

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Кафедра «Электроподвижной состав»

Я. Ю. Бобровников, А. Е. Стецюк

## **ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Рекомендовано  
Методическим советом ДВГУПС  
в качестве учебного пособия  
для студентов, обучающихся по направлению 190300  
«Подвижной состав железных дорог» (специалитет)

Хабаровск  
Издательство ДВГУПС  
2012

УДК 629.4.053.3:629.423(075.8)  
ББК О232-06-7я73  
Б 725

Рецензенты:

Кафедра «Электроподвижной состав» ИрГУПС  
(заведующий кафедрой «Электроподвижной состав»,  
кандидат технических наук, доцент  
*В. В. Макаров*)

Заместитель начальника железной дороги,  
главный ревизор по безопасности движения поездов  
Дальневосточной железной дороги – филиала ОАО «РЖД»  
*П. В. Демин*

**Бобровников, Я. Ю.**

**Б 725** Диагностические комплексы электроподвижного состава :  
учеб. пособие / Я. Ю. Бобровников, А. Е. Стецюк. – Хабаровск :  
Изд-во ДВГУПС, 2012. – 94 с. : ил.

Рассматриваются вопросы диагностирования локомотивов, их основные методы, применяемые при диагностике локомотивов, теория выбора диагностических параметров, средства и элементная база процессов диагностирования, принципы построения схем диагностирования и его проведения.

Предназначено для студентов 5-го курса дневной формы обучения и студентов 6-го курса ИИФО, изучающих дисциплину «Диагностические комплексы электроподвижного состава».

УДК 629.4.053.3:629.423(075.8)  
ББК О232-06-7я73

© (ДВГУПС), 2012

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ	
ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ЛОКОМОТИВА.....	6
1.1. Задачи и средства диагностирования .....	6
1.2. Классификация систем технического диагностирования .....	9
1.3. Алгоритм и информационные характеристики	
технического диагностирования .....	11
1.4. Методы диагностирования локомотива .....	17
1.4.1. Метод экспертов .....	19
1.4.2. Математические методы.....	19
1.4.3. Виброакустические методы диагностирования.....	21
1.4.4. Тепловой метод.....	23
1.4.5. Методы спектрального анализа .....	25
1.4.6. Метод диагностирования	
по параметрам газовоздушного тракта .....	28
1.4.7. Оптические методы.....	28
1.4.8. Методы неразрушающего контроля.....	30
1.5. Выбор диагностических параметров .....	31
1.5.1. Определение числа совокупных параметров.....	33
1.5.2. Нормативные значения диагностических параметров.....	35
1.6. Прогнозирование технического состояния.....	36
1.7. Контролепригодность локомотивов .....	38
1.8. Порядок разработки систем диагностирования локомотивов .....	39
1.9. Вопросы для самоконтроля .....	41
2. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ	
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	42
2.1. Тяговые электродвигатели.....	42
2.2. Вспомогательные машины.....	57
2.3. Токоприёмники.....	59
2.4. Электрические аппараты .....	60
2.5. Полупроводниковые выпрямительные блоки .....	63
2.6. Тиристорные преобразователи .....	73
2.7. Электронные устройства.....	77
2.8. Цепи управления .....	80
2.9. Вопросы для самоконтроля .....	82
3. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ	
МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	83
3.1. Экипажная часть.....	83
3.2. Колёсно-моторные блоки .....	88
3.3. Вопросы для самоконтроля .....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	93
РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	94

## ВВЕДЕНИЕ

Техническая диагностика – это отрасль знаний, включающих в себя теорию и методы определения технического состояния объекта диагностирования. Диагноз (от греч. diagnosis) – распознавание, определение. Техническая диагностика решает три типа задач. К первому типу относятся задачи по определению состояния, в котором объект находится в настоящее время – установление диагноза. Задачами второго типа являются задачи по предсказанию состояния, в котором окажется объект в некоторый момент времени – задачи прогноза. К третьему типу относятся задачи определения состояния, в котором находился объект в некоторый момент в прошлом – задачи генеза.

Техническое диагностирование тягового подвижного состава сопряжено с высокой трудоёмкостью, это обусловлено сложностью его конструкции, интенсивностью эксплуатации и повышению требований к надёжности и безопасности, что не позволяет интуитивным и ручным способом определить его техническое состояние. Поэтому применение специализированных средств диагностирования даёт возможность достоверно определить техническое состояние локомотива.

В основные задачи диагностирования входят: проверка исправности объекта, его работоспособности, правильности функционирования и поиск неисправностей. Решение этих задач возможно только в том случае, когда диагностирование проводится на трех стадиях: 1) производства; 2) эксплуатации и 3) ремонта объекта.

В настоящее время на железнодорожном транспорте неразрушающим контролем занято более 14 тыс. работников различного уровня квалификации (от инженеров до рабочих). В эксплуатации находится около 10 тыс. дефектоскопов различных типов.

Ежегодно контролируется более 4,5 млн. км рельсового пути; 2,5 млн. сварных стыков рельсов, 4,5 млн. деталей и узлов подвижного состава; предотвращается более 70 тыс. потенциально возможных изломов ответственных узлов технических объектов пути и подвижного состава. Обнаружение дефектов средствами неразрушающего контроля (НК) составляет 99,3–99,7 %.

Действующие системы НК при ремонте подвижного состава позволяют обнаруживать множество опасных дефектов, предотвращая тем самым поступление дефектных деталей в эксплуатацию. Однако большая номенклатура дефектоскопов с ручным сканированием и высокая трудоемкость контроля снижают эффективность дефектоскопирования.

Системы НК должны включать модульный ряд механизированных и автоматизированных средств комплексного контроля, обеспечивающих выявление внутренних дефектов деталей, ремонтируемых по безраз-

борной технологии. Они должны обеспечивать обнаружение опасных дефектов и производить оценку накопленной усталости конструкций (боковых рам и надрессорных балок тележек, колесных пар).

Работа в этой области проводится по четырем важным направлениям: разработка методов и средств НК и технической диагностики (ТД), разработка единой системы контроля объектов, совершенствование диагностических технологий и организационное обеспечение НК и ТД.

При создании технических средств НК и ТД реализован переход от ручного сканирования к механизированному и автоматизированному, разработаны эксплуатационно-технологическая документация и программное обеспечение, позволившие поднять на качественно новый уровень техническое обслуживание средств технической диагностики, обеспечить рабочие места нормативно-технической документацией, контрольными и стандартными образцами, создать благоприятные условия для работы операторов-дефектоскопистов, подготовки и повышения квалификации кадров в созданных на железных дорогах лабораториях и учебных центрах.

# 1. ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ЛОКОМОТИВА

## 1.1. Задачи и средства диагностирования

Создание систем технического диагностирования является составной частью комплекса работ по обеспечению качества функционирования машин и механизмов. Основная цель технического диагностирования состоит в организации эффективных процессов определения технического состояния тягового подвижного состава. В зависимости от задач диагностирования локомотивов применяют аппаратные или программные средства, встроенные или внешние технические средства, реализующие разработанный алгоритм диагностирования [1, 2, 3].

При исследовании, разработке и реализации процессов технического диагностирования локомотивов решается и другая задача, связанная с разработкой и реализацией процесса управления как всего целого. Наряду с перечисленными задачами решаются и первоочередные – изучение физических свойств объектов и их неисправностей, построение математических моделей объектов и моделей неисправностей, анализ модели объекта с целью получения данных, необходимых для построения алгоритмов диагностирования. Следующую группу образуют задачи, связанные с разработкой принципов построения, экспериментальным опробованием и промышленным внедрением технических средств диагностирования. Классификация основных предметов исследований технической диагностики приведена на рис. 1.

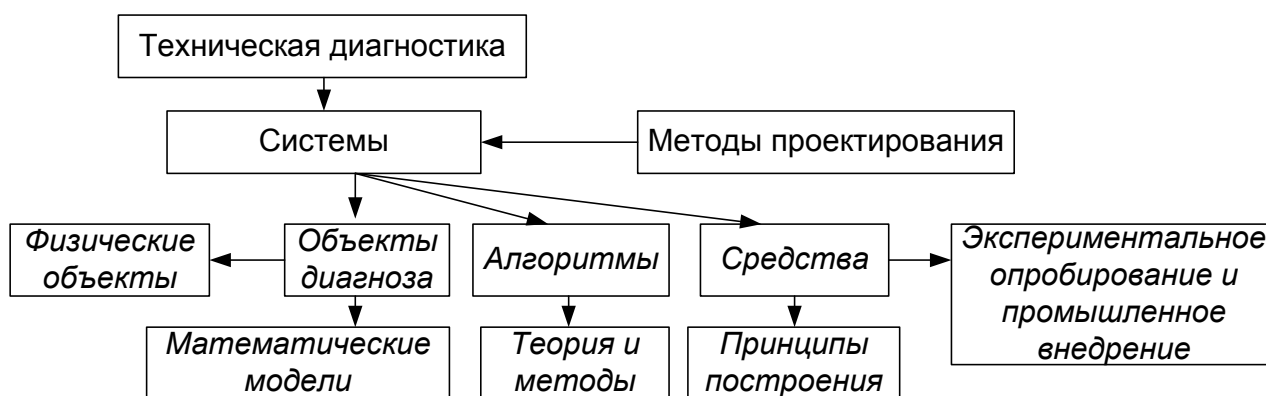


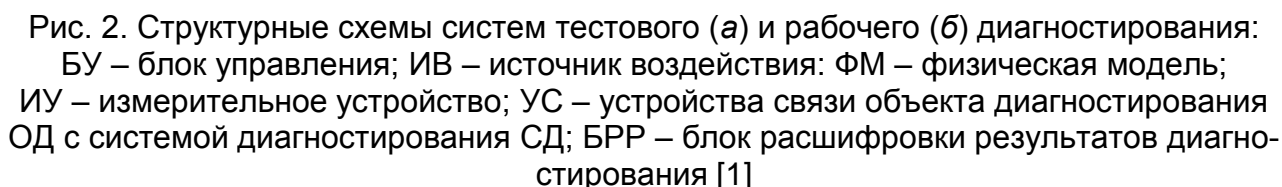
Рис. 1. Структурная схема классификации основных задач технического диагностирования [1]

Техническая диагностика изучает методы, определяющие действительное состояние технических объектов, в отличие от теории надёжности, которая занимается изучением и использованием для расчётов

Существуют следующие виды систем технического диагностирования:

- системы тестового диагностирования. Сигнал проверки формируется в блоках системы диагностирования и по каналам передачи информации подаётся на входы объекта диагностирования. Тестовые воздействия могут подаваться на основные входы объекта, (т.е. на те входы, которые используются для входа или выхода рабочих сигналов) и дополнительные, используемые специально для целей диагностирования (рис. 2, а);

– системы комбинированного диагностирования, когда используются и тестовые, и рабочие воздействия, особенно в сложных многофункциональных объектах, которыми являются электровоз и тепловоз.



