физико-химические свойства изоляции и схемы ее замещения

Для понимания принципов контроля свойств изоляции в эксплуатации необходимы знания о природе процессов, протекающих в диэлектриках. Известно, что если к диэлектрику приложить высокое напряжение, то будет наблюдаться его нагрев. При небольших напряжениях нагрев практически незаметен. При переменном напряжении нагрев оказывается большим по сравнению с постоянным. Очевидно, что часть электрической энергии при нагреве необратимо преобразуется в тепловую – расходуется на нагрев. Эту электрическую мощность (теряемую на нагрев) называют диэлектрическими потерями. На практике обычно определяют не величину диэлектрических потерь, а связанное с ней значение угла диэлектрических потерь d или его тангенс ($\operatorname{tg}d$). Если бы в диэлектрике отсутствовали потери, то вектор тока I , возникающего при приложении напряжения U , был бы всегда направлен под углом 90° к вектору U (рис. 7.2, а).

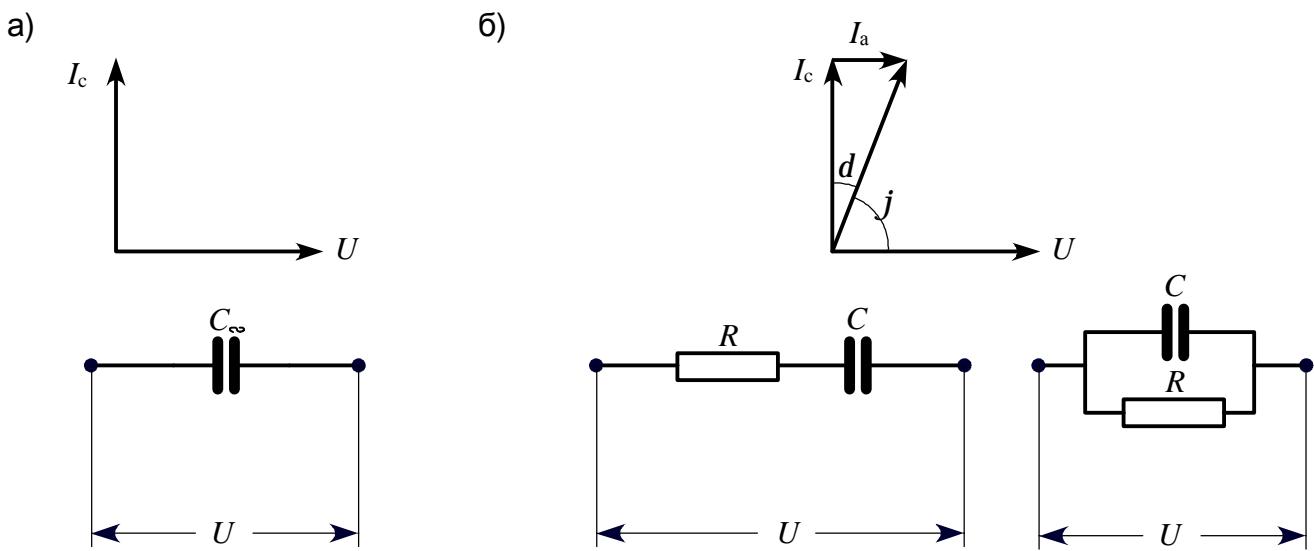


Рис. 7.2. Векторные диаграммы и схемы замещения: а – идеального диэлектрика; б – диэлектрика с потерями

В действительности из-за потерь, приводящих к протеканию активного тока I_a , совпадающего по фазе с напряжением, угол между векторами I и U будет всегда меньше 90° на величину d . Из геометрических соображений следует, что

$$\operatorname{tg}d = \frac{I_a}{I_c} \quad (7.1)$$

и углом диэлектрических потерь d называют угол, дополняющий до 90° фазный угол j (рис. 7.2, б). Как следует из вышесказанного, в случае с идеальным диэлектриком его можно рассматривать как конденсатор. Схема замещения такой изоляции показана на рис. 7.2, а. Индекс « ∞ » указывает на то, что активное сопротивление этого участка цепи бесконечно. Схемы замещения реальных диэлектриков (рис. 7.2, б) дополняют активным сопротивлением R , включенным последовательно или параллельно с емкостью C . Мощность диэлектрических потерь и угол диэлектрических потерь связаны равенством

$$P = w \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg}d, \quad (7.2)$$

где w – круговая частота.

Природа диэлектрических потерь кроется в эффекте поляризации – изменении свойств вещества, при котором его элементарный объем приобретает электрических момент. Возникновение электрического момента может происходить под действием электрического поля, механических на-

пряжений или самопроизвольно (спонтанно). Для целей настоящей главы интерес представляет первая причина поляризации. На рис. 7.3, а показана схема расположения зарядов молекул в отсутствие электрического поля. Центры тяжести положительных и отрицательных зарядов совпадают ($l = 0$), а значит электрический момент $M_s = q \cdot l$ такой молекулы будет равен нулю. В этом уравнении q – величина заряда. При приложении электрического поля с напряженностью E заряженные частицы смещаются: $l > 0$ и $M_s \neq 0$.

