

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Саратовский государственный аграрный университет
имени Н.И. Вавилова»**

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Краткий курс лекций

для студентов 2 курса

Направление подготовки
35.04.06 Агроинженерия

Профиль подготовки
Электрооборудование и электротехнологии

Саратов 2015

УДК 54
ББК 24
Б19

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерная физика,
электрооборудование и электротехнологии»
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет»
Г. П. Ерошенко

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных
предприятий»
ФГБОУ ВО «Саратовского государственного технического университета
имени Гагарина Ю. А.»
Г. Г. Угаров

Б19 Современные способы диагностирования электроустановок: краткий курс лекций для студентов 2 курса направления подготовки 35.04.06 «Агроинженерия» / С. М. Бакиров // ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2015. – 77 с.

ISBN ...

Краткий курс лекций по дисциплине «Современные способы диагностирования электроустановок» составлен в соответствии с программой дисциплины и предназначен для студентов направления подготовки 35.04.06 «Агроинженерия». Краткий курс лекций содержит теоретический материал по основным вопросам диагностирования. В пособии указаны основные определения, положения и организация диагностирования электрооборудования. Указаны сведения о приборах и приведены методики работы с ними. Также рассмотрены примеры дефектов и их появление в зависимости от условий эксплуатации, описаны составы и основные методики выполнения испытаний. Материал ориентирован на вопросы профессиональной компетенции будущих специалистов сельского хозяйства.

УДК 621.631
ББК 32

ISBN ...

© Бакиров С. М., 2015
© ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2016

Введение

Деятельность производств направлена на удовлетворение потребностей общества. Главной целью предприятий является получение прибыли. Как правило, использование прибыли дает возможность дальнейшего развития. Сельскохозяйственные предприятия развиваются разносторонне и, в целом, это направлено на расширение производства, повышение производительности труда, которое сопровождается внедрением новой техники, нового оборудования. Вслед за этим явлением стремительно развиваются технологии по организации, ведению и обслуживанию нового производства. Оценить уровень развития однозначно возможно в случае, когда на предприятии помимо основного производства развиваются вспомогательные зоны производства. Известно, что одним из главных вспомогательных звеньев является техническая эксплуатация установленного оборудования.

Уровень технической эксплуатации можно оценить по техническим признакам: оснащенность ремонтной базы, квалификацией персонала и т.п., а также по экономическим признакам. Однако основным критерием оценки является выполнение цели эксплуатации.

Целью технической эксплуатацией электрооборудования является повышение эффективности производства за счет надежного, бесперебойного функционирования технологических процессов. Под эффективностью стоит понимать разность между доходами и расходами предприятия. При этом в расходы предприятия входят множество составляющих по себестоимости продукции, в том числе, затраты на содержание энергетической службы и потери от остановок (отказов) технологических процессов из-за неисправностей оборудования. Такие потери называются ущербом. Роль энергетической службы сократить ущерб предприятия до минимального значения. Тогда целесообразность содержания службы выражается в сравнении эксплуатационных затрат с ущербом. Доказано, если эксплуатационные затраты вдвое ниже ущерба, то целесообразно содержать энергетическую службу, в противном случае – нет.

Самым затруднительным расчетом в таком сравнении вызывает расчет ущерба, так как помимо основных составляющих он имеет косвенные составляющие, которые изменяются со временем (мгновенно), например, курс валют. Однако приблизительное значение ущерба можно подсчитать по известным выражениям, указанных в [4].

Относительно точным расчетом являются эксплуатационные затраты, которыми можно управлять и планировать. Они зависят от способа выполнения технической эксплуатации.

Выполнение технической эксплуатации осуществляется по трем способам: послеотказовый (обслуживание по необходимости), планово-предупредительный (обслуживание в строго назначенное время в соответствии со структурой ремонтного цикла) и послеосмотровый (обслуживание по состоянию, которое определяется по результатам диагностики). Выбирая и рассчитывая по [1,15,19] способ эксплуатации учитывается множество факторов. Самым прогрессивным является послеосмотровый. Это объясняется по двум причинам. Во-первых, выполнение профилактических работ устанавливается по результатам диагностики, то есть по изменениям параметров электрооборудования в зависимости от индивидуальных особенностей технологического процесса (наличие и чувствительность биологического звена, режим работы, условия окружающей среды, степень автоматизации, мощность,

производительность и т.п.). Во вторых, обеспечивается высокая надежность работы технологического процесса, которая исключает случайный отказ, остановку или простой оборудования. Это объясняется тем, что обслуживание, ремонт или замена выполняются до предельного состояния, которое может повлечь за собой остановку всего процесса. Предельным состоянием эксплуатации называется состояние, при котором дальнейшая эксплуатация не безопасна или экономически нецелесообразна. Техническое предельное состояние – один или несколько параметров работоспособности электрооборудования достигают критического значения.

Послеосмотровый (диагностический) способ предусматривает диагностирование оборудования. В данном учебном пособии приведены материалы по организации и выполнению диагностических работ. Описаны основные понятия и определения, предложена методика диагностирования параметров электрооборудования и рассмотрены основные дефекты электрооборудования сельскохозяйственных предприятий.

Материалы пособия могут быть полезными для студентов магистратуры и бакалавриата направлений подготовки «Агроинженерия», «Теплоэнергетика и теплотехника», инженеров энергетических служб, специалистов по диагностированию электрооборудования, а также в качестве методического материала для аспирантов технических направлений исследования.

Лекция 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В инженерной деятельности очень важное значение имеют количественные оценки, которые дают возможность более полно понять тот или иной процесс. Это представляется в виде измерений. А совокупность мер, методов, средств и измерений образует диагностику.

Обществу более известно понятие медицинская диагностика, которая необходима для выявления фактического состояния здоровья человека или его отдельных органов. По данным медицинской диагностики врач назначает лечение. Таким способом, осуществляется, так называемая, эксплуатация организма. Эта взаимосвязь прослеживается в технической диагностики, где объектом исследования является оборудование. Рассмотрим основные понятия и определения технической диагностики.

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

Целью технической диагностики (ТД) является повышение энергетической эффективности производства за счет качественного и своевременного обслуживания оборудования по результатам диагностирования.

Как известно, диагностирование это составная часть технической эксплуатации, объектом которой является система И-Э-Т-С [1] (источник электрической энергии, электрооборудование, технологический процесс и служба эксплуатации). Рассмотрим объект изучения ТД на основе системы И-Э-Т-С (рис. 1.1).

В объект изучения технической диагностики электрооборудования входит несколько составляющих:

- электрооборудование как объект измерений и испытаний. На сельскохозяйственных предприятиях используется десятки видов оборудования, отличающихся конструкцией, принципом действия, габаритами и т.п. Каждому типу оборудования соответствует индивидуальный набор измерительных приборов и методик испытаний;

- персонал по диагностированию, который получает право на проведение испытаний и измерений с отметкой в удостоверении (группа по электробезопасности работ в электроустановках). Персонал имеет особое значение в проведении диагностики, так как от их работы зависит достоверность и качество измерений, исправность приборов, соблюдение технических процедур и т.п.;

- средства измерений, точность измерения которых зависит от множества факторов (класс точности, периодичность проверок, условия хранения и использования, температура и влажность содержания и т.п.);

- прогнозирование состояния по результатам диагностики включает в себя анализ изменения параметров в реальных условиях производственной эксплуатации при действительных результатах измерения;

- профилактические мероприятия, разработанные по результатам диагностики, на основе прогнозирования состояния.