7

тельных (специально предназначенных для диагностирования). Эти все выходы представляют собой контрольные точки объекта.

Для реализации алгоритма диагностирования средства диагностирования должны иметь источники воздействий (в системах тестового диагностирования), измерительные устройства, устройства связи и обработки информации. Цель анализа результатов проверок – установить диагноз. Результаты проверок представляются в виде значений сигналов в контрольных точках, а результаты диагностирования должны быть представлены в другой, более удобной для практического использования форме. В простейшем случае данные диагностирования или их расшифровка представляют собой результаты сравнения значений сигналов в контрольных точках с заданными эталонными значениями этих сигналов. Операцию расшифровки полученных сигналов можно проводить с использованием вычислительных устройств или автоматизированных схем.

Средства, которые сопоставляются с информацией об объекте, хранящейся в его физической модели, и с фактическими результатами элементарных проверок, которые вырабатывают сигнал «результаты диагностирования», называются блоками расшифровки результатов. Как и физическая модель объекта, блок расшифровки результатов может быть реализован различными способами и средствами – это зависит от задач и характеристик конкретных систем диагностирования. Средства диагностирования должны иметь тот или иной носитель алгоритма диагностирования. Носителем жёстких или редко изменяемых алгоритмов диагностирования обычно является аппаратура, конструктивно объединённая с остальной аппаратурой диагностирования. Для задания сменных алгоритмов диагностирования, как правило, применяются стандартные программные носители – интегральные микросхемы.

Облик современной аппаратуры определяется рядом существенных факторов: элементной базой; схемотехникой; структурой и методами построения. Всё это существенно сказывается на средствах диагностирования и на выборе контрольно-проверочной аппаратуры. Достижение большей точности, увеличение объёма обработки данных, повышение удобства представления результатов диагностирования и расширение функциональных возможностей приборов использования различных режимов работы в системах диагностирования позволит широко использовать цифровые методы решения задач диагностирования.

Устройства обработки аналоговых сигналов всё больше вытесняются устройствами обработки и представления сигналов в цифровой форме. Для этого в средствах технического диагностирования широко используется микропроцессорная техника. Введение в состав приборов вычислительно-управляющих устройств, хотя и усложнило их структуру, зато значительно увеличило технические возможности: объём данных, под-



лежащих сбору и обработке, рост числа каналов, в которых накапливается информация, повышение количества параметров сигналов, поступающих от датчиков.

При построении современной аппаратуры широкое распространение получил магистрально-модульный метод, в соответствии с которым измерительные приборы komponуются из конструктивно завершённых и совместимых друг с другом элементов или модулей, которые в свою очередь информационно объединяются через специальные системы связи (интерфейсы). Значительный объём электронных устройств в системах диагностирования реализуется на больших интегральных схемах (БИС), поэтому для обеспечения надёжной и безотказной работы приборов и быстрой локализации дефектных элементов необходимо осуществлять периодическое тестирование (самодиагностирование) этих БИС как автономно, так и в составе аппаратуры диагностирования. В первую очередь это относится к микропроцессорам, оперативным и постоянным запоминающим устройствам, операционным усилителям, аналого-цифровым и цифроаналоговым преобразователям и другим элементам и блокам. Существенную роль в системах диагностирования играют датчики.

## **1.2. Классификация систем технического диагностирования**

Основная задача технического диагностирования состоит в организации эффективных процессов определения технического состояния различных, особенно сложных, многокомпонентных объектов. Под *техническим состоянием объекта* понимают совокупность свойств объекта, установленных технической документацией и подверженных изменению в процессе эксплуатации [1, 2]. Процесс определения технического состояния объекта с определённой точностью называется *техническим диагностированием*. *Контроль технического состояния* – это определение вида технического состояния. При одном и том же объективно существующем техническом состоянии изделие может быть работоспособным для одних условий эксплуатации и неработоспособным для других. Поэтому номенклатура свойств изделия, включаемая в техническую документацию, должна содержать диагностические параметры, достаточные для проведения тех видов диагностирования, которые требуются в условиях эксплуатации для проверки исправного и работоспособного состояния объекта, его правильного функционирования и поиска неисправностей с заданной глубиной. Последняя определяется числом диагностических (контролируемых) параметров, определяющих надёжность изделия. Чем больше контролируемых параметров используется при диагностировании, тем глубже и полнее будет диагностирование [1, 2].

*Полнота технического диагностирования* – характеристика, определяющая возможность выявления отказов (неисправностей) в объекте

при выбранном методе его диагностирования (контроля). *Глубина поиска места отказа (неисправности)* – характеристика, задаваемая указанием составной части объекта, с точностью до которой определяется место отказа (неисправности).

К *средствам диагностирования* относится: аппаратура – различного рода датчики, преобразователи, измерительные и специализированные приборы, пульты, стенды, вычислительные устройства и др.

*Системой диагностирования* называется совокупность средств, объектов и исполнителей, необходимых для проведения диагностирования по правилам, установленным в технической документации, которая должна быть обязательной составной частью системы планово-предупредительного ремонта тягового подвижного состава железных дорог. Системы технического диагностирования предназначаются для: проверки исправности; проверки работоспособности; проверки правильного функционирования; поиска дефектов. Системы технического диагностирования могут быть классифицированы по ряду признаков, определяющих их назначение, задачи, структуру и состав технических средств:

- по *степени* охвата объекта диагностирования системы технического диагностирования могут быть 1) локальными и 2) общими. С помощью локальных систем решается одна или несколько из вышеперечисленных задач. Общие системы технического диагностирования решают все поставленные задачи;

- по характеру *взаимодействия* средств диагностирования с объектом диагностирования системы технического диагностирования подразделяются на: 1) системы рабочего диагностирования, в которых информация о техническом состоянии объекта поступает в процессе его нормального функционирования, и 2) системы тестового диагностирования, когда информация о техническом состоянии объекта поступает в процессе подачи на объект специальных тестовых сигналов;

- по *используемым средствам* системы технического диагностирования можно подразделить на: 1) системы с универсальными средствами диагностирования и контроля объектов различных типов; системы со специализированными средствами (стенды, имитаторы и др.); 2) системы с внешними средствами, расположенными на постах диагностирования, где связь с объектом диагностирования осуществляется через стыковочные узлы; 3) системы со встроенными средствами диагностирования, составляющими единое целое с объектом контроля;

- по *степени автоматизации* системы технического диагностирования можно подразделить на: 1) автоматические, в которых обработка и получение информации осуществляются без участия человека по заранее разработанной программе; 2) автоматизированные, в которых получение и обработка информации осуществляются с применением средств

автоматизации и участием человека; 3) ручные (неавтоматизированные), в которых получение и обработка информации осуществляются человеком-оператором.

Представим структурную схему классификации средства диагностирования (рис. 3).

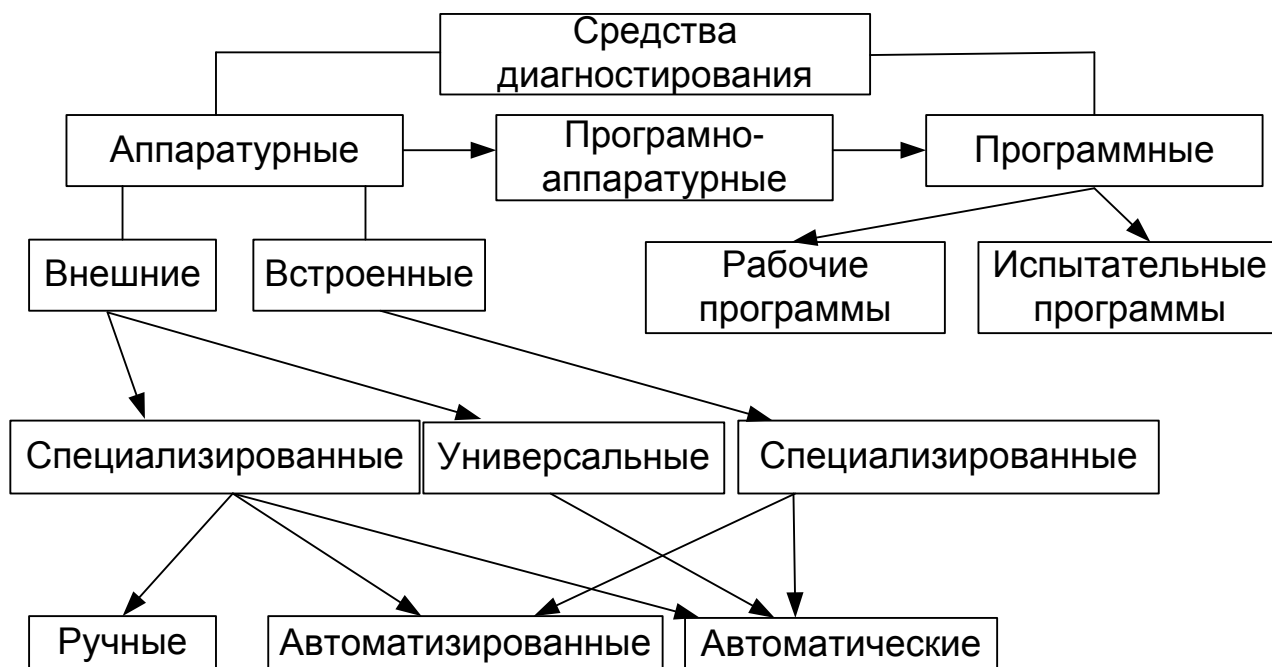


Рис. 3. Структурная схема классификации средств диагностирования

Системы технического диагностирования должны обеспечивать полное выполнение *алгоритма диагностирования*: предупреждать постепенные отказы; выявлять неявные отказы; осуществлять поиск неисправных узлов, блоков, сборочных единиц и локализовать место отказа. Под *диагностическим параметром* понимается параметр, изменение которого приводит либо к физическому отказу, либо к увеличению интенсивности процесса накопления повреждений в деталях локомотива. Количество и набор диагностических параметров определяется исходя из заданной глубины диагностирования. Увеличение количества диагностических параметров приводит к усложнению средств диагностирования и их удорожанию.

### 1.3. Алгоритм и информационные характеристики технического диагностирования

*Алгоритм технического диагностирования* устанавливает состав и порядок проведения элементарных проверок объекта диагностирования и правила анализа их результатов. Элементарная проверка определя-

ется рабочим или тестовым воздействием на объект и составом диагностических параметров, образующих ответ на соответствующее воздействие. Алгоритмы разделяются на условные и безусловные. К условным алгоритмам относятся такие, у которых выбор очередных элементарных проверок определяется результатами предыдущих элементарных проверок, а к безусловным алгоритмам – такие, у которых порядок выполнения элементарных проверок определён заранее и фиксирован. Иногда безусловный алгоритм называют *комбинационным*, или комбинаторным, а условный – *последовательным*.