Необходимо отметить, что молекулы некоторых веществ обладают электрическим моментом и при отсутствии внешнего электрического поля. На рис. 7.4 приведены схемы строения молекул, поясняющие причину возникновения электрического момента у молекул полярных диэлектриков. Молекулы нейтральных (неполярных) молекул имеют симметричное строение, центры тяжести положительных и отрицательных зарядов совпадают. У диполей (полярных молекул) из-за асимметрии строения центры тяжести разноименных зарядов не совпадают. Примером неполярных диэлектриков, применяемых в качестве электроизоляционных материалов, являются углеводородные масла, полиэтилен, полистирол и др. К полярным диэлектрикам относятся фенолформальдегидные смолы, кремнийорганические соединения, хлорированные углеводороды и др.

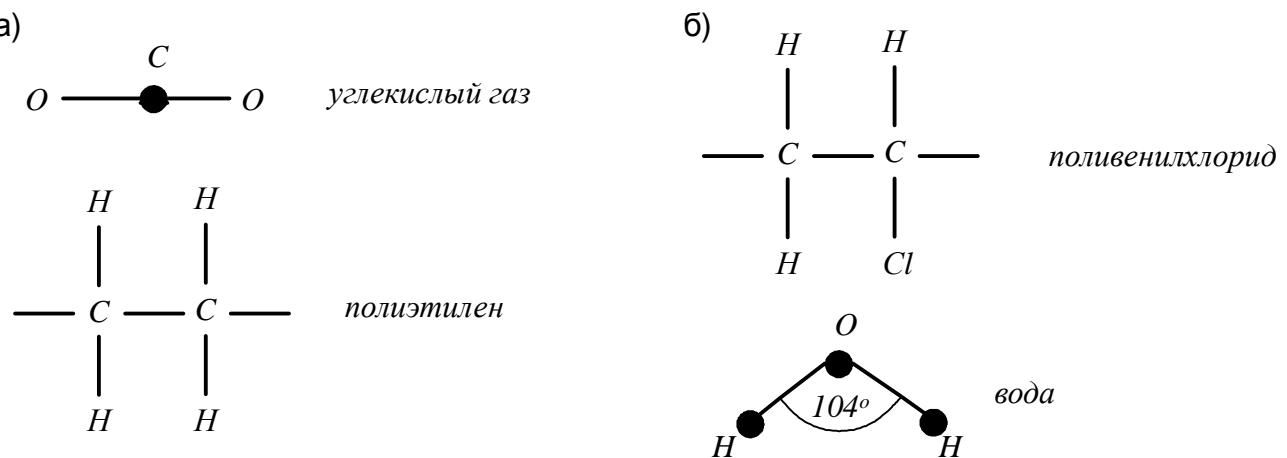


Рис. 7.4. Диэлектрики: а – неполярные; б – полярные

Наличие диэлектрических потерь приводит к протеканию тока поляризации $i_{\text{абс}}$ (рис. 7.2, б), который принято называть абсорбционным. Этот термин происходит от слова «абсорбция» (латинское *absorbo* погло-

щаю), которое в данном контексте означает поглощение, насыщение, впитывание материалом посторонних примесей, в первую очередь, влаги. С точки зрения диагностики удобнее классифицировать поляризацию не по физическому признаку (дипольная, ионная и т. д.), а по временному признаку на быструю (порядка миллисекунд) и медленную (порядка нескольких секунд и более). Протекание процесса поляризации во времени можно описать уравнением

$$i_{\text{абс}} = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (7.3)$$

где t – время от момента приложения напряжения U ; T – постоянная времени. Диэлектрические потери в изоляции могут изменяться в эксплуатации из-за увлажнения, появления микротрещин, проводящих примесей и т. п. При значительном ухудшении свойств изоляции возникают так называемые «сквозные» каналы проводимости. Поэтому в схеме замещения диэлектрика (рис. 7.2, б) следует добавить третью ветвь с сопротивлением R , характеризующим проводимость «сквозных» путей изоляции (рис. 7.5). Подводя итог вышесказанному выделим составляющие тока в схеме замещения изоляции от приложенного «толчком» напряжения U : ток i_c заряда емкости C_∞ (импульсно); абсорбционный ток $i_{\text{абс}}$; ток «сквозной» проводимости $i_{\text{пр}}$.

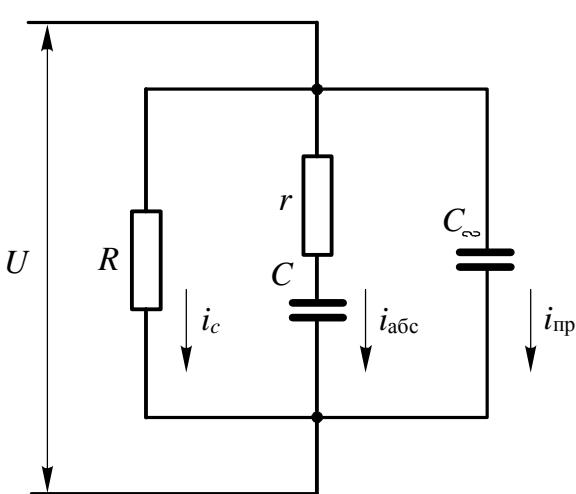


Рис. 7.5. Обобщенная схема замещения изоляции

Для контроля сопротивления применяются мегомметры. Принцип работы этих приборов (рис. 7.6) основан на измерении тока в измерительной цепи, состоящей из последовательно соединенных контролируемого сопротив-