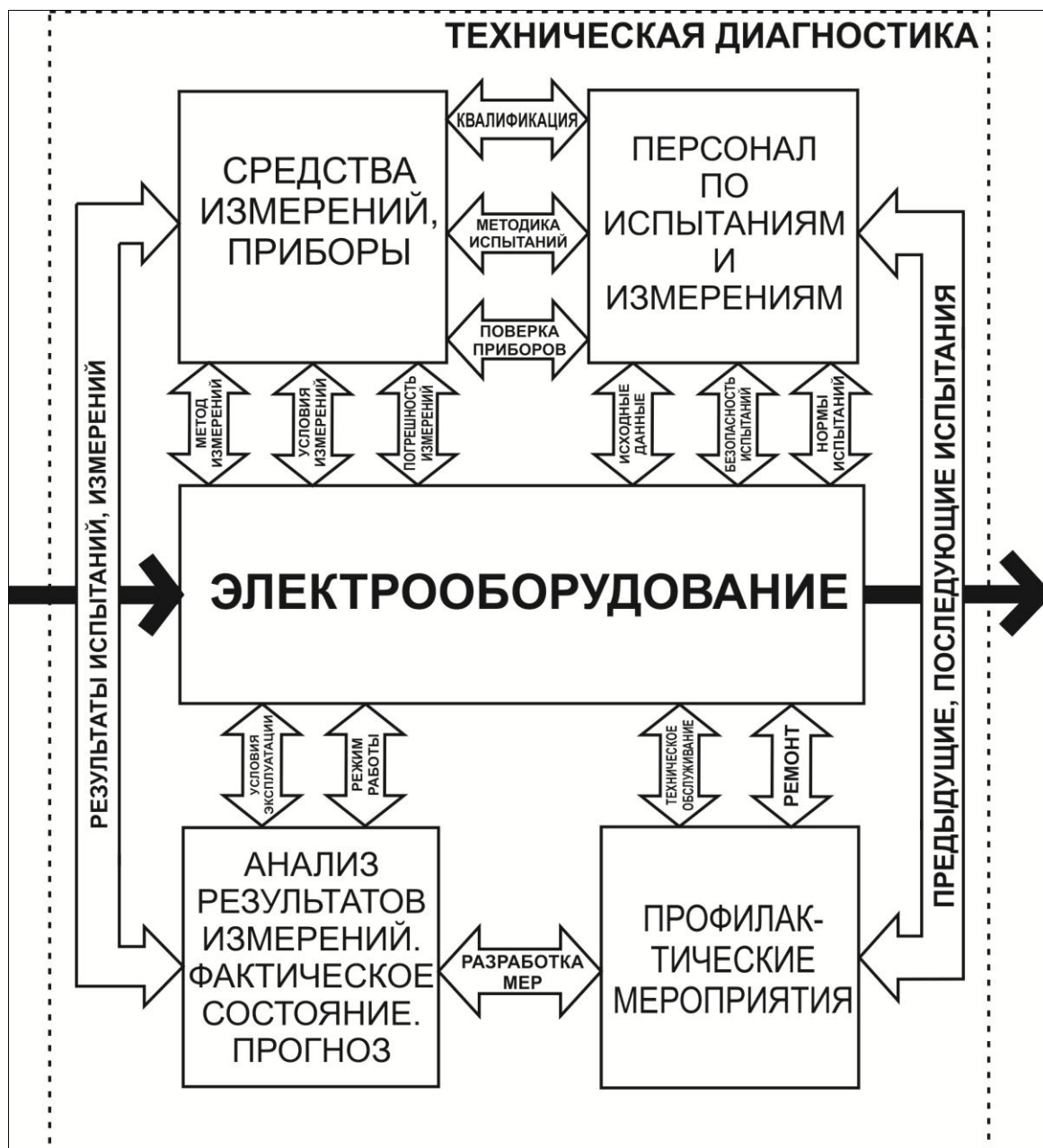


Рис. 1.1. Объект изучения технической диагностики

Применение диагностики позволяет решить ряд экономических и технологических задач в производственной деятельности, а именно:

- снизить эксплуатационные расходы за счет уменьшения трудоемкости и времени ремонта оборудования;
- избежать аварий, благодаря своевременному выявлению дефектов;
- увеличить долговечность оборудования при устранении дефектов на ранних стадиях их появления;
- оптимизировать количество запасных деталей за счет прогнозирования отказов.

1.1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В диагностике, как и в любой другой науке, есть слова ее выражающие.

Диагноз – это оценка фактического состояния объекта по его измеренным параметрам. Для адекватной оценки состояния не всегда достаточно проводить одно измерение. Как правило, измерение одного и того же параметра дает более полную оценку, действительного значения измеряемой величины.

Физическая величина – свойство материального объекта (процесса, явления, оборудования), качественно общее множеству объектов, но количественно индивидуальное для каждого из них. Как известно, величина – это свойство, которое может увеличиваться и уменьшаться. Поэтому размер (значение) физической величины принимается относительно какой-либо единицы измерения и оценивает количественную определенность.

В диагностике количественная определенность физической величины делится на два рода:

- истинное значение – значение, которое идеальным образом отражает отношение величины в реальных условиях;

- приближенное значение – значение, которое близко к истинному и определяется в результате измерения физической величины.

Параметр – физическая величина, характеризующая частную особенность измеряемой величины. В технической эксплуатации часто используется понятие параметр. Например, параметры у электродвигателя: высоты спинки статора, номинальный ток, номинальное напряжение – а, в свою очередь, параметры переменного напряжения: амплитудное значение, частота колебания и т.п.

Оценка параметра осуществляется по его значению, то есть по количеству его единиц измерения. **Единицей измерения** называется физическая величина фиксированного размера, условно принятая для сравнения с ней однородных величин, которой присваивается числовое значение равное 1 (единице). Например, 1 м – единица измерения длины. Однако существует несколько единиц измерения длины – фут, дюйм, аршин. Использование таких единиц различными странами, привело к тому, что развитие науки и техники сталкивалось с проблемами перевода одних единиц в другие и наоборот. В результате было принято решение создать международную систему единиц СИ.

1.2. ПОЛОЖЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ

Некоторые понятия ТД 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.

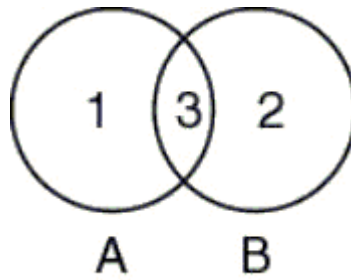


Рис. 1.2. Соотношение понятий «неисправность» и «работоспособность»

На этом рисунке кругу А соответствует множество неисправных систем, кругу 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 пользоваться 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.

Вопросы для самоконтроля:

1. Каковы основные задачи технической диагностики?
2. Каковы основные виды технического состояния электрооборудования?
3. Что является предметом технической диагностики?
4. Почему важно учитывать скорость развития дефектов?
5. В чем заключается новая стратегия технического обслуживания?
6. На какие группы можно разбить повреждения оборудования?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учебник для вузов-М: Издательский дом МЭИ, 2009- 632с.
2. Попков О. З. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов-М.: Издательство МЭИ, 2005.-200 с.:ил.

Дополнительная

1. Косенков П.В. Электроснабжение и электробезопасность в вопросах и ответах. – М: МИЭЭ, 2015г.
2. Косенков П.В., Черемисин В.В. Учебная программа и перечень вопросов для подготовки электротехнического персонала к проверке знаний норм и правил работы в электроустановках. – М: МИЭЭ, 2015г.

Лекция 2.

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. 2.1. 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, удастся 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 2.1

№ 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

Задача 1.

При диагностических испытаниях дизеля TOYOTA-2С установлено, что фактический угол опережения подачи топлива насосом, составляет φ_{ϕ} (табл. 2.2). 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 2.2

№ варианта (последняя цифра шифра)	Фактическая частота вращения n_{ϕ} , мин^{-1}	Фактический угол опережения подачи топлива φ_{ϕ} , ° 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:

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

Вопросы для самоконтроля:

1. Чем определяется достоверность метода диагностики?
2. Какие существуют направления обеспечения необходимой точности измерений в условиях помех?
3. Какова структура и содержание двухступенчатых профилактических испытаний?

4. Как осуществляется оценка состояния трансформатора при функциональной диагностике?

5. Каковы приемы диагностики?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Белов Н.В. Методическое пособие "Промышленная электроника ч.2. Силовая электроника». М.: Изд. МИЭЭ, 2014-118с.

2. Белов Н.В. Виртуальная лаборатория электротехники и электроники: Учебно-метод. пособие по использованию программы моделирования электрических и электронных устройств "Electronics Workbench 5.12". М. : МИЭЭ, 2006.

Дополнительная

1. Косенков П.В. Справочные материалы для ответственных за электрохозяйство организаций. – М: МИЭЭ, 2015г.

2. Степанов Б.М. Методические рекомендации по проведению инструктажей электротехнического персонала и обзор несчастных случаев на энергоустановках. – М: МИЭЭ, 2010г.

Лекция 3.

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 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.

Локализирующий тест – тест, выполняемый для местонахождения неисправности объекта.

Диагностический тест – тест, выполняющий функцию проверяющего и локализирующего 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.

3.1. 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 несовместимых состояний: работоспособном или

неработоспособном. В работоспособном состоянии элемент должным образом реагирует на некоторое внешнее воздействие, в противном случае элемент неработоспособен.

Наиболее наглядное представление такой диагностической модели может быть выполнено графически. Для простоты изучения на рис. 3.1 техническая система представлена пятью элементами (показаны прямоугольниками).

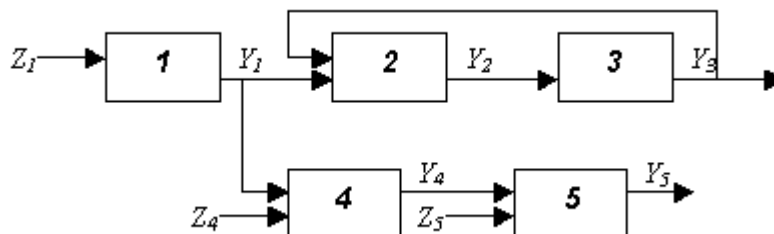


Рис. 3.1. Схема объекта диагностики

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). 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 π^i проверку реакции i -го элемента. Если реакция допустима, то $\pi^i = 1$, в противном случае $\pi^i = 0$.