Для построения алгоритма диагностирования технического состояния некоторого объекта необходимо иметь описание объекта, принципы его функционирования и поведения в исправном и неисправном состояниях. Такое формальное описание в аналитической, табличной, векторной, графической или в другой форме называется *математической моделью* объекта диагностирования. Математическая модель может быть задана в явном или неявном виде [1, 2, 4, 5].

Исправный или неисправный объект может быть представлен как динамическая система, состояние которой в любой момент времени определяется значениями входных, внутренних и выходных параметров. При этом следует отметить, что наиболее достоверными будут те параметры, которые получают в динамическом состоянии объекта. В любом сложном объекте можно выделить достаточное число узлов, которые можно представить как отдельные законченные блоки, взаимосвязанные и взаимозависимые между собой. Выход из строя одного блока влияет на работоспособность и техническое состояние другого блока.

Построению диагностической модели должны предшествовать различные исследования, в результате которых необходимо выяснить: структуру объекта; выполняемые функции блоков и объекта в целом; режим работы; состав элементов и связи между ними; наличие обратных связей и возможность их разрыва на время диагностирования; признаки и параметры нормального функционирования; рабочие сигналы; диапазон измерения параметров при нормальном функционировании; характерные отказы элементов и их комбинации; наличие узлов регулирования.

Математическую модель объекта диагностирования можно представить в аналитической, графической, векторной или табличной форме. Обозначим символом  $X$   $n$ -мерный вектор, компонентами которого являются значения  $n$  входных переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (рис. 4). Аналогично  $Y$  является  $m$ -мерным вектором значений  $m$  внутренних переменных  $y_1, y_2, \dots, y_m$ , а  $Z$  –  $k$ -мерным вектором значений  $k$  выходных функций  $z_1, z_2, \dots, z_k$ . Выходная функция  $Z = \Psi(X, Y_{\text{нач}}, t)$  является *математической моделью исправного объекта*. При этом  $Y_{\text{нач}}$  выражает начальное значение внутренних переменных параметров объекта, а  $t$  – фактор вре-

мени. В процессе работы объекта происходит изменение внутренних переменных  $y_1, y_2, \dots, y_m$  и возможно появление одиночных или кратных отказов. Под одиночной неисправностью понимают элементарный отказ, не являющийся совокупностью более мелких незначительных неисправностей. Кратная неисправность является совокупностью одновременного появления двух и более одиночных неисправностей.

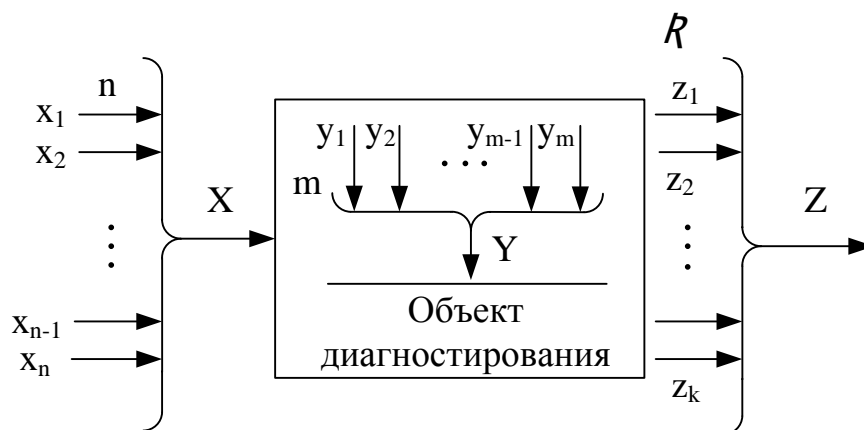


Рис. 4. Математическая модель объекта диагностирования

Объект диагностирования, находящийся в  $i$ -неисправном состоянии, реализуется системой передаточных функций  $Z^i = \Psi^i(X, Y_{\text{нач}}, t)$  и является *математической моделью  $i$ -неисправного объекта*. Но для решения задач построения и реализации алгоритмов диагностирования необходимо иметь понятие о элементарных проверках объекта. Обозначим символом  $\Pi$  множество элементарных проверок  $\pi_j$ , где  $j = 1, 2, 3, \dots, |\Pi|$ . Каждая элементарная проверка характеризуется значением воздействия, подаваемого на объект при реализации элементарной проверки и ответом объекта на это воздействие. Значение  $a_j$  воздействия в элементарной проверке  $\pi_j \in \Pi$  определяется составом входных переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и последовательностью времени  $t$  их значений  $X_j$ , а также начальным значением  $Y_{\text{нач}}$  внутренних переменных. Ответ объекта в элементарной проверке  $\pi_j$  характеризуется составом  $\{Y\}$  контрольных точек и значений  $R_j^i$ , зависящим от технического состояния объекта. Таким образом, результат  $R_j^i$  элементарной проверки представляется в общем случае последовательностью  $[\{Y_j\}]$ -мерных векторов и является функцией значения  $a_j$ : воздействия и определяется как

$$R_j^i = \Psi^i(a_j; \vec{X}_j, \vec{Y}_{\text{нач}}).$$

Математическую модель диагностируемого объекта можно представить в *табличной форме*, используя результаты элементарных проверок.

Обозначим множество технических состояний объекта символом  $E$ , а  $e \in E$  обозначает исправное состояние объекта,  $e_i \in E$  неисправное.

Каждому  $i$ -неисправному состоянию соответствует неисправность  $s_i$  из множества  $S$ , и наоборот.

Для реализации математической модели построим прямоугольную таблицу (табл. 1), строками которой будут являться элементарные проверки  $\pi_j$  из множества  $\Pi$ , а столбцами – технические состояния объекта из множества  $E$  или, что то же самое, функции  $\Psi$  и  $\Psi^i$ ,  $i = 1, 2, \dots, |S|$ , реализуемые объектом, находящимся в исправном  $e$ -состоянии или  $i$ -неисправном  $e_i$  состоянии. Результат элементарной проверки находится на пересечении строки  $\pi_j$  и столбца  $e_i$ . Множество всех результатов элементарных проверок  $R_j^i$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, |\Pi|$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, |S|$  обозначим символом  $R$ . Таким образом, построенная таблица будет называться *функцией неисправностей объекта диагностирования*. Таблица может иметь большие размерности для сложных систем диагностирования, но обладает хорошей наглядностью и удобством при обсуждении и классификации принципов, а также основных процедур построения и реализации алгоритмов диагностирования, даже если эти принципы и процедуры первоначально формируются на языках, отличных от языка таблиц функций неисправностей. Как всякая математическая модель объекта диагностирования, таблица функций неисправностей нужна в следующих случаях: для построения алгоритмов диагностирования при разработке систем диагностирования и построения физической модели объекта при реализации этих систем.

Таблица 1

R		E				
		e	...	$e_i$	...	$e_{ S }$
Π	$\pi_1$	$R_1$	...	$R_1^i$	...	$R_{ S }^1$
	$\pi_2$	$R_2$	...	$R_2^i$	...	$R_{ S }^2$
	.	.		.		.
	.	.		.		.
	$\pi_j$	$R_j$	...	$R_j^i$	...	$R_{ S }^j$

Построить алгоритм по таблице функций неисправностей всех полных совокупностей  $T$  можно путем выполнения двух операций:

1) перебором всех возможных неупорядоченных пар столбцов таблицы выделить пары  $e_i, e_k$  технических состояний, принадлежащих разным под-

множествам  $E_v$ ,  $E_\mu$ , и для каждой такой пары перебором всех строк таблицы определить подмножества  $\Pi_{ik}$  элементарных проверок  $\pi_j$ , результаты  $R_j^i$  и  $R_j^k$  которых для технических состояний  $e_i$  и  $e_k$  будут различными;

2) перебором всех подмножеств  $\Pi_{ik}$ , полученных в результате выполнения первой операции, найти такие совокупности проверок  $T$ , чтобы в каждой из них для каждого подмножества  $\Pi_{ik}$  нашлась хотя бы одна элементарная проверка  $t_j$ , принадлежащая подмножеству  $\Pi_{ik}$ .

Математическую модель объекта диагностирования, содержащего  $n$  входов и  $m$  выходов, можно описать системой из  $m$  уравнений:

$$\begin{aligned} y_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n; \\ y_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n; \\ &\dots \\ y_m &= a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n; \end{aligned}$$

где  $x_i, y_i$  – значения  $i$ -го входного и выходного сигналов.

С помощью математической модели объекта контроля можно создать наиболее рациональные методы диагностирования конкретной системы в целом или отдельных её функциональных узлов и блоков.

Основными достоинствами аналитических диагностических моделей является их глубина и полнота описаний, но они сложны в расчётах и не обладают инженерной наглядностью. Чтобы устранить эти недостатки при разработке диагностических моделей используют графоаналитические модели.

Ориентированные графы дают одно из наиболее наглядных представлений объектов диагностирования. Если объект диагностирования можно описать системой линейных алгебраических уравнений, то его можно представить функцией-диаграммой прохождения сигналов на основе функциональных зависимостей между отдельными блоками. В основе любой функциональной схемы заложена логическая модель, с помощью которой ведётся построение графов. Любая функциональная или принципиальная схема локомотива может быть представлена в виде логической модели. Логическая модель строится на основе принципиальной электрической схемы. Для этого между функциональными блоками строятся логические связи в виде ориентированных графов со стрелками. Ориентированный граф обозначим символом  $G(X, V)$ , где  $X(x_1, \dots, x_n)$  и  $V(v_1, \dots, v_n)$  – соответственно множество вершин и дуг. С понятием «ориентированный граф» связан термин «отображение» (рис. 5). Отображение пока-

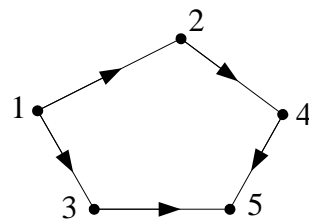


Рис. 5. Ориентированный граф

зывает, как вершина  $x_i$  отображается в других вершинах. Граф имеет отображение следующего вида:

$$\Gamma x_1 = \{x_2, x_3\}, \Gamma x_2 = \{x_4, x_5\}, \Gamma x_3 = \{x_5\}, \Gamma x_4 = \{x_5\}, \Gamma x_5 = \emptyset.$$

Последнее равенство указывает на отсутствие отображения. Отображение ориентированного графа  $G(x_i, \Gamma)$  позволяет наглядно проследить взаимное влияние предыдущих выходов на последующие и определить взаимное влияние параметров.