7.2. Методы контроля изоляции

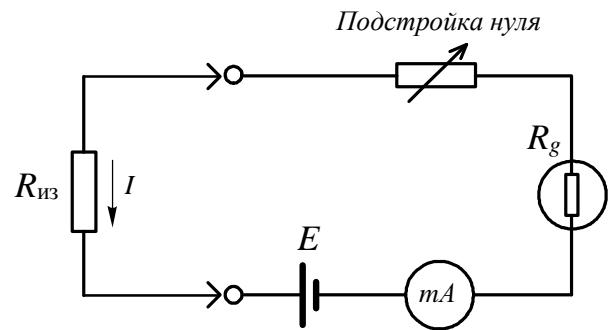
Для выявления возникающих в изоляции дефектов наибольшее распространение в локомотивных депо получили методы, основанные на измерении сопротивления изоляции и измерении тангенса диэлектрических потерь.

7.2.1. Контроль изоляции по ее сопротивлению – наиболее доступный, легко реализуемый в условиях депо метод оценки состояния изоляции.

ления (в нашем случае изоляции $R_{из}$), подстроечного резистора и источника тока с эдс E и сопротивлением R_g .

По значению тока I , протекающего в этой цепи, можно определить величину сопротивления $R_{из}$, так как

$$I = \frac{E}{R_{из} + R_g}. \quad (7.4)$$



Шкала миллиамперметра градуируется в величинах сопротивления (кОм, МОм и т. д.). Для измерения больших сопротивлений (десятки, сотни и более МОм) источник эдс, как следует из (7.4) должен иметь высокое напряжение для того, чтобы ток был различим миллиамперметром. В практике депо применяют мегомметры с напряжением постоянного тока от 500 В до 2500 В. Источником тока может быть маломощный генератор с ручным приводом или преобразователь сетевого переменного тока.

Рис. 7.6. Схема омметра

Как отмечалось выше (рис. 7.5), ток в изоляции имеет несколько составляющих, в том числе абсорбционную $i_{абс}$, связанную с диэлектрическими потерями. Величина тока $i_{абс}$ изменяется во времени по экспоненциальной зависимости (7.3). Поэтому диагностическим признаком является не только измеренное сопротивление изоляции (показания мегомметра), но и интервал времени от приложения U до момента считываия показаний по шкале прибора. Опытом установлено, что постоянная времени T в большинстве случаев меньше 1 мин. Это означает, что через промежуток времени около 1 мин после приложения напряжения U сопротивление изоляции R достигнет установившегося значения. Величина R определяет наличие сквозных проводящих путей в изоляции. Резкое падение R свидетельствует о значительном развитии дефекта. Обычно суждение об изоляции составляется на основании сравнения с заводскими данными или результатами предыдущих измерений R . Предельно допустимое значение составляет 1...1,5 МОм.

Оценить степень влажности изоляции можно по характеру изменения показаний мегомметра или, иными словами, по величине постоянной времени T . На рис. 7.7 в качестве примера показаны построенные с учетом уравнения (7.3) зависимости изменения сопротивления изоляции для разных значений T .