Заполним таблицу неисправностей (табл. 3.1)

Таблица 3.1

Таблица неисправностей к рис. 3.1

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 $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5\}$. По значению вектора Π можно однозначно 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.

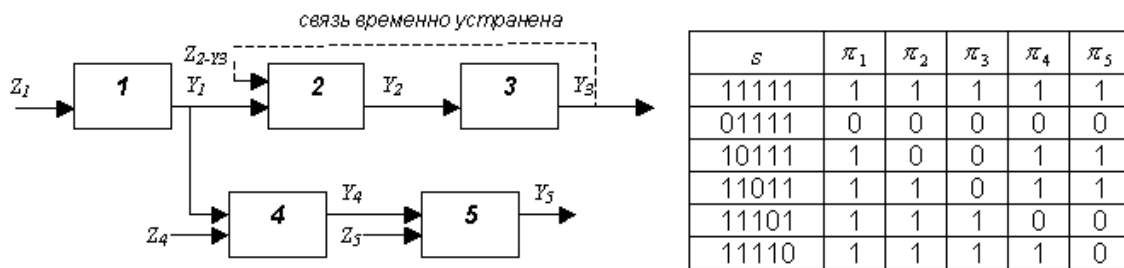


Рис. 3.2. Устранение неразличимой ситуации

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} .

Как видно (рис. 3.2), 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. 3.1 и 3.2 можно прийти к выводу, что как для оценки работоспособности объекта в целом, так и для локализации неисправностей, число элементарных проверок 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.

Вопросы для самоконтроля:

1. Как различаются трансформаторы по назначению?
2. каковы основные элементы конструкции силовых трансформаторов?
3. С какой целью у трансформаторов мощностью 1000 кВА и более устанавливают газовое реле?
4. Какими способами выполняют крепление вводов на крышке или стенке бака трансформаторов?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Попков О. З. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов-М.: Издательство МЭИ, 2005.-200 с.

Дополнительная

1. Аванесов В М., Ерохин С.В. Основы электробезопасности в организациях и на предприятиях.- М: МИЭЭ, 2015.

Лекция 4.

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 указывают, 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.

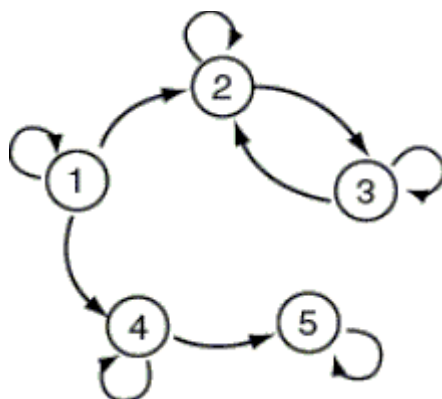


Рис. 4.1. Граф системы

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. $b_{ij} = 1$, если $i = j$.

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

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| \end{matrix}.$$

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:

$$B_0 = B,$$

$$B_k = (B_{k-1} \otimes B_{k-1}) \oplus B_{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots$$

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 и есть матрица путей этого графа: $B_k = D$.

Матрица путей графа, заданного 1 матрицей, имеет вид:

$$D = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| \end{matrix}.$$

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. 3.1).

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. 4.2)

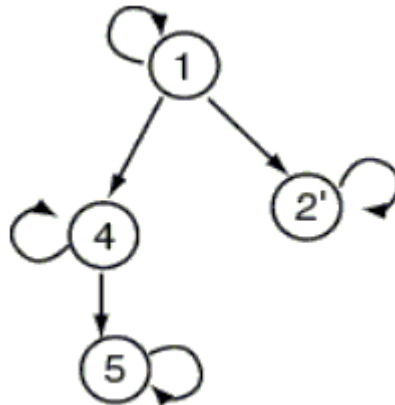


Рис. 4.2. Приведенный граф

Матрица путей приведенного графа будет иметь вид:

$$D' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2' & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2' \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \left\| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\| \end{matrix}.$$

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 π_2 , либо проверку π_3 , так как новой вершине 2' может быть приписана любая из этих проверок.

При построении минимальных локализирующих 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 локализирующим тестом является $T_{л} = \{2', 4\}$. Действительно:

после вычеркивания 1 столбца получаем матрицу

$$D' = \begin{matrix} & & 2' & 4 & 5 \\ \begin{matrix} 1 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| \end{matrix},$$

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

$$D' = \begin{matrix} & & 2' & 4 \\ \begin{matrix} 1 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{matrix} \right\| \end{matrix},$$

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

$$D' = \begin{matrix} & 1 & 4 & 5 \\ \begin{matrix} 1 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| \end{matrix}$$

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 локализирующих 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 локализирующий тест. Если в графе одна вершина типа «выход», – то она обязательно должна войти в локализирующий тест.

Как отмечалось выше, минимальный диагностический тест может быть получен объединением минимальных проверочных и локализирующих 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.

Вопросы для самоконтроля:

1. Для чего на мощные трансформаторы устанавливают выхлопную трубу?
2. Как происходит увлажнение изоляции трансформатора в процессе эксплуатации?
3. Какие механические дефекты возникают в процессе эксплуатации трансформатора?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Алиев, И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию [Текст]: Справочники / И. И. Алиев. - Ростов н/Д. : Феникс, 2004. - 480 с. ISBN 5-222-03004-0.

Дополнительная

1. Яковлев Н. И. Бесконтактные электроизмерительные приборы для диагностирования электрической аппаратуры / Н. И. Яковлев. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 256 с. - ISBN 5-283-04455-6.

2. Эксплуатация энергооборудования сельскохозяйственных предприятий: учебник для вузов по специальности 31.14.00 и 10.16.00 "Электрификация и автоматизация сельского хозяйства" / Г. П. Ерошенко. - Ростов н/Д. : ООО"Терра" ; НПК "Гефест"., 2001. - 592 с. - ISBN 5-87442-230-7

Лекция 5.

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 исследуют 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.

5.1. Гармонические колебания

5.1.1. 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. 5.1 (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, где T_1 – период колебаний.

$$f_1 = \frac{1}{T_1}$$

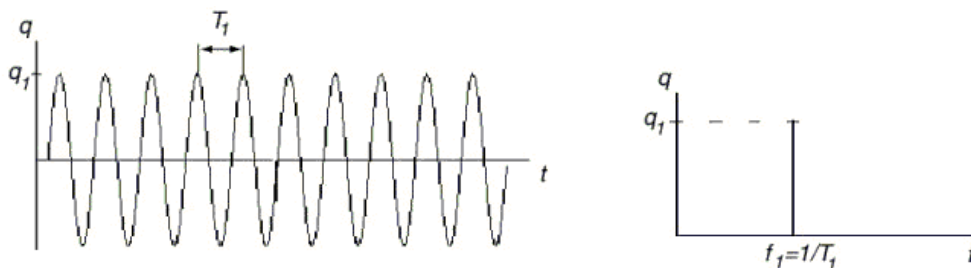


Рис. 5.1. Гармоническое колебание

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

$$q = q_a \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (5.1)$$

где q_a , ω , φ – постоянные величины, называемые параметрами гармонического колебания: q_a – амплитуда – наибольшее абсолютное значение, достигаемое колебательной величиной (для рис. 5.1 $q_a = q_1$); $\omega t + \varphi$ – фаза (фазовый угол) колебания, φ – начальная фаза (начальный фазовый угол).

5.1.2. Сложение гармонических колебаний

В практике диагностики редко приходится иметь дело с сигналом, показанным на рис. 5.1. Такой сигнал мог бы быть получен при записи звука музыкального камертона. 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.