При рассмотрении некоторых задач диагностического анализа используется особый вид графа, который называется «деревом» (рис. 6). Особенность этого графа состоит в том, что в нём нет контуров и в вершину не заходит ни одна дуга. *Дерево* имеет вершины двух типов: вершины, из которых исходит хотя бы одна дуга, и вершины, из которых не исходит ни одной дуги. Вершина, в которую не заходит ни одна дуга, называется начальной, или *корнем дерева* ( $t_0; E$ ). Вершины, из которых не исходит ни одной дуги, называются *конечными*, или *висячими*. Остальные вершины дерева (зачернены) называются *внутренними*. *Рангом* вершины дерева называется число дуг пути, начинающегося в начальной вершине  $t_0$  и заканчивающегося в зависимости от рассматриваемой вершины.

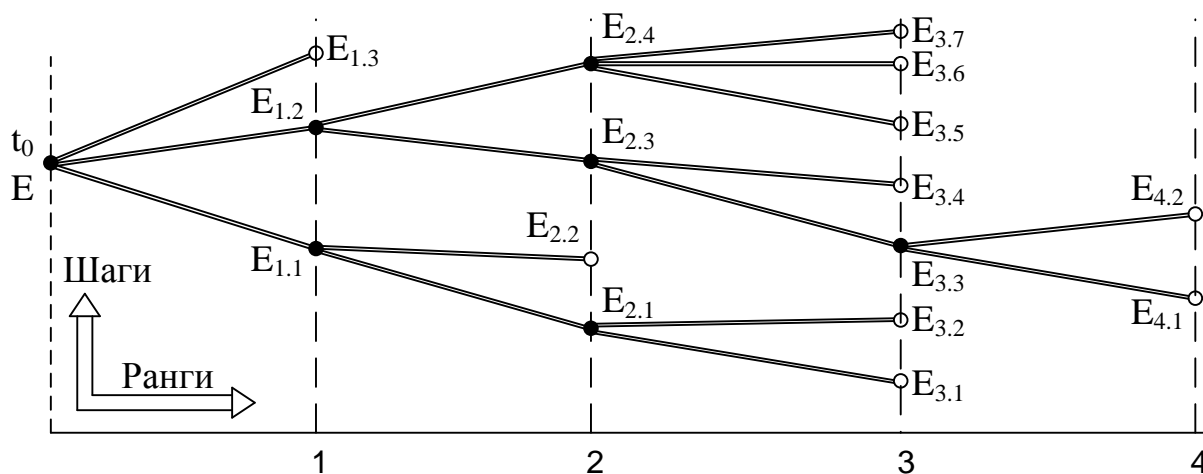


Рис. 6. Дерево диагноза

Рассмотрим, каким образом «дерево» представляет алгоритм диагностирования. В начальной вершине представлены элементарная проверка  $t_0$  и множество  $E$  всех возможных технических состояний объекта диагностирования. Элементарная проверка  $t_0$  имеет три возможных результата:  $a(t_0) = 3$  и тем самым разбивает множество  $E$  на три подмножества –  $E_{1.1}$ ,  $E_{1.2}$ ,  $E_{1.3}$ , не различаемых этой проверкой технических со-



стояний. Первые два из этих подмножеств относятся к внутренним вершинам ( $E_{1.1}$  и  $E_{1.2}$ ) и поэтому подлежат дальнейшему разбиению элементарными проверками  $t_{1.1}$ ,  $t_{1.2}$  соответственно. Третье подмножество  $E_{1.3}$  представляет собой висячую вершину и поэтому разбиение его на подмножества алгоритмом диагностирования не предусмотрено. Далее элементарная проверка  $t_{1.2}$  разбивает подмножество  $E_{1.2}$  на два подмножества  $E_{2.4}$ ,  $E_{2.3}$ , которые в свою очередь разбиваются на три и четыре подмножества с висячими и внутренними вершинами. Аналогично рассматриваются и другие множества и вершины дерева.

Таким образом, дерево имеет четыре ранга, а в каждом ранге от двух и до семи шагов. В каждом ранге все множества считаются равнозначными при выполнении элементарных проверок по единому принципу, а алгоритм диагностирования, представленный таким деревом, называется *безусловным*. Если же в дереве найдётся хотя бы один ранг с несколькими внутренними вершинами, которые представлены разными методами их элементарной проверки, то алгоритм диагностирования, представляемый этим деревом, называется *условным*. То есть в условных алгоритмах диагностирования выбор или назначение некоторых или всех элементарных проверок проводится с учётом результатов предыдущей уже реализованной элементарной проверки. Достоинством безусловных алгоритмов является их простота представления в средствах диагностирования, так как необходимо хранить лишь состав элементарных проверок множеств и единственную последовательность их реализации. Для условных же алгоритмов необходимо хранить, кроме состава элементарных проверок множеств состояний, не одну, а несколько последовательностей реализации элементарных проверок.

#### **1.4. Методы диагностирования локомотива**

Для диагностирования технического состояния локомотивов, их систем, узлов и агрегатов используются различные методы. Многообразие методов диагностирования обусловлено в основном двумя причинами: сложностью систем диагностирования, определяемой сложностью структуры локомотивов как объекта диагностирования и разнообразием задач технического диагностирования, вытекающих из требований, предъявляемых к обслуживанию и ремонту локомотивов.

Методы диагностирования локомотивов различаются в зависимости от комбинации признаков, характеризующих особенности структуры и взаимодействия трёх основных частей системы технического диагности-

рования: объекта диагностирования, системы сбора, преобразования и передачи информации и системы обработки, накопления и отображения результатов диагностирования (рис. 7).

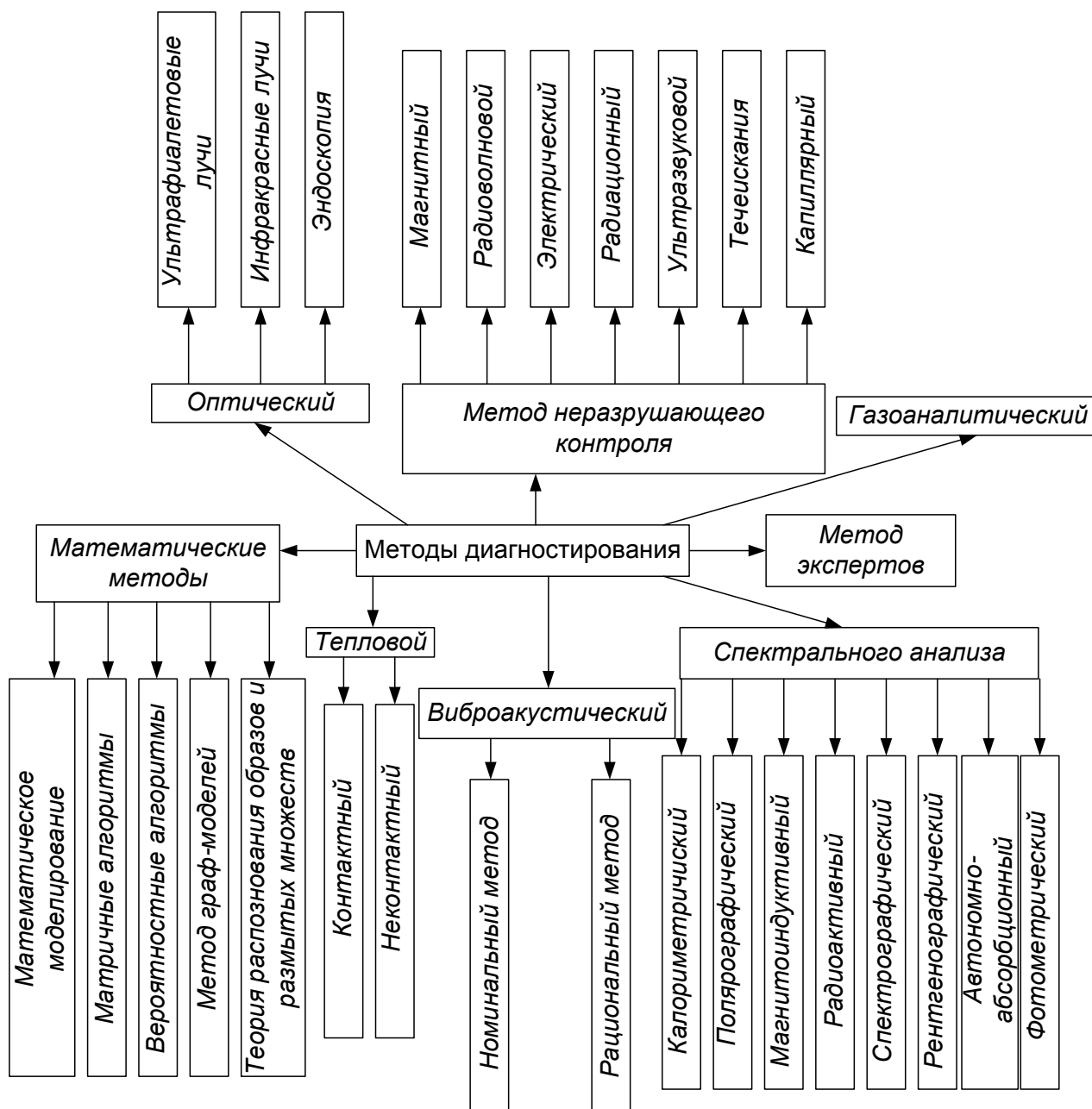


Рис. 7. Структурная схема классификации методов диагностирования

Чаще всего методы диагностирования локомотивов различают в зависимости от физической природы контролируемых процессов и диагностических параметров [1, 2, 6, 7].

#### 1.4.1. Метод экспертов

На этапе создания и доводки опытных образцов основным методом диагностирования сложных изделий является метод экспертов. Надёжность локомотивов, их долговечность и рентабельность во многом зависят от качества их изготовления, уровня механизации и автоматизации технологического процесса изготовления отдельных деталей, а также от уровня их обслуживания и ремонта. Поэтому в процессе опытной эксплуатации партии локомотивов проводится анализ дефектов, выясняются причины отказов, условия их появления и влияние их на общее техническое состояние локомотива. Вся эта работа выполняется экспертно-технической комиссией, которая создаётся из опытных специалистов, занимающихся разработкой, изготовлением и эксплуатацией локомотивов. После проведённого анализа дефектов и их причин разрабатывается методика, направленная на их устранение. Необходимо заметить, что метод экспертов субъективен, так как не всегда можно получить достоверную информацию о причинах появления дефекта в силу ограничения человеческих возможностей при обработке поступающей информации. Многие дефекты одних деталей сопутствуют их появлению в других деталях локомотива, что вызывает дополнительные субъективные погрешности.