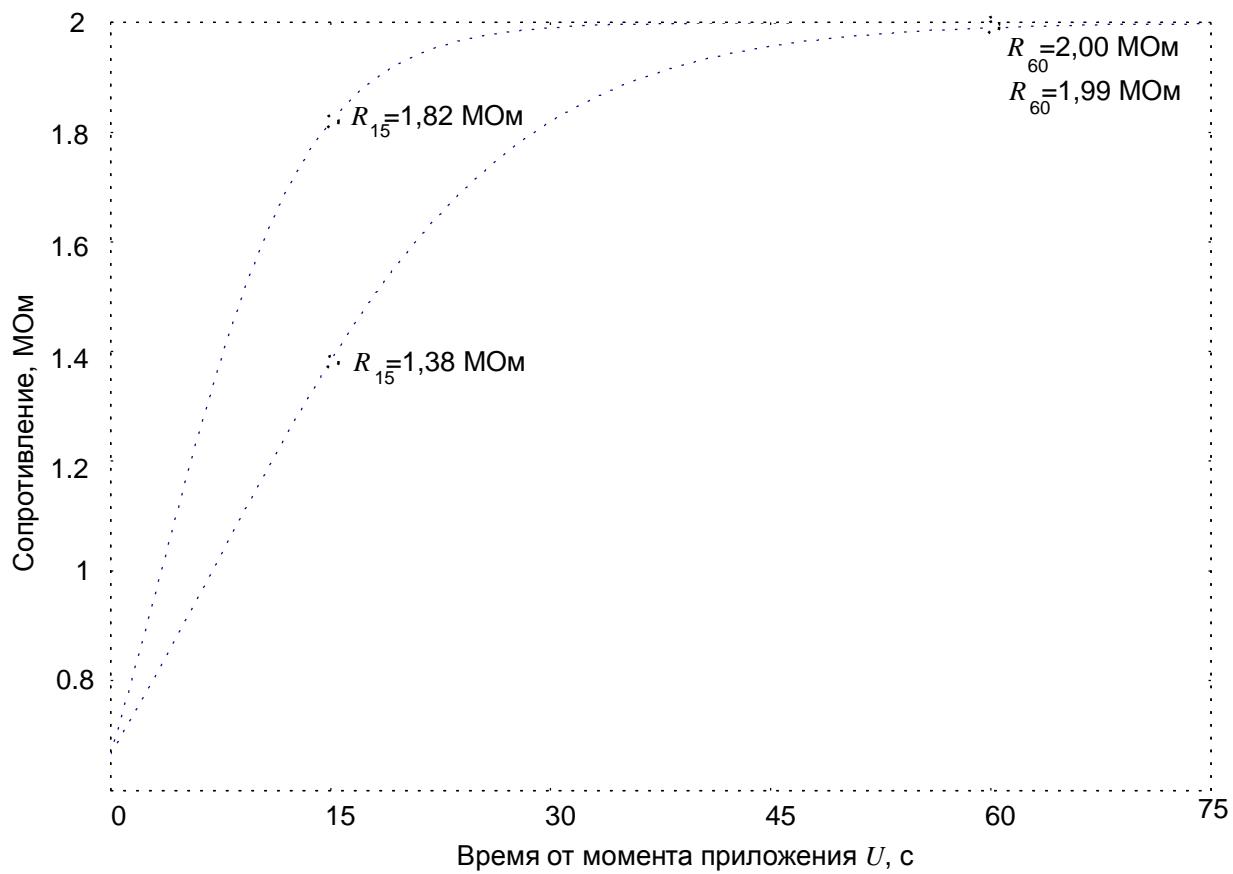


Рис. 7.7. Расчетные зависимости изменения сопротивления изоляции от времени измерения для различных значений постоянной времени T

На практике получение подобных зависимостей затруднено, поэтому о влажности изоляции принято судить по величине коэффициента абсорбции $K_{\text{абс}}$, который определяют как

$$K_{\text{абс}} = \frac{R_{60}}{R_{15}}, \quad (7.5)$$

где R_{60} , R_{15} – результаты измерений сопротивления изоляции через 60 и 15 секунд соответственно.

При хорошей и сухой изоляции коэффициент абсорбции $K_{\text{абс}}$ составляет 1,5...2, а при увлажненной приближается к единице. Наименьшим значением коэффициента абсорбции изоляции тяговых двигателей следует считать 1,1...1,2 (при температуре окружающего воздуха 20 ± 10 °С). Для определения величины $K_{\text{абс}}$ промышленность выпускает специальные приборы. Примером может служить мегомметр Ф4100. Он имеет выходное напряжение на разомкнутых зажимах 2500 ± 250 В и оснащен реле

времени и сигнальной лампой для снятия показаний с выдержкой времени 15 и 60 секунд.

7.2.2. Контроль изоляции по тангенсу диэлектрических потерь осуществляют с помощью специальных приборов, построенных на мостовой схеме Шеринга.

Мостовая схема Шеринга относится к классу мостов переменного тока. На показанной схеме (рис. 7.8) изоляция представлена эквивалентной схемой замещения из последовательно соединенных резистора $R_{из}$ и конденсатора $C_{из}$. Переменные сопротивления R_3 , R_4 и конденсатор C_4 являются подстроечными. При питании схемы током с круговой частотой w добиваются балансировки моста, т. е. выполнения условия $U_{вых} = 0$. При этом тангенс угла потерь вычисляется на основании уравнения

$$\operatorname{tg} d = w \cdot C_4 \cdot R_4 . \quad (7.6)$$

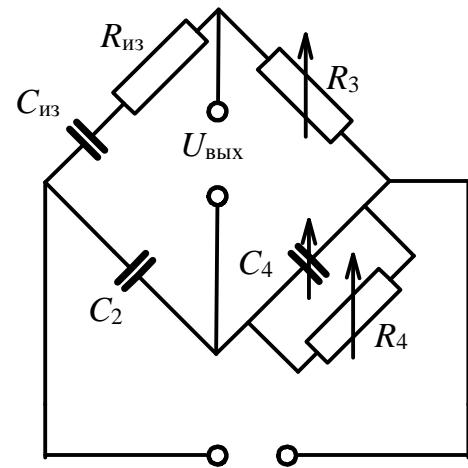


Рис. 7.8. Схема моста Шеринга

Наблюдая за величиной d в эксплуатации можно судить о состоянии изоляции и своевременно обнаружить ухудшение изоляционных свойств. К недостаткам метода следует отнести низкую помехозащищенность и сложность автоматизации процесса балансировки мостовой схемы по трем регулируемым параметрам: R_3 , R_4 , C_4 .

7.3. Методы контроля искрения в коллекторных машинах

ГОСТ 1873-74 рекомендует оценивать искрение визуально (на глаз) по шкале, представленной на рис. 7.9.