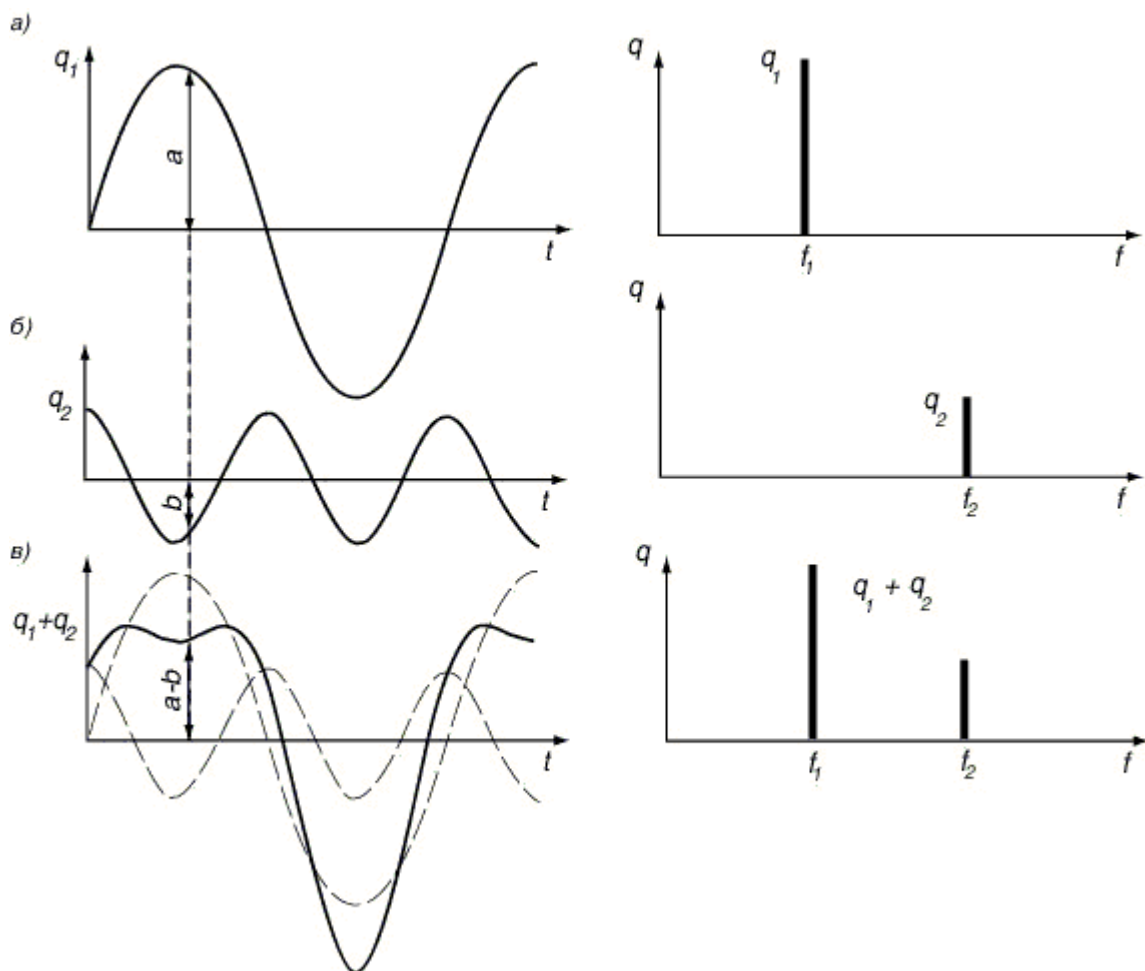


Рис. 5.2. Сложение гармонических колебаний: а – низкочастотное колебание; б – высокочастотное колебание; в – результат сложения колебаний

5.1.3. 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:

$$q(t) = \frac{a_0}{2} + (a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t) + (a_2 \cos 2\omega t + b_2 \sin 2\omega t) + \dots + (a_i \cos i\omega t + b_i \sin i\omega t) + \dots, \text{ где } i = 1, 2, 3, \dots \quad (5.2)$$

или

$$q(t) = S_0 + S_1 \sin(\omega t \pm \varphi_1) + S_2 \sin(2\omega t \pm \varphi_2) + \dots + S_i \sin(i\omega t \pm \varphi_i) + \dots \quad (5.3)$$

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 ω . Частоту ω называют основной или несущей частотой, а частоты $2\omega, 3\omega, \dots, i\omega$ – 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 заведомо 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.

5.1.4. Дискретные методы гармонического анализа

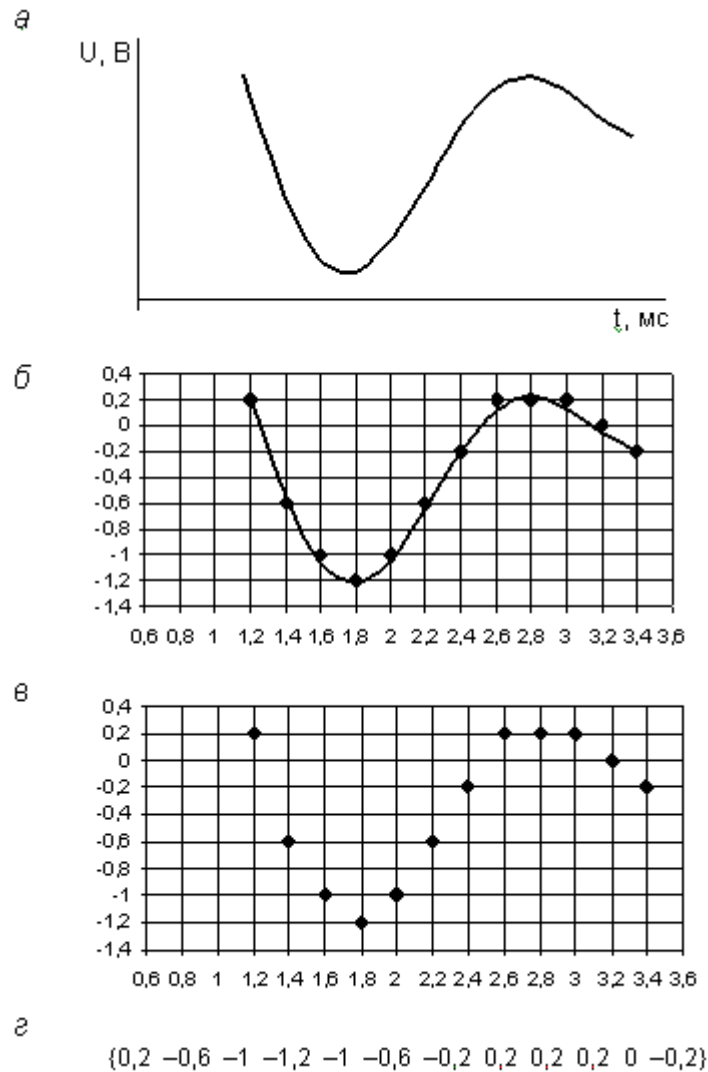


Рис. 5.3. Квантование по амплитуде и времени: а – исходный сигнал; б – результат квантования; в, г – сохраненные данные

При использовании цифровой аппаратуры реальный непрерывный сигнал (рис. 5.3, 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. 5.3, 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. Количество интервалов, на которое разбита двойная амплитуда максимально допустимого сигнала, определяется разрядностью аппаратуры. Очевидно, что для цифровой электроники, оперирующей в конечном итоге 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.

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.

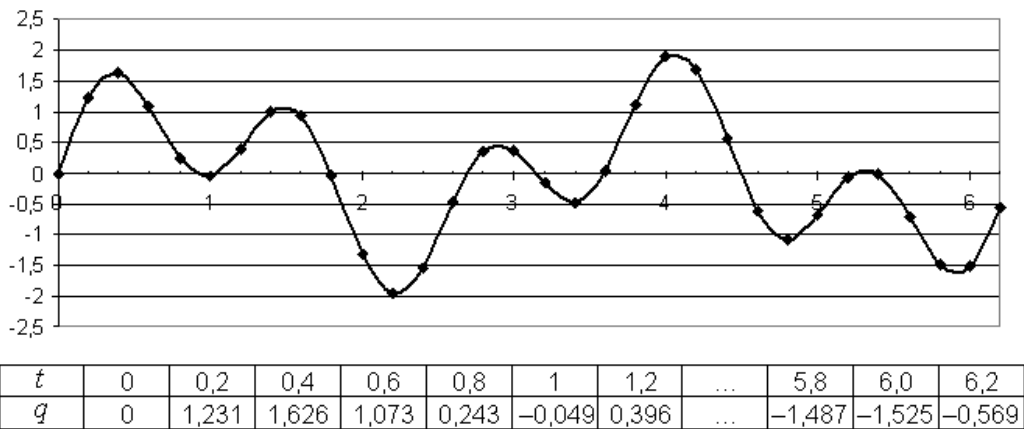


Рис. 5.4. Исследуемый сигнал

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 $\omega = 1$, которой соответствует период

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi$$

Начнем проверку сразу с «правильной» (присутствующей в сигнале) частоты $u_n = \sin 2x$. На рис. 5.5 описанные выше действия представлены графически и численно. Следует обратить внимание, что результат умножения проходит преимущественно выше оси абсцисс, и поэтому сумма заметно 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.

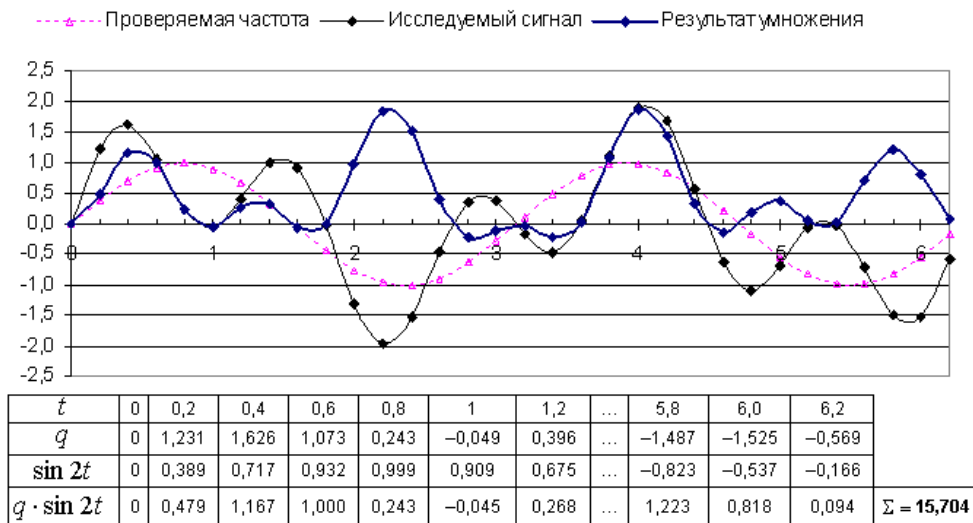


Рис. 5.5. Проверка присутствия в исследуемом сигнале составляющей $q_n = \sin 2t$

Теперь выполним те же действия для не присутствующей в исследуемом сигнале частоты, например, для третьей гармоники (рис. 5.6).