Итак, метод экспертов – это анализ рабочих параметров и диагностических признаков человеком-экспертом, т.е. это – измерение их приборами, анализ и постановка диагноза. Данным методом пользуются при анализе и разработке более совершенных методов диагностирования, при выборе диагностических параметров и разработке систем диагностирования, используя при этом автоматические и микропроцессорные устройства.

#### 1.4.2. Математические методы

Существующие математические методы, применяемые в технической диагностике, подразделяются на два больших класса: 1) математическое моделирование диагностических процессов и 2) применение различных теорий (теория распознавания образов, теория множеств и т.д.). Наиболее эффективно математическое моделирование применяется при определении неисправностей в устройствах на электронных элементах. При диагностировании сложных динамических объектов, каким является локомотив, использование математического моделирования затруднено из-за сложности определения аналитических зависимостей, связывающих внешние признаки и соответствующие им неисправности в деталях объекта. Математическое моделирование позволяет сократить и удешевить процесс диагностирования, выбрать наиболее информативные ди-

агностические параметры, проводить накопление информации в аналитической форме для прогнозирования технического состояния объекта.

Большое распространение при построении систем диагностирования получили *табличные* (матричные) алгоритмы, особенно, если объект диагностирования имеет небольшой набор диагностических параметров. Чаще всего табличные алгоритмы применяются для предварительного диагноза, так как устройства диагностирования могут работать только по жёсткой программе – детерменистской логике. Простота детерменистской логики не позволяет во многих случаях поставить достоверный диагноз, так как необходимым условием, с одной стороны, является полное совпадение диагностических параметров, а с другой – отсутствие признаков, но не наличие их в матрице. Табличные алгоритмы легко можно реализовать на релейных элементах, диодных матрицах или микропроцессорных устройствах.

*Аналитические модели* позволяют решать оптимизационные задачи и получать соотношения между состояниями объекта, диагностическими параметрами и показателями качества в аналитическом виде. Аналитическими моделями являются различные функции, связывающие между собой внешние и внутренние параметры элементов системы и выходные виды:  $Z_{\text{вых}} = \Psi(X; Y_{\text{нач}}; t)$ . В процессе работы объекта меняются внешние и внутренние параметры, следовательно, происходит изменение выходных параметров. Решив функциональные уравнения зависимостей, можно выявить техническое состояние объекта в произвольный промежуток времени, учитывая при этом изменения внешних и внутренних параметров. При реализации аналитических моделей технического состояния объекта наиболее перспективным направлением является использование микропроцессорных устройств.

При разработке математической диагностической модели необходимо учитывать вероятность появления отказов и законы распределения отказов по времени работы или по пробегу локомотивов. При решении данной задачи необходимо использовать *вероятностные* алгоритмы, основанные на вероятности возникновения определённых дефектов при наличии определённых диагностических параметров. Как правило, при определении возникновения дефектов пользуются формулой Байеса:

$$P(A/B) = \frac{P(A)P(B/A)}{P(C)P(B/C)},$$

где  $P(A/B)$  – вероятность того, что при наличии суммы диагностических параметров  $B$  имеется дефект  $A$ ;  $P(A)$  – вероятность дефекта  $A$  при случайном выборе диагностических параметров;  $P(B/A)$  – известная из опыта вероятность наличия суммы диагностических параметров  $B$  при возникновении дефекта;  $P(C)P(B/C)$  – сумма произведений вероятностей каждого из рассматриваемых дефектов вероятности данной суммы признаков каждого из дефектов.

Таким образом, существуют возможность формализовать логический процесс анализа дефектов при несовпадении всех диагностических параметров по вероятностному алгоритму.

Метод *граф-моделей* основан на использовании теорий отношений и теории графов. Применение этого метода позволяет значительно сократить объём вычислений при достаточной точности решения. Задачу технической диагностики, связанную с построением программы поиска неисправностей и контроля работоспособности, можно отнести к задачам математического программирования. Одним из вариантов решения задач математического программирования является метод «ветвей и границ».

Преимущество данного метода заключается в том, что для него не требуется точных количественных соотношений между параметрами. Топологическая модель позволяет описать работу сложного объекта в целом и даёт возможность лёгкого построения модели в случае конструктивных изменений в объекте.

При решении логических задач технического диагностирования иногда наиболее эффективной оказывается *теория распознавания образов*. Под термином «образ» подразумевается совокупность воспринимаемых параметров объектов или явлений, принадлежащих одному классу. Параметры образа могут меняться, тогда как образ будет относиться к одному и тому же классу. Задача теории состоит в том, чтобы построить узнающую систему, которая по описанию произвольного объекта из начального множества устанавливала бы его принадлежность к соответствующему классу. Техническую диагностику можно считать частным случаем теории распознавания образов, согласно которой сначала устанавливаются варианты различаемых состояний, а затем выбирают такие признаки, по которым можно судить о том, какой из установленных вариантов состояния имеет в данный момент диагностируемый объект.

Частным случаем решения задачи распознавания образов является задача распознавания *размытых множеств*. Обнаружение дефектов в объекте на основе теории размытых множеств осуществляется следующим образом: составляется граф-модель и проводится предварительная минимизация числа точек снятия диагностической информации; определяется значение контролируемых параметров; определяются техническое состояние и значение функций принадлежности к заранее составленному перечню классов состояний; определяется к части состояний, соответствующей неизвестной входной ситуации, поиском наибольшей степени разделимости классов.

#### 1.4.3. Виброакустические методы диагностирования

Эти методы диагностирования получают широкое распространение в локомотивном хозяйстве, так как не требуют разборки агрегатов и узлов локомотивов. Методы основаны на процессах, возникающих в узлах

трения и сопряжения во время рабочего режима. Работа узлов, как правило, сопровождается шумами и колебаниями, по которым обслуживающий персонал определяет техническое состояние объекта, вслушиваясь в работу каждого узла. Вибрация механизма – его реакция на действие приложенных возмущающих сил. Обычно на механизмы одновременно воздействует несколько различных сил, приводящих его в такое состояние, когда нарушается равновесие, возникают посторонние шумы, удары, усиливается вибрация. Причинами неисправностей могут быть максимальные перемещения, скорости или ускорения вибрации, максимальные значения деформации, напряжения или усилия. В процессе работы узла неисправность даёт о себе знать усиленной вибрацией или колебаниями. Различные дефекты имеют колебания разной частоты.

Существуют несколько причин, вызывающих колебания механизма. Одна из них связана с неуравновешенностью движущихся деталей. Она вынуждает механизмы колебаться как единое целое относительно положения равновесия. Эти колебания характеризуются низкими частотами, сравнительно большими амплитудами перемещения и малыми ускорениями. Зависимость частоты вибрации от скоростного режима механизма является характерным признаком этого вида колебаний, позволяющим их легко обнаружить и выделить. Основная частота вибрации механизма равна частоте вращения вала, на котором находится несбалансированная масса.

Амплитуда вибрации пропорциональна квадрату угловой скорости вращения вала и зависит от массы механизма и жёсткости крепления его к основанию.

Вторым источником колебаний механизма являются соударения его деталей, вызванные увеличенными зазорами. Эти колебания характеризуются более высокими частотами колебаний, малыми амплитудами смещения и значительными ускорениями. Чаще всего детали и узлы испытывают простые синусоидальные колебания, которые характеризуются тремя связанными между собой величинами: колебательными смещениями  $x(t)$ , скоростью  $V(t)$  и ускорением  $a(t)$ . Если колебание имеет форму чисто поступательного движения тела вдоль только одной оси, то мгновенное значение каждой из её координат называется перемещением и определяется по формуле

$$x = X_{\max} \sin (2\pi/T)t = X_{\max} \sin \pi ft,$$

где  $X_{\max}$  – амплитуда колебательного смещения;  $T$  – период колебаний;  $f = 1/T$  – частота колебаний;  $t$  – текущее значение времени.

Скорость  $V(t)$  и ускорение  $a(t)$  гармонического колебания находятся дифференцированием уравнения перемещения  $x$  во времени  $t$  и определяются по соотношению

$$V = dx/(- dt) = \omega X_{\max} \cos \omega t = V_{\max} \cos \omega t,$$

где  $V_{\max} = \omega X_{\max}$ ;

$$a = dv/dt = -\omega^2 X_{max} \sin \omega t = A_{max} \sin(\omega t + \pi),$$

где  $A_{max} = \omega^2 X_{max}$  – амплитуда колебаний.

Появление отклонений в работе узлов и механизмов приводит к изменению периодичности колебаний. Они становятся иногда непредсказуемыми и имеют случайные величины. Для получения полных характеристик таких колебаний необходимо вести постоянное наблюдение с последующими записями информации и результатов её обработки.

Поэтому при наличии набора различных колебаний в узле можно с помощью датчиков виброколебаний и фильтров частот определить степень износа той или иной детали (рис. 8). Если раньше техническое состояние определяли с помощью стетоскопа или простой палочки, один конец которой приставляли к корпусу узла, а другой – брали в зубы, получая при этом довольно точную информацию, то посредством современных вибродатчиков с элементами электроники и микропроцессорными устройствами можно получить наиболее полную и достоверную информацию за небольшой промежуток времени.

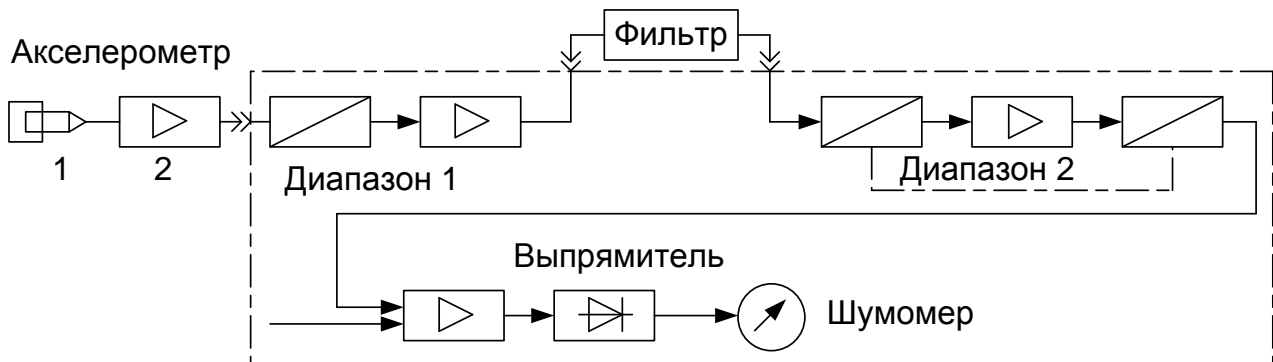


Рис. 8. Структурная схема виброизмерительного устройства: 1 – датчик виброколебаний; 2 – предварительный усилитель сигнала

Необходимо помнить, что виброакустические методы обладают рядом преимуществ перед другими. Они позволяют получить наиболее полную информацию о состоянии объекта. Акустический сигнал обладает большой информативностью, поэтому для получения наиболее полного диагностирования объекта требуется небольшое число датчиков. И последнее – это быстроедействие приборов. Сигналы, поступающие в материал механизма, в виде упругих волн приходят к датчику колебаний, который превращает их в электрический сигнал и направляет его в аппаратуру диагностирования.