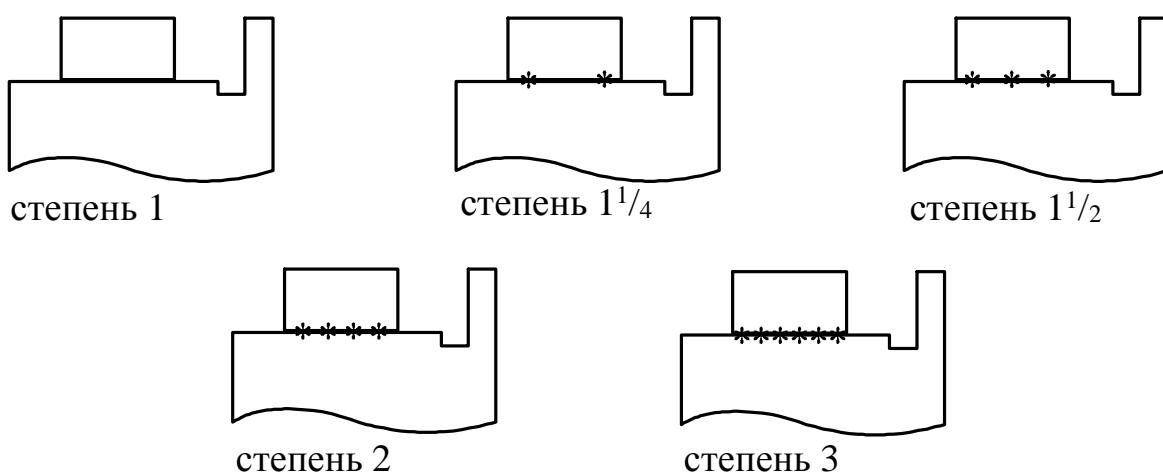


Рис. 7.9. Шкала искрения

Искрение считается допустимым, если не превышает 1½.

Существуют и приборные методы измерения степени искрения.

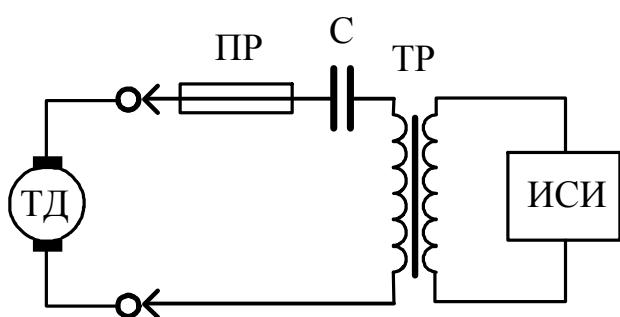


Рис. 7.10. Схема подключения устройства А-1939 к ТЭД

доохранитель ПР, разделительный конденсатор С, повышающий трансформатор ТР и контакторы (не показаны). Благодаря разделительному конденсатору С в первичной обмотке ТР протекает только переменный ток. Во вторичной обмотке повышающего трансформатора наводится эдс с более высоким по амплитуде напряжением, чем в первичной. В ИСИ применен полосовой фильтр с полосой пропускания 15...75 кГц для подавления сигналов от зубцовых пульсаций и пульсаций других частот, не связанных с процессом коммутации. Переменное напряжение в ИСИ выпрямляется и регистрируется по величине тока, протекающего через нагрузочный резистор.

Одним из недостатков метода является необходимость градуировки ИСИ конкретно для каждого типа двигателя и режима испытаний.

Наряду с косвенными методами оценки искрения в наиболее ответственных случаях, например, при контроле искрения машин большой мощности (тяговых генераторов постоянного тока) оправдано применение методов, требующих установки специальных датчиков на щеточно-коллекторные узлы. При этом на сегодняшний день нашли ограниченное применение устройства, регистрирующие видимое и инфракрасное излучение под щеткой, изменение магнитного поля электрической емкости в зоне коммутации. Значительный интерес для практической реализации в перспективе представляют методы регистрации тока разрыва, протекающего через коротко-замкнутый контур, образованный каналом коммутационной дуги и элементами электрической машины (секции, щетки, коллекторные пластины и петушки коллектора). Специалистами ДВГУПС и ДИАВЭЛ (г. Хабаровск) разработан способ оценки искрения, технические средства контроля тока разрыва коммутируемых с искрением секций. Прибор, получивший название ИМИ-3 в комплексе с датчиками и другими устройствами (рис. 7.11) позволяет оперативно оценивать искрение не по условным величинам, а в единицах системы СИ (A^2 сек) – величине, характеризующей теплоту Джоуля (тепловое действие тока разрыва).

ВНИИЖТ и ПКБ ЦТ разработали устройство А-1939 для оценки искрения, которое основано на измерении переменной составляющей на выводах тягового двигателя. Это напряжение практически пропорционально степени искрения под щетками. Принципиально (рис. 7.10) устройство состоит из низковольтной части – индикатора искрения (ИСИ) и высоковольтной части, включающей пре-