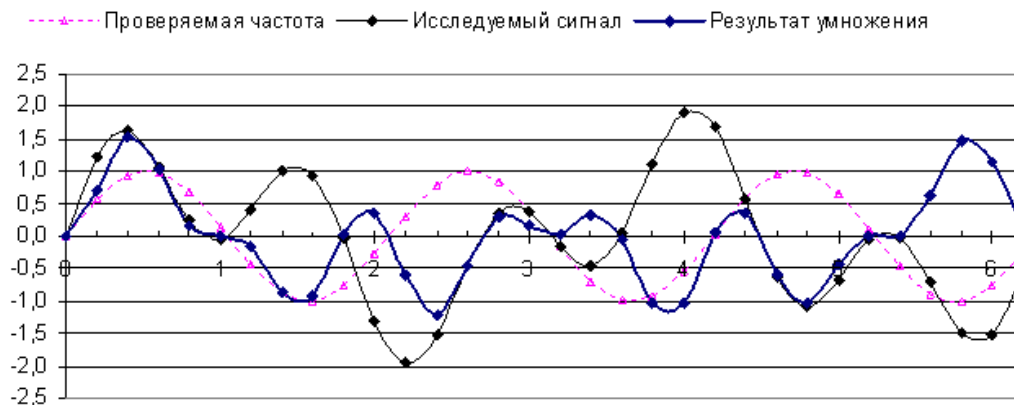


Рис. 5.6. Проверка присутствия в исследуемом сигнале составляющей $q_n = \sin 3t$

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. 5.7 показаны оба варианта спектров для исследуемого в рассмотренном примере сигнала

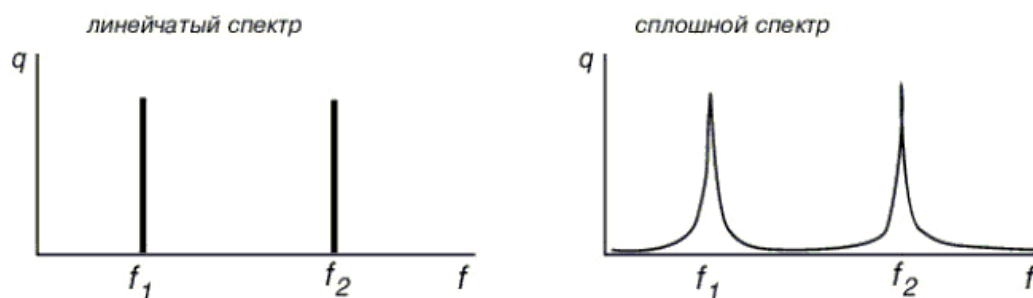


Рис. 5.7. Варианты спектров

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.

5.1.5. 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. 5.8.

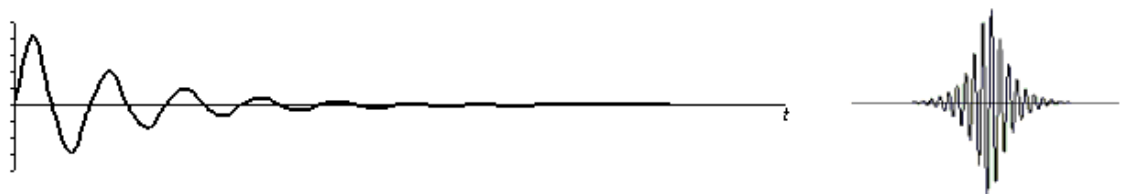


Рис. 5.8. Затухающие гармонические колебания

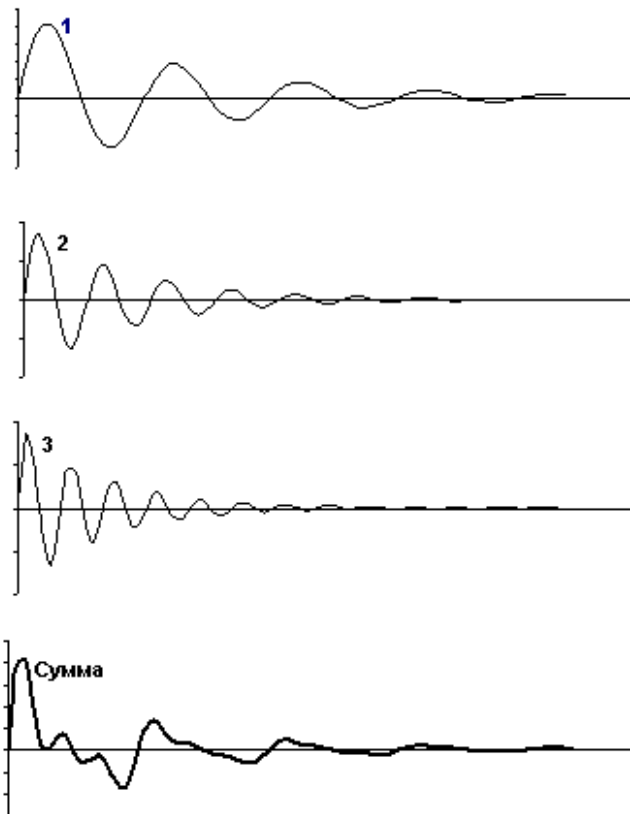


Рис. 5.9. Сложение затухающих колебаний

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. 5.8 слева), но плавное ее повышение на первоначальном участке (рис. 5.8 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. 5.9). Отмеченные выше особенности сложения гармонических колебаний и обратного преобразования – гармонического анализа – распространяются и на затухающие процессы. Рис. 5.9 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 виброакустических сигналов.

5.2. Оборудование для измерения виброакустических 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.

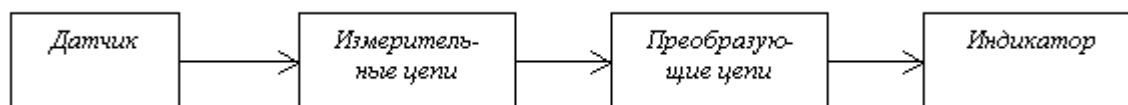


Рис. 5.10. Структурная схема устройств измерения

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.

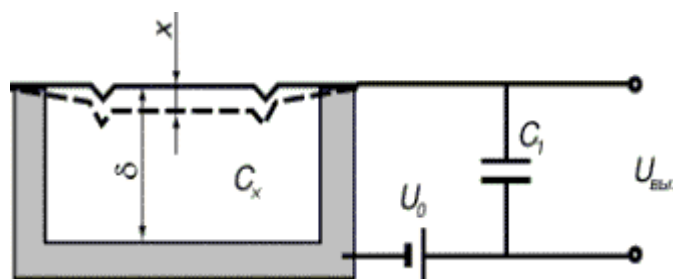


Рис. 5.11. Схема конденсаторного микрофона

На рис. 5.11 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 уменьшается расстояние между обкладками конденсатора δ , 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 :

$$U_{\text{вых}} = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_x}, \quad C_x = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{\delta - x_x}$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость; S – площадь мембраны (обкладки конденсатора).

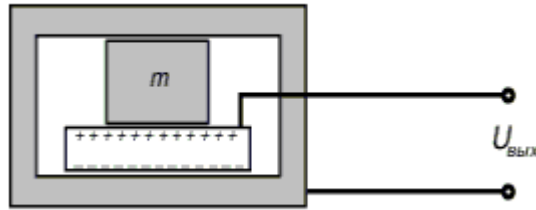


Рис. 5.12. Схема пьезопреобразователя ускорения

На рис. 5.12 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: $U_{\text{ВЫХ}}(t) = \alpha_{\text{ц}} \cdot x''(t)$, где $\alpha_{\text{ц}}$ – 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 $\alpha_{\text{ц}} = 3$ мВ/м·с⁻².

Практически все типы виброакустических 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 удастся 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) усилитель 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 обнаруживаются не только действительная частота (в примере 50 Гц), но и кратные ей частоты 100, 150 Гц и т. д.