#### 1.4.4. Тепловой метод

Этот метод основан на анализе теплового излучения деталей, элементов или устройств при их функционировании. Интенсивность теплового излучения зависит от электрических параметров электроаппарату-

ры и электрических машин, а также от скрытых дефектов в узлах с трением и сопряжением деталей. Изменение характеристик теплового излучения свидетельствует об изменении режима работы устройства. Для отдельных деталей и элементов увеличение интенсивности их теплового излучения связано с локальными тепловыми перегревами, что обусловлено наличием дефектов или неоднородностей. Своевременное обнаружение этих дефектов позволяет принять меры по предупреждению выхода из строя деталей и устройства в целом.

Тепловые методы по способу получения информации об интенсивности излучения делятся на контактные и неконтактные.

К *контактным* методам относят:

- метод измерения с помощью термопар. Он достаточно прост, хорошо отработан, благодаря малому быстродействию позволяет замерять температуру в локальных точечных участках;

- метод температурно-чувствительных красок. Он прост и удобен, но обладает необратимостью процессов и дискретностью индикации значений температуры;

- метод с использованием жидкокристаллической индикации. Он основан на свойстве жидкокристаллических соединений приобретать окраску в зависимости от температуры среды. С их помощью можно измерять разность температур 0,1 °С. При помощи ряда холестерических жидкокристаллических соединений проводится измерение температуры от плюс 10 до плюс 100 °С;

- методы, основанные на использовании свойства фотографических эмульсий изменять скорость проявления цветовой гаммы в зависимости от температуры.

*Неконтактные* методы измерений характеристик теплового поля основаны на свойствах тел излучать электромагнитную энергию, пропорциональную их температуре. Они подразделяются на методы с одновременной и последовательной регистрацией теплового излучения. Последовательный метод заключается в фиксации теплового излучения, преобразовании его в электрический сигнал, с последующим его усилением и регистрацией. Развёртка луча приёмника-преобразователя осуществляется механической, оптико-механической или фотоэлектронной системой. Для регистрации тепловых лучей используют радиометры, микрорадиометры, балометры, тепловизоры и другие устройства.

К основным техническим параметрам приёмных устройств относятся: порог чувствительности – минимальное значение обнаруживаемого теплового потока; значение выходного сигнала на единицу потока падающего излучения; инерционность приёмника, определяемая его постоянной времени.

Порог чувствительности

$$P_{\min} = ES_n / [(V_c / V_\omega) \Delta f],$$



где  $E$  – плотность падающего на приёмник излучения, Вт/см<sup>2</sup>;  $S_n$  – площадь приёмника, см<sup>2</sup>;  $V_c/V_\omega$  – отношение выходного сигнала к тепловому шуму;  $\Delta f$  – частота излучения, Гц.

Обычно порог чувствительности измеряется при воздействии на приёмник излучения чёрного тела с температурой плюс 300 °С для неохлаждаемых и плюс 100 °С для охлаждаемых приёмников. Тепловой метод используется при диагностировании узлов с трением деталей на локомотивах, электрических контактов, полупроводниковых приборов (диодов и тиристоров), электронных устройств и др.

#### 1.4.5. Методы спектрального анализа

В процессе работы узлов, подвергающихся трению или сопряжению деталей, происходит их износ. Для уменьшения износа и удаления продуктов износа применяют различные масла и смазочные материалы. Поэтому о состоянии узлов и деталей можно судить по концентрации продуктов износа, используя физико-химический анализ масел и смазочных материалов. Чем больше концентрация продуктов износа, тем сильнее происходит износ деталей в узлах. Если пробы масел выполнять через определённый промежуток времени, то, используя элементы математической статистики, можно определить скорость накопления в смазочном материале продуктов износа, а по ним – износ деталей. Применяя математический метод экстраполяции, можно построить кривую износа, прогнозируя при этом момент предельного состояния деталей. Износ деталей и сопряжений оценивается по результатам спектрального анализа смазочного материала на продукты износа.

Иногда в смазочном материале можно найти и продукты неполного сгорания топлива, что позволяет с помощью спектрального анализа определить состояние таких узлов, как поршни дизеля, колец и др.

Методом спектрального анализа можно определить техническое состояние моторно-осевых подшипников, буксовых подшипников и других узлов с деталями трения.

Известно несколько методов количественного определения продуктов износа в масле (смазочном материале). Наибольшее распространение получили следующие: калориметрический; полярографический; магнитоиндуктивный; радиоактивный; спектрографический; рентгенографический; атомно-абсорбционный; фотометрический. В основе всех методов количественного спектрального анализа лежит зависимость между интенсивностью спектральной линии излучения того или иного элемента и концентрацией этого элемента в анализируемой пробе.

Для получения достоверных данных при диагностировании методами спектрального анализа необходимо иметь большой набор эталонных параметров при проверке буксовых, моторно-осевых подшипников и дизельного масла.

*Калориметрическим* методом можно определять техническое состояние объекта по параметрам масла. При этом пробу масла анализируют в лаборатории на содержание железа, меди и алюминия, а затем сравнивают с предельно допустимыми параметрами.

*Радиоактивный* метод заключается в том, что устанавливаются детали, активированные радиоактивными изотопами. По мере износа деталей радиоактивные частицы попадают в масло картера, где отбираются, анализируются и определяется интенсивность износа узлов трения.

*Рентгенографический* метод позволяет проводить не только анализ масла, но и структуру поверхностного состояния деталей трения. В основе использования этого метода лежит способность рентгеновских лучей проникать в поверхностные слои металла с последующим их анализом: пучок рентгеновских лучей скользит по поверхности изношенной детали, анализируя послойно её техническое состояние. Таким образом, с помощью рентгеновских лучей можно более достоверно и объективно оценивать состояние масла и его влияние на процесс износа в узлах с деталями трения. Это позволяет прогнозировать остаточный ресурс, а также даёт возможность правильно подбирать масла.

*Атомно-абсорбционный* метод анализа основан на изучении атомных спектров резонансного поглощения. Атомы способны не только излучать свет определённой длины волны, но и поглощать его. Особенно эффективно поглощается свет той длины волны, которая соответствует переходу атома в возбуждённое состояние с основного нижнего энергетического уровня (так называемое резонансное поглощение). Атомно-резонансное поглощение связанное со строением атома, является его характеристикой, что и положено в основу анализа.

Чтобы добиться атомно-резонансного поглощения, необходимо задать резонансное излучение, соответствующее спектру искомого элемента, и пропустить его через атомизированную пробу. Если измерить исходное излучение до прохождения пробы и после неё, то, при наличии искомого атомов в пробе, первоначальное излучение уменьшится из-за поглощения данного элемента, причем в тем большей степени, чем больше искомого элемента в пробе. По уменьшению интенсивности заданного излучения можно судить о количестве искомого элемента. Так как природа происхождения процессов поглощения и излучения (при эмиссионном анализе) различна, то и возможности спектральных методов, основанных на этих явлениях, также не одинаковы. Наиболее точные показания и надёжные результаты даёт атомно-абсорбционный метод. Его чувствительность в 1000 раз превышает эмиссионный метод. Этим методом легко определяется даже атом искомого элемента из миллиона атомов в рассматриваемой пробе.

Эмиссионные и атомно-абсорбционные спектры можно получить, используя атомизатор – высокотемпературный источник света (рис. 9), в

который вводится исследуемая проба масла для разрушения молекулы до атомарного состояния. В качестве источника тепла можно использовать любой горючий газ. Для получения атомно-абсорбционного спектра применяют спектрофотометр С-302 или эмиссионные квантометры МФС-3, МФС-5. Спектрофотометр С-302 имеет небольшие размеры, пробу масла в который необходимо подавать в распылённом виде.

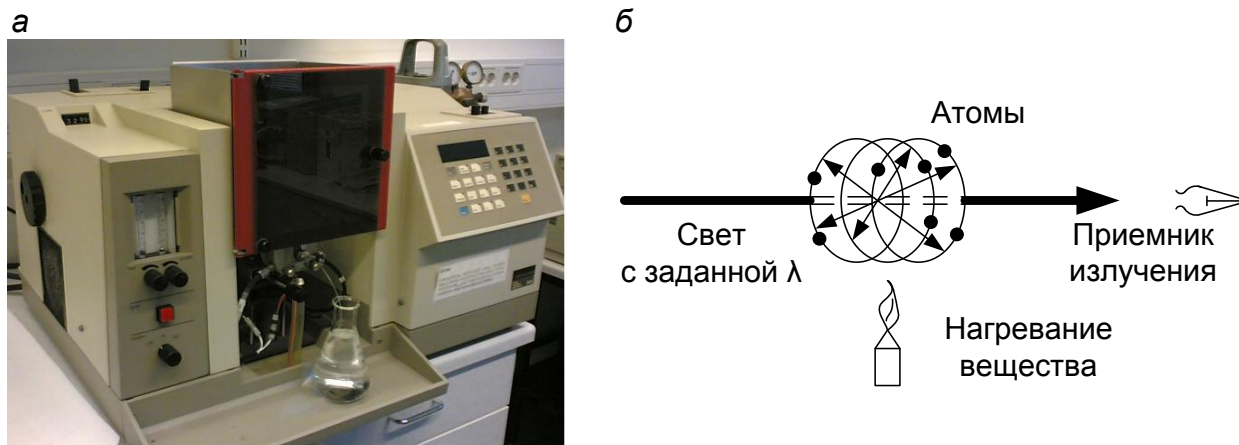


Рис. 9. Схема получения атомно-абсорбционных и эмиссионных спектров:  
а – внешний вид прибора; б – структурная схема

Рассмотрим атомно-эмиссионные спектрометры с индуктивно-связанной плазмой (ИСП). Для работы с ИСП-атомноэмиссионными спектрометрами и ИСП-масс-спектрометрами анализируемый объект погружается в раствор. Однако иногда требуется провести анализ «на лету», не тратя время на вскрытие пробы, или изучить распределение элементов в образце. В таких случаях для ввода твёрдых проб в спектрометр применяются лазерноабляционные приставки (рис. 10).