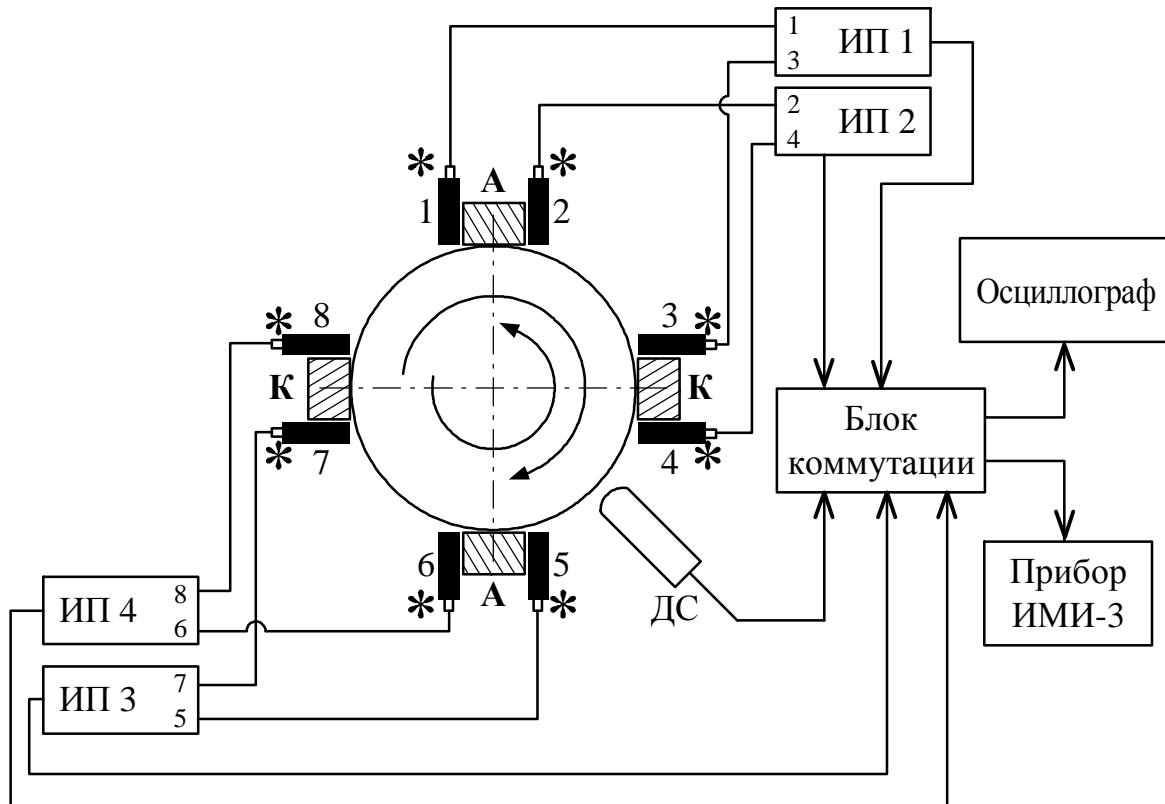


Рис. 7.11. Функциональная схема установки для контроля коммутации ТЭД:
1...8 – магниточувствительные элементы; ИП1...ИП4 – измерительные преобразователи; А, К – анодные и катодные щетки; ДС – фотодатчик синхронизации

Магниточувствительные элементы выполнены на основе бесконтактных индукционных датчиков и устанавливаются на держателе щетки попарно со стороны набегающей и сбегающей коллекторных пластин. Использование датчика синхронизации позволяет точно обнаружить место возникновения искрения.

Среди факторов, влияющих на процесс искрения, значительное место отводится точности установки щеток на геометрической нейтрали с помощью поворотной траверсы. Отклонения в точности установки приводят к повышенному износу щеток и коллекторов, что в свою очередь вызывает возникновение повышенного искрения и круговых огней. Экспериментально установлено, что смещение траверсы на 5 мм в часовом режиме работы ТЭД приводит к увеличению степени искрения на 1 балл по шкале искрения (рис. 7.9), а при смещении траверсы на 10 мм наблюдается изменение тока двигателя более чем на 20 %. Поэтому при периодическом обслуживании ТЭД необходимо добиваться как можно более точной установки щеток. Практически это возможно несколькими способами. При одном способе ТЭД работает в режиме генератора на холостом ходу. Нейтральное положение щеток определяется по максимальному напряжению на коллекторе. При другом способе ТЭД работает на холостом ходу в режиме двигателя. Изменяя полярность напряжения питания, кон-

тролируют частоту вращения вала ТЭД. Считается, что щетки установлены на нейтрали, если при реверсировании двигателя установившаяся частота вращения не изменяется.

Значительный интерес для эксплуатации представляют методы, позволяющие проводить точное позиционирование щеток на неработающем двигателе. С этой целью во ВНИИЖТ и ПКБ ЦТ разработано специальное переносное устройство А-1938 (рис. 7.12), принцип работы которого основан на наличии трансформаторной связи между обмотками главных полюсов и якоря.