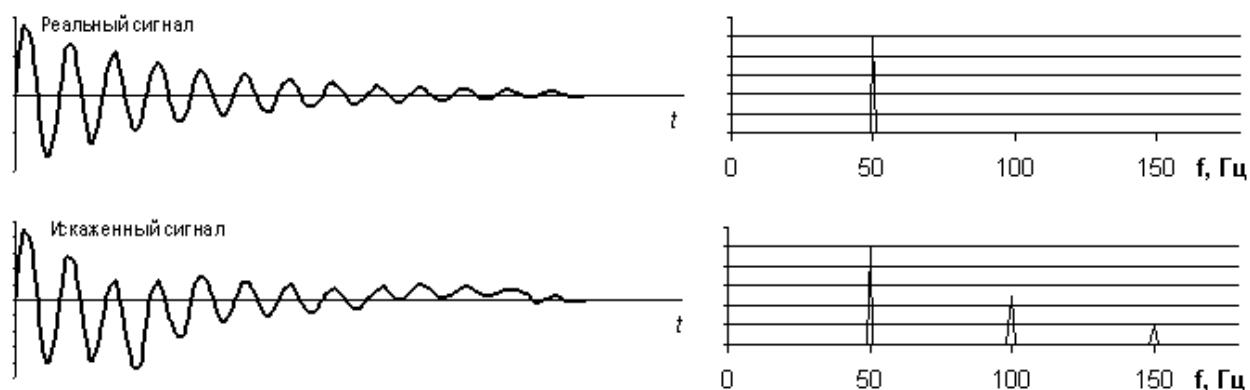


Рис. 5.13. Нелинейное искажение сигнала

Аналогичные искажения сигнала вибрации могут быть внесены в процессе 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. 5.14.

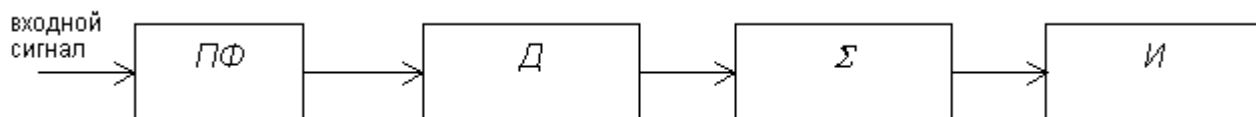


Рис. 5.14. Структурная схема аналогового анализатора спектра: ПФ – полосовой фильтр; Д– детектор; Σ – интегратор; И – индикатор

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. Этим недостатком лишены цифровые анализаторы (рис. 5.15).

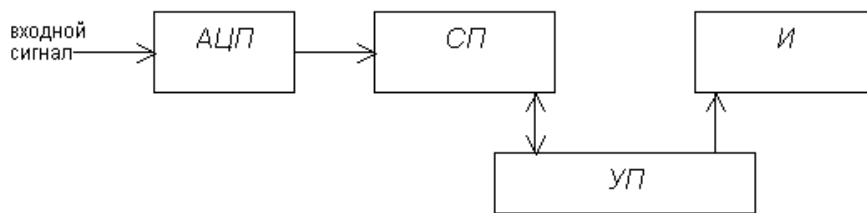


Рис. 5.15. Структурная схема цифрового анализатора спектра:
 АЦП – аналого-цифровой преобразователь; СП – сигнальный процессор; УП – управляющий процессор; И – индикатор

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.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какие дефекты можно выявить по значению $\text{tg}\delta$ изоляции трансформатора?
2. Какие характеристики изоляции называются абсорбционными?
3. Какие параметры являются характеристиками частичных разрядов (ЧР) в изоляции трансформаторов?
4. Какие методы используются для обнаружения ЧР?
5. Какие дефекты трансформатора позволяют выявить метод

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Межотраслевые типовые инструкции по охране труда при эксплуатации электроустановок, проведении электрических измерений и испытаний: ТИ РМ-(062-074)-2002. - М: НЦ ЭНАС, 2004.
2. Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300-97 - М: НЦ ЭНАС, 2004.
3. Руководство к лабораторным работам “ Испытания электрооборудования и электроустановок зданий “. - М. МИЭЭ, 2012.

Дополнительная

1. Косенков П.В., Степанов Б.М. Методические рекомендации по присвоению персоналу организации группы I по электробезопасности. – М: МИЭЭ, 2015г.

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Современные Оборудования 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. 6.1](#) 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».

Схема, изображенная на рис. 6.1, дает представление о наиболее типичных для эксплуатации дефектах ТЭД.

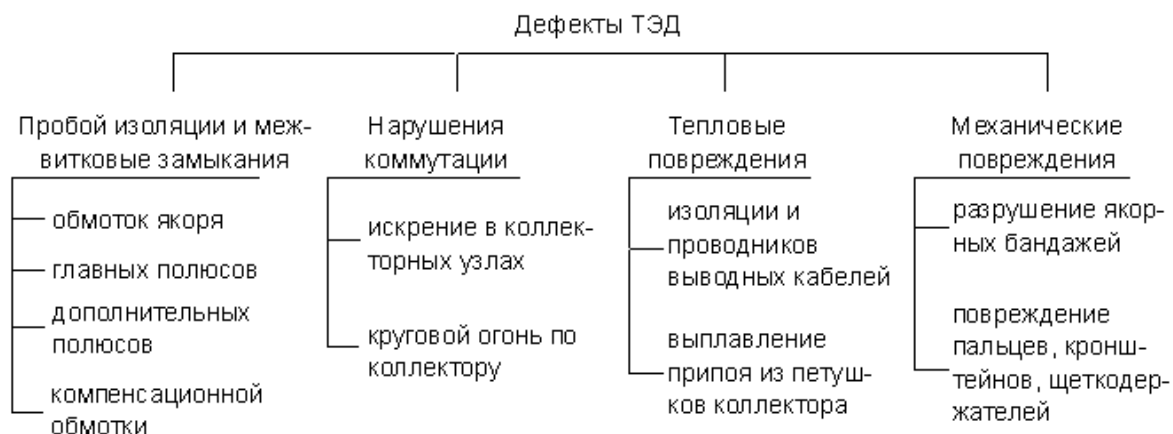


Рис. 6.1. Распространенные дефекты ТЭД

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., Зеленченко 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.

6.1. 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 δ или его тангенс ($\text{tg } \delta$). 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. 6.2, а).

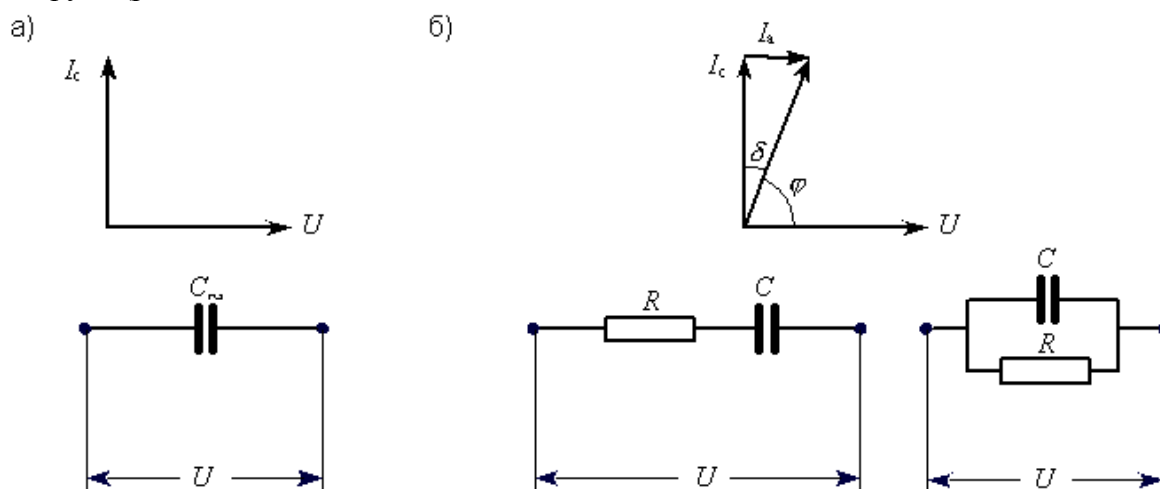


Рис. 6.2. Векторные диаграммы и схемы замещения: а – идеального диэлектрика; б – диэлектрика с потерями

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 δ . Из геометрических соображений следует, что

$$\text{tg } \delta = \frac{I_a}{I_c}, \quad (6.1)$$

и углом диэлектрических потерь δ называют угол, дополняющий до 90° фазный угол φ (рис. 6.2, б). Как следует из вышесказанного, в случае с идеальным

диэлектриком его можно рассматривать как конденсатор. Схема замещения такой изоляции показана на рис. 6.2, а. Индекс «∞» указывает на то, что активное сопротивление этого участка цепи бесконечно. Схемы замещения реальных диэлектриков (рис. 6.2, б) дополняют активным сопротивлением R, включенным последовательно или параллельно с емкостью C. Мощность диэлектрических потерь и угол диэлектрических потерь связаны равенством

$$P = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (6.2)$$

где ω – круговая частота.