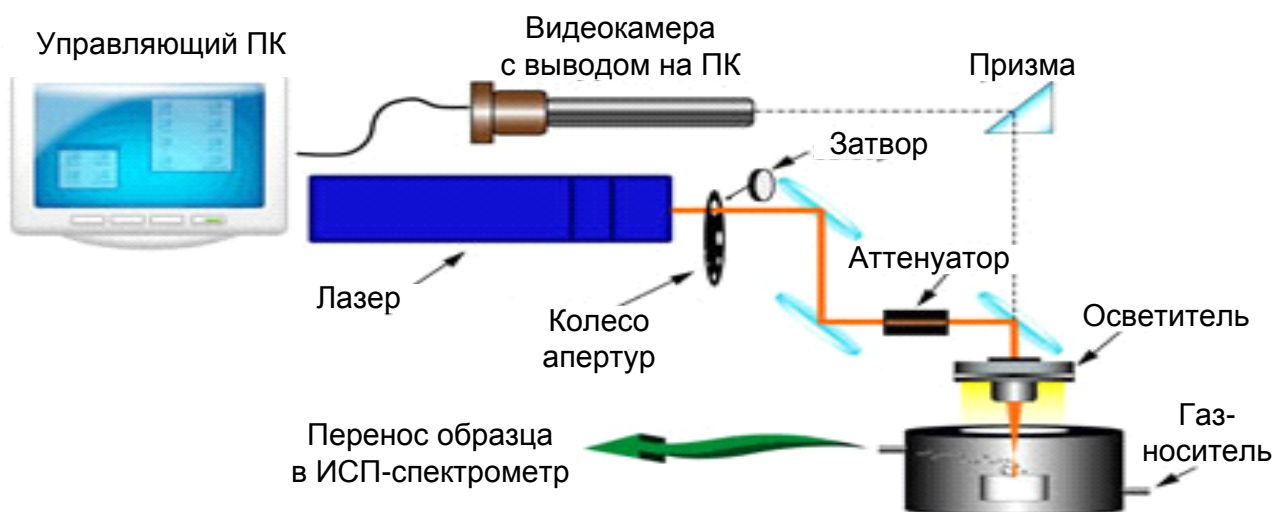


Рис. 10. Схема получения атомно-абсорбционных и эмиссионных спектров

Суть метода состоит в том, что с поверхности образца с помощью лазерного импульса испаряется некоторое количество вещества, которое с помощью инертного газа-носителя переносится в плазменную горелку ИСП-спектрометра. В результате можно получить информацию о концентрации элементов как в отдельных точках образца, так и по всей поверхности (рис. 11).

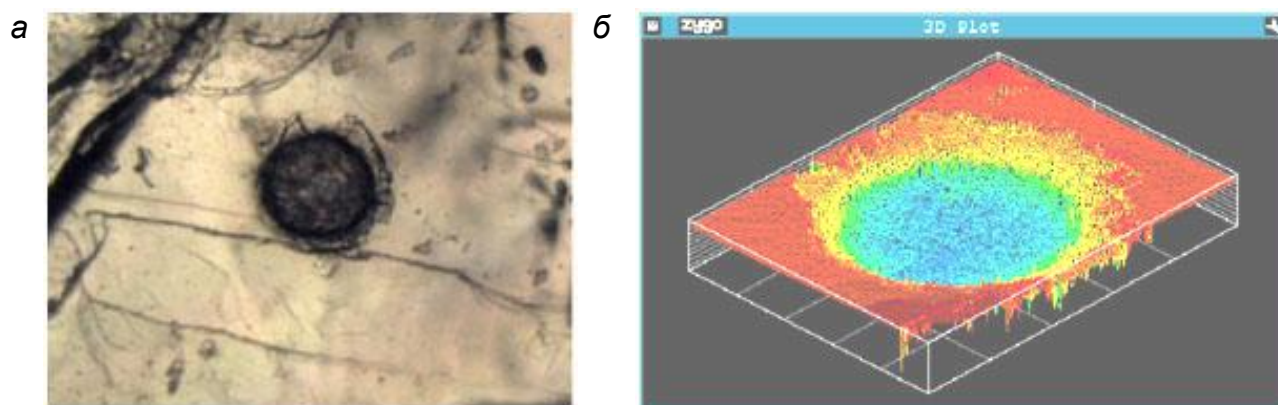


Рис. 11. Пример использования лазерно-абляционной системы для анализа флюорита с помощью ИСП-масс-спектрометра: а – изображение в «видимом» свете; б – распределение примесей на том же участке

В зависимости от типа решаемых задач ИСП-спектрометры могут быть укомплектованы лазерно-абляционными приставками, различающиеся типом используемого лазера и наличием оптического микроскопа, позволяющего выбирать точку для анализа и автоматизированного предметного столика.

#### 1.4.6. Метод диагностирования по параметрам газоздушного тракта

Этим методом диагностируется скорость потока воздуха, его температура, давление, а также химический состав выхлопных газов. Имея эталонные данные указанных параметров, можно определить техническое состояние дизельных и карбюраторных двигателей. Этот метод нашёл применение при диагностировании тепловозных дизелей.

#### 1.4.7. Оптические методы

Одним из наиболее распространённых методов обнаружения дефектов в конструкции является визуальный осмотр. Однако для осмотра труднодоступных узлов и деталей необходима полная или частичная

разборка, а иногда и разрушение детали. Для того, чтобы расширить возможности проверки технического состояния различных резервуаров, трубопроводов, необходимо использовать оптические средства. К ним относятся эндоскопы, перископические дефектоскопы, но наибольшее распространение получают жёсткие и гибкие эндоскопы. Жёсткие эндоскопы имеют цилиндрическую конструкцию, внутри которой располагаются линзы и механизм настройки. Основой гибких эндоскопов являются светопроводящие волокна, из которых формируются световодные жгуты (рис. 12). Обычный волоконно-оптический эндоскоп состоит из источника света; двух световодных жгутов, один из которых предназначен для передачи изображения, а другой – света; окуляра и микрообъектива, соединённого с торцом световодного жгута. В локомотивных депо нашли применение жёсткие линзовые и гибкие эндоскопы.

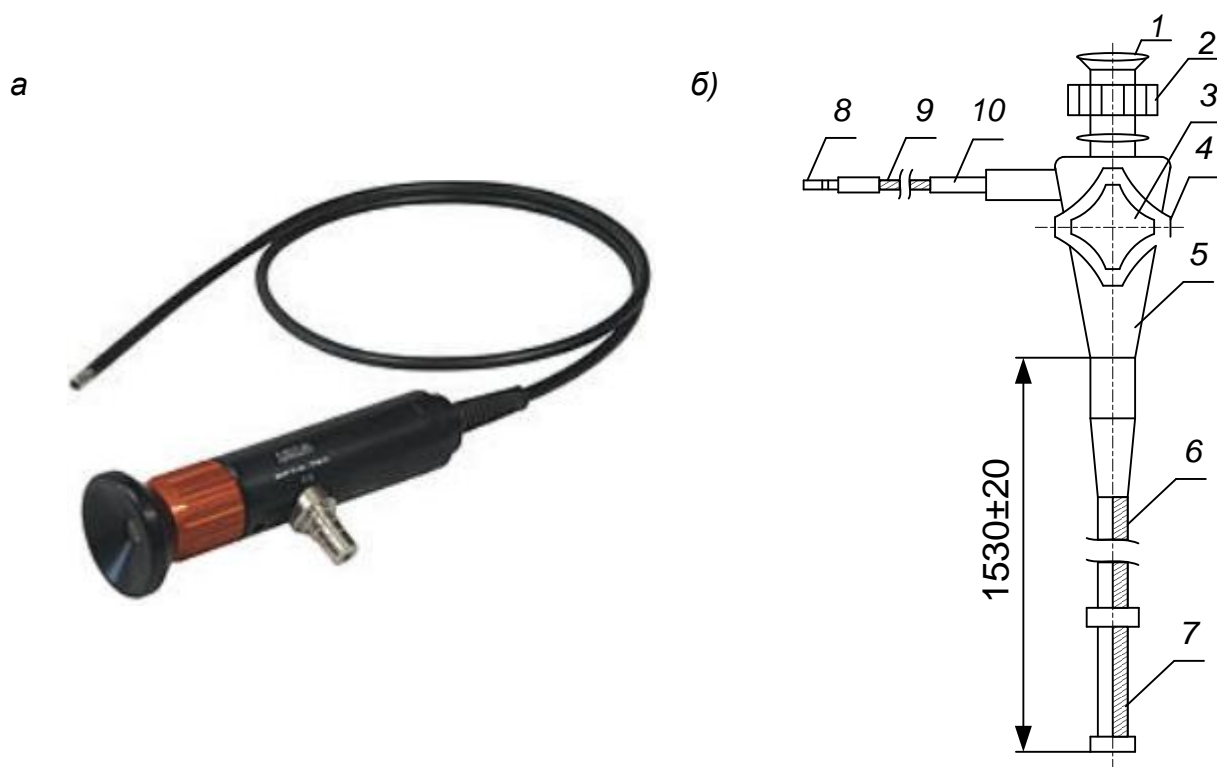


Рис. 12. Гибкий эндоскоп: а – внешний вид; б – структурная схема: 1 – окуляр; 2 – кольцо наводки; 3 – рукоятка малая для управления изгибом дистальной части; 4 – большая рукоятка; 5 – корпус; 6 – гибкая рабочая часть; 7 – управляемая дистальная часть; 8 – штуцер гибкого световода подсветки; 9 – гибкий кабель; 10 – эластичные конусные втулки

#### 1.4.8. Методы неразрушающего контроля

Физические методы неразрушающего контроля позволяют обнаруживать не только явные дефекты, но и скрытые, для выявления которых в существующей документации не предусмотрены соответствующие правила, методы и средства. По этим методам можно контролировать геометрические параметры деталей, анализировать структуру и физико-химические свойства материала, соответствие их стандарту.

Различают следующие виды неразрушающего контроля: оптический, капиллярный, акустический, магнитный, радиационный, радиоволновый, тепловой, электрический, электромагнитный и течеискание. В локомотиворемонтной практике наиболее широкое применение находит магнитная и ультразвуковая дефектоскопия. Капиллярная дефектоскопия сводится в основном к окунанию деталей в дизельное топливо или смесь топлива с маслом с последующей меловой обмазкой. Этим способом можно обнаружить трещины значительных размеров. Для выявления незначительных трещин используется белая проявляющаяся краска. Этот вариант даёт возможность обнаруживать трещины шириной до 0,001 мм и глубиной 0,03 мм. Цветная дефектоскопия требует много времени, но этот недостаток компенсируется её простотой. Люминесцентная дефектоскопия по технологии применения аналогична цветной, но в качестве проникающей жидкости используют авиационное или трансформаторное масло, продукты переработки нефти, которые при облучении их ультрафиолетовыми лучами начинают светиться, обозначая контуры дефекта.