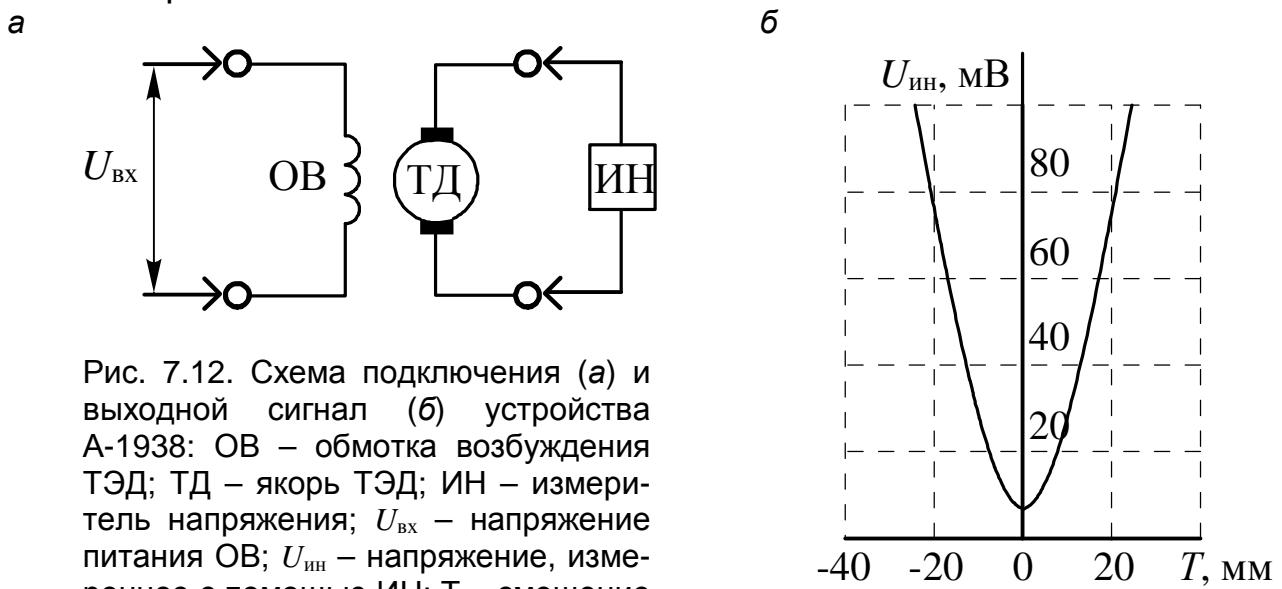


Рис. 7.12. Схема подключения (а) и выходной сигнал (б) устройства А-1938: ОВ – обмотка возбуждения ТЭД; ТД – якорь ТЭД; ИН – измеритель напряжения; $U_{\text{вх}}$ – напряжение питания ОВ; $U_{\text{ин}}$ – напряжение, измеренное с помощью ИН; T – смещение щетки от нейтрального положения

С помощью данного устройства к обмоткам возбуждения ТЭД подводится переменное напряжение $U_{\text{вх}}$ такой величины, чтобы ток в обмотке главных полюсов составлял несколько ампер. Благодаря наличию трансформаторной связи в обмотках якоря ТЭД наводится слабая ЭДС, усиливаемая в измерителе напряжения и регистрируемая с помощью встроенного стрелочного указателя. На рис. 7.12, б показано изменение показаний прибора $U_{\text{ин}}$ в зависимости от смещения T щетки от нейтрального положения. Видно, что минимум эдс ($U_{\text{ин}}$) приходится точно на нейтраль. Значения $U_{\text{ин}}$ могут незначительно меняться для различных типов двигателей, но характер изменения одинаков для всех.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение современных методов и средств технической диагностики в повседневной практике локомотивных депо позволяет решить ряд важнейших задач. Прежде всего, предотвратить серьезные отказы техники, приводящие к нарушениям. Так, например, своевременно не обнаруженные дефекты колесо-моторного блока локомотива могут привести к поломке механизмов, падению их элементов на ж.-д. путь и как следствие, – его повреждения, приводящие не только к значительным материальным затратам, но и представляющие угрозу для жизни и здоровья человека. Именно поэтому во всех локомотивных депо нашей страны этот узел локомотива периодически проверяют, используя средства вибродиагностики.

Неисправности силовой установки тепловоза (дизеля и тягового генератора) существенно снижают ее экономичность и так же представляют опасность для окружающей живой природы. Ведь любая неисправность дизеля сопровождается некачественным сгоранием топлива в его цилиндрах, а значит и повышенным содержанием вредных веществ в отработавших газах. Значительные материальные затраты депо на приобретение топлива оказываются в этих случаях напрасными.

При правильной организации диагностических работ на предприятии можно не только снизить вероятность аварийных отказов и прямых затрат на эксплуатацию локомотивов, но и рационально организовать их ремонт, оптимизировать покупку запасных частей и решить ряд других задач, о которых шла речь в первом разделе настоящего пособия. Хорошо спроектированная и организованная система технической диагностики является основой для перехода от существующей (планово-предупредительной) системы ремонта к прогрессивной системе – по фактическому состоянию локомотива.