Природа диэлектрических потерь кроется в эффекте поляризации – изменении свойств вещества, при котором его элементарный объем приобретает электрический момент. Возникновение электрического момента может происходить под действием электрического поля, механических напряжений или самопроизвольно (спонтанно). Для целей настоящей главы интерес представляет первая причина поляризации. На рис. 6.3, а показана схема расположения зарядов молекул в отсутствие электрического поля. Центры тяжести положительных и отрицательных зарядов совпадают ($l = 0$), а значит электрический момент $M_0 = q \cdot l$ такой молекулы будет равен нулю. В этом уравнении q – величина заряда. При приложении электрического поля с напряженностью E заряженные частицы сместятся: $l > 0$ и $M_0 \neq 0$.

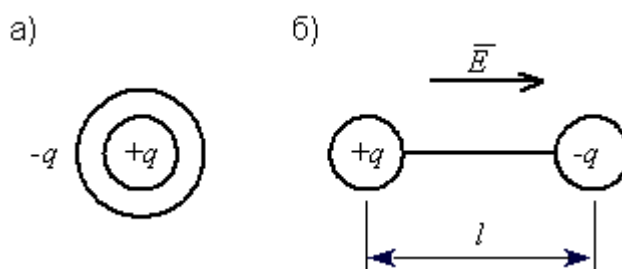


Рис. 6.3. Схема поляризации неполярной молекулы (а) под воздействием электрического поля (б)

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.

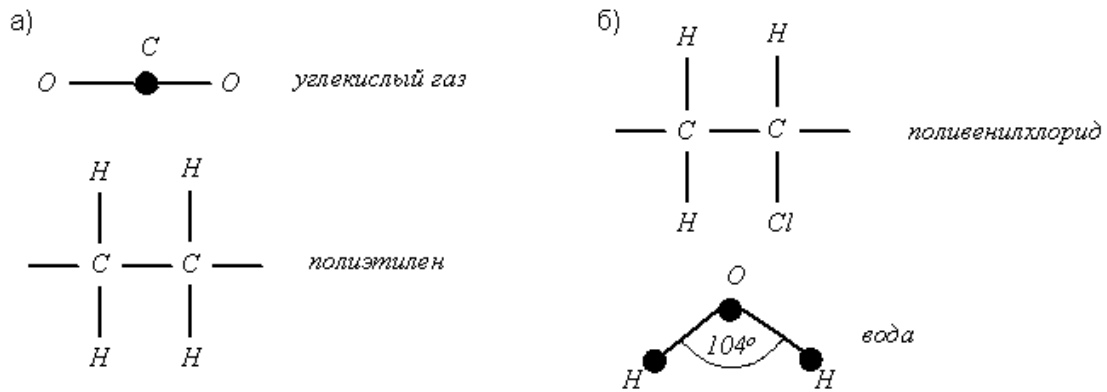


Рис. 6.4. Диэлектрики: а – неполярные; б – полярные

Наличие диэлектрических потерь приводит к протеканию тока поляризации $i_{абс}$ (рис. 6.2, б), который принято называть абсорбционным. Этот термин происходит от слова «абсорбция» (латинское *absorbeo* поглощаю), 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

$$i_{абс} = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (6.3)$$

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. 6.2, б) следует добавить третью ветвь с сопротивлением R , характеризующим проводимость «сквозных» путей изоляции (рис. 6.5). Подводя итог вышесказанному выделим составляющие тока в схеме замещения изоляции от приложенного «толчком» напряжения U : ток i_c заряда емкости C_∞ (импульсно); абсорбционный ток $i_{абс}$; ток «сквозной» проводимости $i_{пр}$.

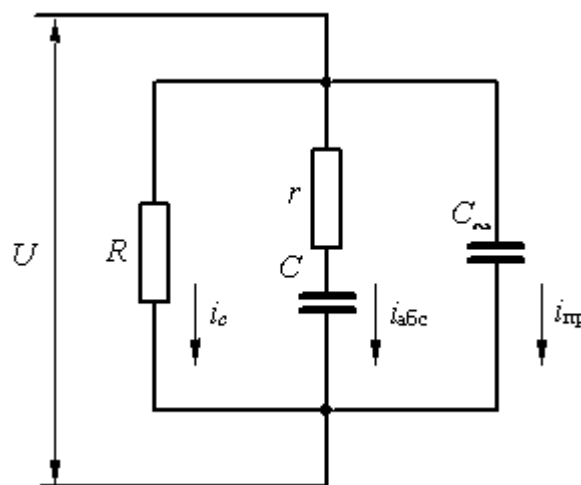


Рис. 6.5. Обобщенная схема замещения изоляции

6.2. Методы контроля изоляции

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

6.2.1. Контроль изоляции по ее сопротивлению

Наиболее доступный, легко реализуемый в условиях депо метод оценки состояния изоляции. Для контроля сопротивления применяются мегомметры. Принцип работы этих приборов (рис. 6.6) основан на измерении тока в измерительной цепи, состоящей из последовательно соединенных контролируемого сопротивления (в нашем случае изоляции $R_{из}$), подстроечного резистора и источника тока с эдс E и сопротивлением R_g .

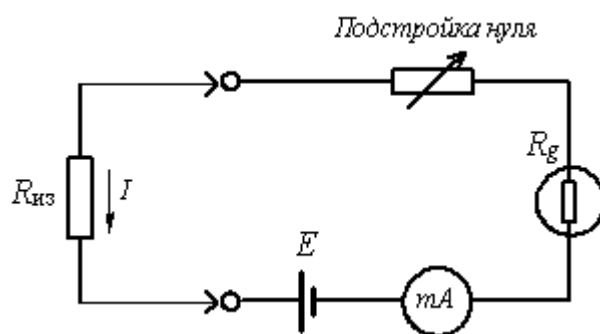


Рис. 6.6. Схема омметра

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

$$I = \frac{E}{R_{из} + R_g} \quad (6.4)$$

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 (6.4) 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.

Как отмечалось выше (рис. 6.5), 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 (6.3). Поэтому диагностическим признаком является не только измеренное сопротивление изоляции (показания мегомметра), но и интервал времени от приложения U до момента считывания показаний по шкале прибора. Опытным 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. 6.7 в качестве примера показаны построенные с учетом уравнения (6.3) зависимости изменения сопротивления изоляции для разных значений T .

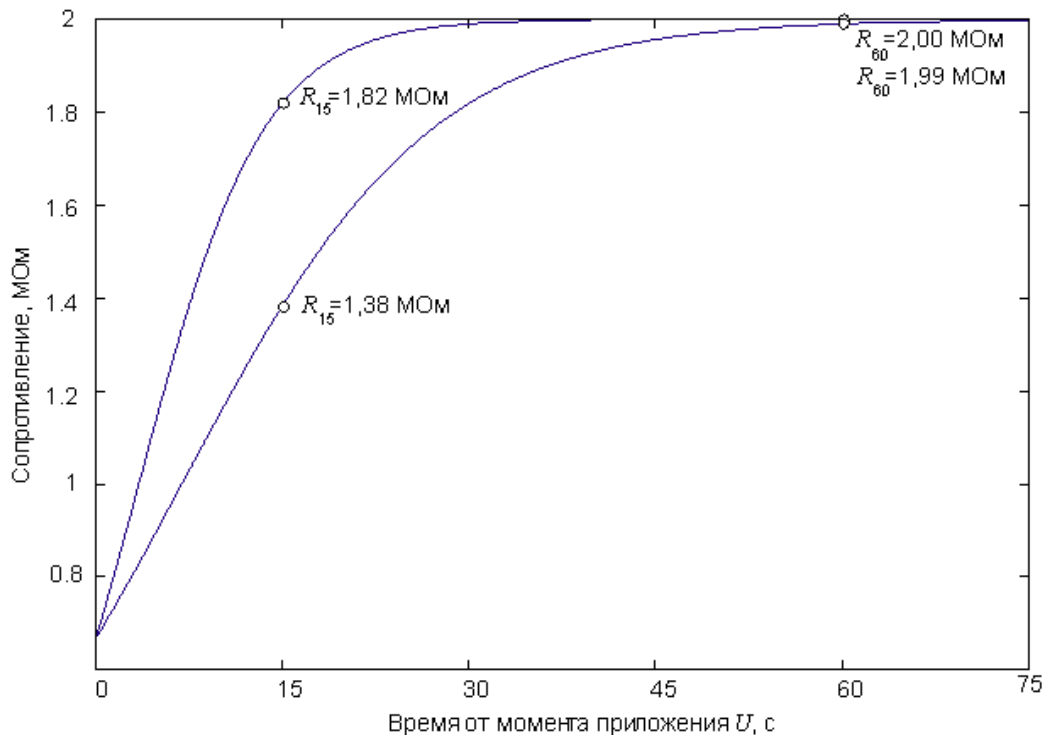


Рис. 6.7. Расчетные зависимости изменения сопротивления изоляции от времени измерения для различных значений постоянной времени T

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

$$K_{\text{абс}} = \frac{R_{60}}{R_{15}}, \quad (6.5)$$

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 $20 \pm 10^\circ\text{C}$). Для определения величины $K_{\text{абс}}$ промышленность выпускает специальные приборы. Примером может служить мегомметр Ф4100. Он имеет выходное напряжение на разомкнутых зажимах $2500 \pm 250 \text{ В}$ и оснащен реле времени и сигнальной лампой для снятия показаний с выдержкой времени 15 и 60 секунд.