Современные аппаратурные средства диагностики выполняют значительную работу по измерению диагностических сигналов, их обработке и интерпретации. Вместе с тем человек не должен быть просто «приложением» к этим средствам. Опыт внедрения диагностических комплексов на предприятиях различных сфер деятельности, в том числе и в локомотивных депо, показывает: успех этих мероприятий зависит в большей мере от обслуживающего персонала, а точнее от его ответственности, желания и знаний. Автор надеется, что настоящее пособие было полезным вам при изучении основополагающих идей методов диагностики, нашедших применение в локомотивных (тепловозных) депо страны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сапожников, В. В. Основы технической диагностики [Текст] : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М. : Маршрут, 2004. – 318 с.
2. Зеленченко, А. П. Основы диагностики подшипников качения электрического подвижного состава [Текст] : учеб. пособие / А. П. Зеленченко, Н. В. Орехова, Д. В. Федорова. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2001. – 29 с.
3. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации [Текст] / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – СПб. : Изд. центр СПбГМТУ, 2000. – 169 с.
4. Бервинов, В. И. Техническое диагностирование локомотивов [Текст] : учеб. пособие / В. И. Бервинов. – М. : УМК МПС России. 1998. – 190 с.
5. Тепловозные двигатели внутреннего сгорания [Текст] : учеб. для вузов / А. Э. Симсон [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М., 1987. – 536 с.
6. Ждановский, Н. С. Диагностика автотракторных двигателей [Текст] / Н. С. Ждановский, В. А. Улитовский, В. А. Аллилуев. – Л., 1977. – 264 с.
7. Подшивалов, А. Б. Диагностирование локомотивов [Текст] / А. Б. Подшивалов // Локомотив. – 1977. – № 6. – С. 27–29.
8. Зеленченко, А. П. Устройства диагностики тяговых двигателей электрического подвижного состава [Текст] : учеб. пособие / А. П. Зеленченко. – М. : УМК МПС России, 2002. – 37 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ЗАДАЧИ И ТЕРМИНОЛОГИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	5
1.1. Задачи технической диагностики.....	5
1.2. Основной принцип диагностики	6
1.3. Основные термины и определения дисциплины	7
1.4. Классификация диагностических систем.....	8
Контрольное задание № 1.....	10
2. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ТЕСТЫ.....	12
2.1. Анализ функциональной модели объекта	13
2.2. Анализ граф-моделей	17
Контрольное задание № 2.....	21
3. ОСНОВЫ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ	22
3.1. Гармонические колебания.....	23
3.1.1. Варианты представления колебаний.....	23
3.1.2. Сложение гармонических колебаний.....	24
3.1.3. Гармонический анализ	25
3.1.4. Дискретные методы гармонического анализа	26
3.1.5. Затухающие колебания.....	30
3.2. Оборудование для измерения вибрационных сигналов.....	31
3.3. Вибродиагностика анализом временных характеристик.....	34
3.3.1. Количественные методы оценки временных характеристик...	34
3.3.2. Оценка фазовых характеристик и формы сигнала вибрации...	36
3.4. Методы спектрального анализа в вибродиагностике	39
3.4.1. Метод прямого спектра	39
3.4.2. Особенности метода «спектр огибающей»	40
3.4.3. Диагностика подшипников качения	41
3.4.3.1. Диагностическая модель подшипников качения	41
3.4.3.2. Примеры определения неисправностей ПК	43
3.4.3.3. Сводные правила идентификации неисправностей ПК ..	46
Контрольное задание № 3.....	47
4. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЕЙ	49
4.1. Обзор методов диагностики ТА	49
4.1.1. Вибрационный метод диагностики ТА	49
4.1.2. Диагностика ТА по ходу иглы форсунки	50
4.1.3. Диагностика ТА по диаграмме давления.....	51
4.2. Примеры выявления неисправностей ТА	
по диаграмме давления в ТВД	53
4.2.1. Влияние цикловой подачи топлива	53
4.2.2. Влияние усилия затяжки пружины форсунки	55
4.2.3. Снижение плотности распылителя форсунки	56
4.2.4. Влияние неплотности плунжерной пары	57

4.2.5. Влияние герметичности нагнетательного клапана насоса	58
4.2.6. Влияние серьезных повреждений форсунки	59
4.2.7. Определение угла опережения подачи топлива.....	61
Контрольное задание № 4	61
5. ДИАГНОСТИКА ДИЗЕЛЯ АНАЛИЗОМ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА	63
5.1. Параметры, характеризующие рабочий процесс и оборудование для их измерения.....	63
5.2 Диагностические параметры рабочего процесса	68
5.3. Методы диагностики дизеля по индикаторной диаграмме	69
5.3.1. Параметрический метод идентификации неисправностей	69
5.3.2. Методы графического сравнения диаграмм.....	71
Контрольное задание № 5	73
6. ДИАГНОСТИКА МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ПО СОСТАВУ СМАЗКИ	75
6.1. Методы и средства определения элементов износа	75
6.2. Состав картерного масла как диагностический показатель	80
6.3. Методика определения скорости изнашивания деталей двигателя ..	82
7. ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЕПЛОВОЗА	84
7.1. Физико-химические свойства изоляции и схемы ее замещения....	85
7.2. Методы контроля изоляции.....	88
7.2.1. Контроль изоляции по ее сопротивлению	88
7.2.2. Контроль изоляции по тангенсу диэлектрических потерь	91
7.3. Методы контроля искрения в коллекторных машинах	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	96

Учебное издание

Коньков Алексей Юрьевич

ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛОКОМОТИВОВ

Учебное пособие

Редактор Г.Ф. Иванова
Технический редактор С.С. Заикина

План 2007 г. Поз. 1.8.

Сдано в набор 25.12.2006 г. Подписано в печать 19.03.2007 г.
Формат 60×84¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Гарнитура «Arial». Печать RISO.
Усл. изд. л. 3,8. Усл. печ. л. 5,8. Зак. 78. Тираж 120 экз. Цена 72 руб.

Издательство ДВГУПС
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