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

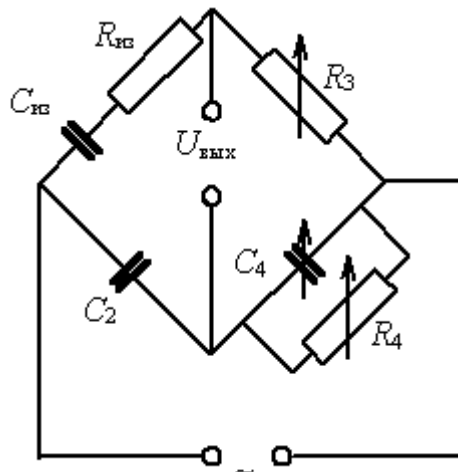


Рис. 6.8. Схема моста Шеринга

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 ω добиваются балансировки моста, т. е. выполнения условия $U_{вых} = 0$.

Наблюдая за величиной t 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 .

6.3. Методы контроля искрения в коллекторных машинах

ГОСТ 1873-74 рекомендует оценивать искрение визуально (на глаз) по шкале, представленной на рис. 6.9.

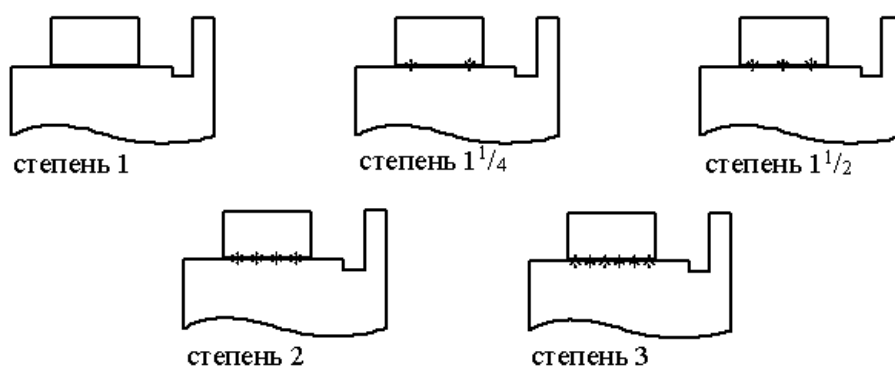


Рис. 6.9. Шкала искрения

Искрение считается допустимым, если не превышает $1\frac{1}{2}$. Существуют и приборные методы измерения степени искрения.

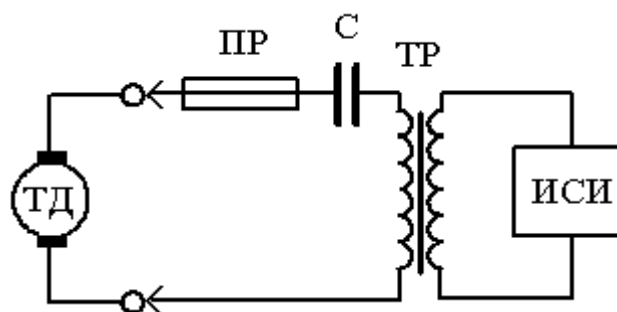


Рис. 6.10. Схема подключения устройства А-1939 к ТЭД

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. 6.10) устройство состоит из низковольтной части – индикатора искрения (ИСИ) и высоковольтной части, включающей предохранитель 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 короткозамкнутый 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 ($A^2 \text{ сек}$) – величине, характеризующей теплоту Джоуля (тепловое действие тока разрыва).

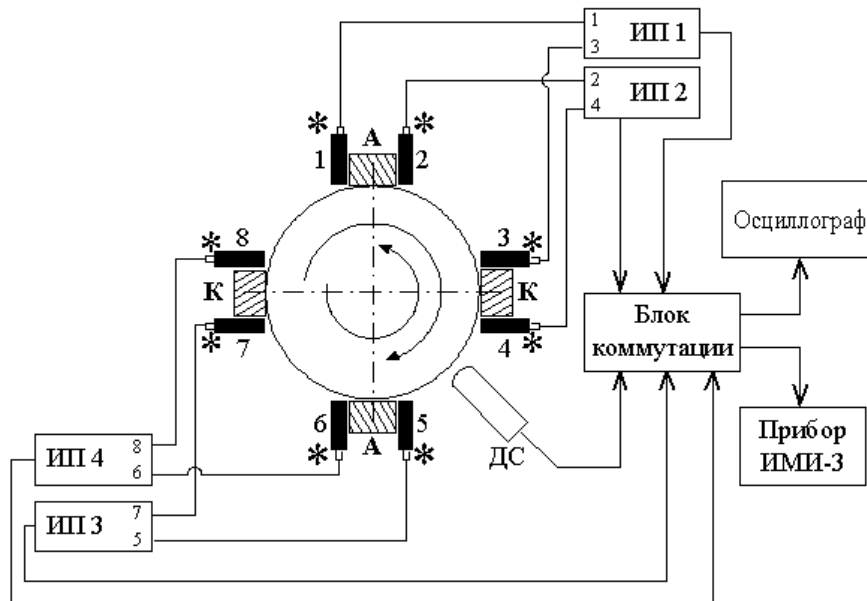


Рис. 6.11. Функциональная схема установки для контроля коммутации ТЭД:
 1...8 – магниточувствительные элементы; ИП1...ИП4 – измерительные преобразователи; А, К –
 анодные и катодные щетки; ДС – фотодатчик синхронизации

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 приводит 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, контролируют 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. 6.12), принцип работы которого основан на наличии трансформаторной связи между обмотками главных полюсов и якоря.

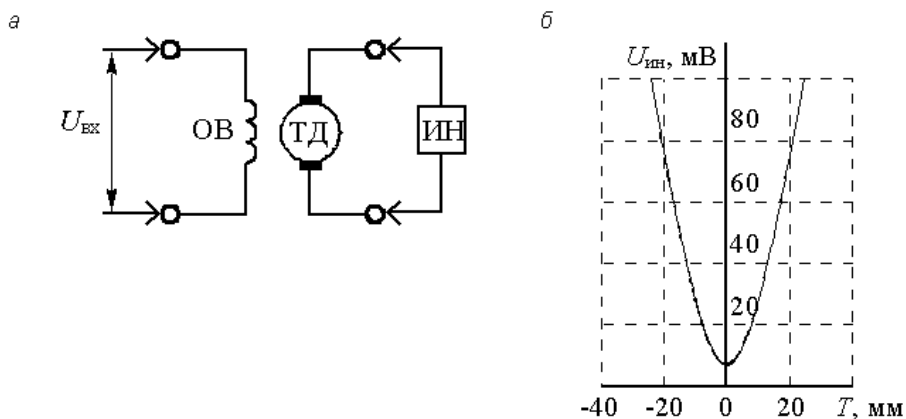


Рис. 6.12. Схема подключения (а) и выходной сигнал (б) устройства А-1938: ОВ – обмотка возбуждения ТЭД; ТД – якорь ТЭД; ИН – измеритель напряжения; $U_{вх}$ – напряжение питания ОВ; $U_{ин}$ – напряжение, измеренное с помощью ИН; Т – смещение щетки от нейтрального положения

С помощью данного устройства к обмоткам возбуждения ТЭД подводится переменное напряжение $U_{вх}$ 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. 6.12, б показано изменение показаний прибора $U_{ин}$ в зависимости от смещения Т щетки от нейтрального положения. Видно, что минимум эдс ($U_{ин}$) приходится точно на нейтраль. Значения $U_{ин}$ могут незначительно меняться для различных типов двигателей, но характер изменения одинаков для всех.

Вопросы для самоконтроля:

1. В чем суть метода частотного анализа?
2. Что является целью вибрационного обследования трансформаторов?
3. Каковы параметры контроля при тепловизионном обследовании трансформаторов?
4. Что относится к параметрам непрерывного контроля трансформаторов под напряжением?
5. По каким характеристикам оценивается старение трансформаторного масла?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Межотраслевые типовые инструкции по охране труда при эксплуатации электроустановок, проведении электрических измерений и испытаний: ТИ РМ-(062-074)-2002. - М: НЦ ЭНАС, 2004.
2. Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300-97 - М: НЦ ЭНАС, 2004.
3. Руководство к лабораторным работам “ Испытания электрооборудования и электроустановок зданий “”. - М. МИЭЭ, 2012.

Дополнительная

1. Косенков П.В., Степанов Б.М. Методические рекомендации по присвоению персоналу организации группы I по электробезопасности. – М: МИЭЭ, 2015г.