Для обнаружения трещин в таких деталях, как секции холодильников, теплообменники, воздушные резервуары тормозной системы и другие, в ремонтной практике применяется метод течеискания. Он может быть вакуумным или компрессионным. В депо чаще применяется компрессионный пузырьковый метод, чувствительность которого зависит от набора газа и жидкости. В качестве газа используется водород, а жидкость должна иметь небольшое поверхностное натяжение.

Перечисленные методы дают возможность обнаружить дефекты ещё на стадии зарождения, что ведёт в свою очередь к высокой эффективности ремонта и более надёжной работе локомотива. Они доступны для массового применения, просты, обладают достаточной достоверностью, но применимы только в условиях ремонта, поскольку затруднительна передача информации в устройства обработки и хранения.

## 1.5. Выбор диагностических параметров

Разработка и внедрение эффективных методов диагностирования должны сопровождаться выбором диагностических параметров, который зависит от многих требований, предъявляемых к системе технического диагностирования. К наиболее важным требованиям можно отнести: цель диагностирования, стратегию технического обслуживания, время, стоимость средств и самого процесса, с учётом простоя диагностируемого объекта в режиме диагностирования. Выбранный диагностический параметр должен: обладать достаточной информативностью; мгновенно реагировать на любые изменения, происходящие в диагностируемом объекте; иметь хороший доступ к его измерению; обладать высокой помехозащищённостью и достоверностью, способностью к преобразованию при использовании автоматических средств обработки информации. Большое количество диагностических параметров позволяет получить достаточную глубину поиска неисправности, но вместе с тем ведет к удорожанию диагностирования. Поэтому при разработке систем диагностирования необходимо решить задачу оптимизации диагностических параметров, средств диагностирования и потребляемой ими мощности [1, 2, 8].

Для более глубокого диагностирования следовало бы выбрать максимальное число параметров, но это снижает надёжность системы диагностирования. Поэтому в качестве критерия построения системы диагностирования можно выбрать или некоторый экономический показатель, или показатель достаточной глубины поиска неисправностей. Чаще всего учитываются оба эти показателя при определении оптимального варианта системы диагностирования. Набор параметров объекта диагностирования будет оптимальным при условии, что, во-первых, их контроль будет достаточен для обнаружения отказа любого из узлов локомотива и, во-вторых, за время эксплуатации подвижного состава будет обеспечиваться максимальное снижение отказа, особенно тогда, когда диагностирование предотвращает аварийное состояние локомотива.

Выбор диагностических параметров следует начинать с анализа причин отказа, а также факторов, влияющих на диагностируемый объект. Например, для диагностирования буксы локомотива необходимо выбрать те параметры, отклонение которых от допустимых значений приводит её в аварийное состояние. Это, прежде всего, температура внутри буксы и шум. Температура внутри буксы зависит от качества и количества смазочного материала  $K_{см}$ , качества сборки ( $K_{сб}$ ), состояния подшип-



ников и лабиринтных колец  $K_{\Pi}$ . Как видим, отклонение от допустимых требований любого параметра приводит к повышению температуры:  $T_6 = f(K_{CM}, K_{сб}, K_{\Pi})$  (рис. 13).

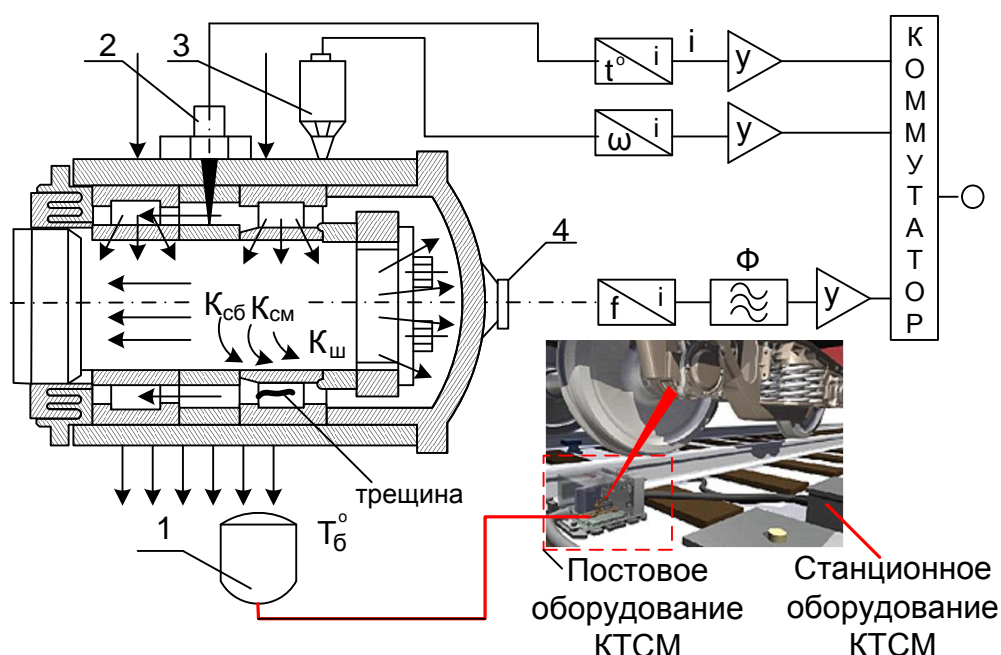


Рис. 13. Формирование диагностирующих сигналов в буксе колесной пары: 1 – напольный датчик (балометр) прибора обнаружения нагретых букс (КТСМ); 2 – температурный датчик; 3 – датчик виброперемещений корпуса буксы; 4 – шумомер

Шум в буксе может быть причиной некачественной сборки; технического состояния подшипников и лабиринтных колец. По мере нарастания износа в подшипниках или появления таких дефектов, как трещины, отколы, электроожоги, характер шума изменяется, появляются посторонние удары, вызванные увеличивающимися зазорами. В принципе шум – это последствия вибрации или колебаний, которые возникают внутри буксы в процессе работы роликов, внешних и внутренних колец подшипника, сепаратора. При отсутствии износа и дефектов в подшипниках шум в буксе будет незначительным, но при появлении хотя бы одного дефекта тональность его меняется. Следует отметить, что каждый дефект имеет свой, только для него характерный шум, а точнее, свою частоту колебаний:  $K_{ш} = f(K_{сб}, K_{\Pi})$ . Наибольшей информативностью обладает такой параметр, как температура буксы  $T_6$ , он контролирует три параметра, а коэффициент шума  $K_{ш}$  – всегда только два. При этом следует учитывать то, что контроль за смазочным материалом проводится периодически при ремонте и осмотре без разборки буксы, тогда как контроль за техническим состоянием подшипников и лабиринтных колец требует уже полной разборки, а это возможно только при текущем ремонте. К тому же наличие шума сигнализирует о начале возникновения дефекта внутри буксы, да и то только после того, когда дефект достигает определённого размера и начинается рост температуры.



Из этого следует, что в качестве диагностического параметра предпочтительнее использовать шум. Его легко измерить, преобразовать и информацию о нём направить на обработку. Аналитический метод выбора параметров требует большого опыта и наличия статистических данных о причинах отказов и их видах. Несмотря на это, данный метод находит всё большее распространение при разработке средств диагностирования локомотивов, которые отличаются продолжительностью сроков работы.

#### 1.5.1. Определение числа совокупных параметров

Определение работоспособного состояния объекта является одной из наиболее важных задач. Локомотив после проведения диагностирования, направленного на отыскание и устранение дефекта, должен выполнять заданные функции.

При выборе минимального количества диагностических параметров, которые будут достаточны для контроля исправности объекта диагностирования или размещения контрольных точек, необходимо составить блочно-функциональную модель (рис. 14, а), блоки которой должны иметь входные и выходные связи. Представим эту модель в виде ориентированного графа (рис. 14, б), вершины которого есть элементы, по своему физическому смыслу представляющие диагностические параметры. Совокупность вершин ориентированного графа составляет совокупность диагностических параметров. Теория графов позволяет минимизировать эту совокупность  $\sum U_i$  путем преобразования графа. Для каждого множества вершин  $U$  существует так называемое наименьшее внешнее устойчивое множество, в которое заходят все дуги из всех остальных вершин. Ориентированный граф выходов преобразуется в простой граф, у которого каждая вершина  $U_i$  отображена в вершину  $U_j$ , а для каждой дуги  $(U_i, U_j)$  образуется дуга  $U_j, U_i$ . Затем простой граф упрощается: из него удаляются вершины  $U_i, U_j$ , имеющие висячие дуги, а также те вершины  $U_i$ , которые полностью заменяются вершиной  $U_j (\Delta U_i \subset \Delta U_j)$ . Операции упрощения повторяются до тех пор, пока простой граф больше не поддастся дальнейшему упрощению. Если граф является относительно простым (10–20 вершин), то в указанных преобразованиях нет необходимости. В конфигурации графа необходимо лишь найти все те вершины, в которые дуги только входят.

После минимизации совокупности диагностических параметров следует разобраться в ранжировке параметров с точки зрения оптимизации алгоритма диагностирования. Для этого необходимо принять, что объект диагностирования характеризуется совокупностью  $m$  взаимосвязанных параметров  $U_i, 1 < i \leq m$ ;  $P(U_i)$  – вероятность того, что все параметры объекта в норме;  $C(U_i)$  – стоимость проверки всех параметров в совокупности;  $Q(U_i)$  – цена потерь от неполноты контроля;  $t_d(U_i)$  – среднее время диагностирования  $i$ -го параметра. Оптимизация алгоритма ранжировки с одновременной минимизацией средних затрат или среднего времени может быть получена на основе информационной модели.

Процедура выбора совокупностей диагностических параметров для контроля работоспособности в информационной модели заключается в анализе таблицы состояний, в которой столбцы соответствуют возможным состояниям системы  $S_i$ , а строки – всем возможным проверкам (параметрам)  $U_i$ . Проверка каждого параметра может заканчиваться двумя исходами: 1 – значение параметра допустимо и 0 – значение параметра недопустимо. Каждое событие равновероятно: вероятность каждого состояния известна и определяется надёжностью блоков.

Для каждой строки матрицы (рис. 14, в) вычисляют функцию предпочтения  $W$  и выбирают ту, в которой  $W \rightarrow \max$ . Затем, по результатам проверки матрицу состояний делят на две части. В первую часть входят состояния, для которых результаты проверки положительны – 1, а во вторую – отрицательны – 0. Первая часть матрицы является исходной для построения новой матрицы, в которую входят непроверенные состояния. Для новой матрицы выполняются те же операции по выбору предпочтительной функции, что и ранее, до тех пор, пока имеется непроверенный параметр. Для контроля выбираются наиболее информативные параметры, т.е. те параметры, которые в максимальной степени уменьшают остаточную неопределённость на каждом шаге выбора. Процесс будет закончен, если остаточная энтропия станет равной нулю.

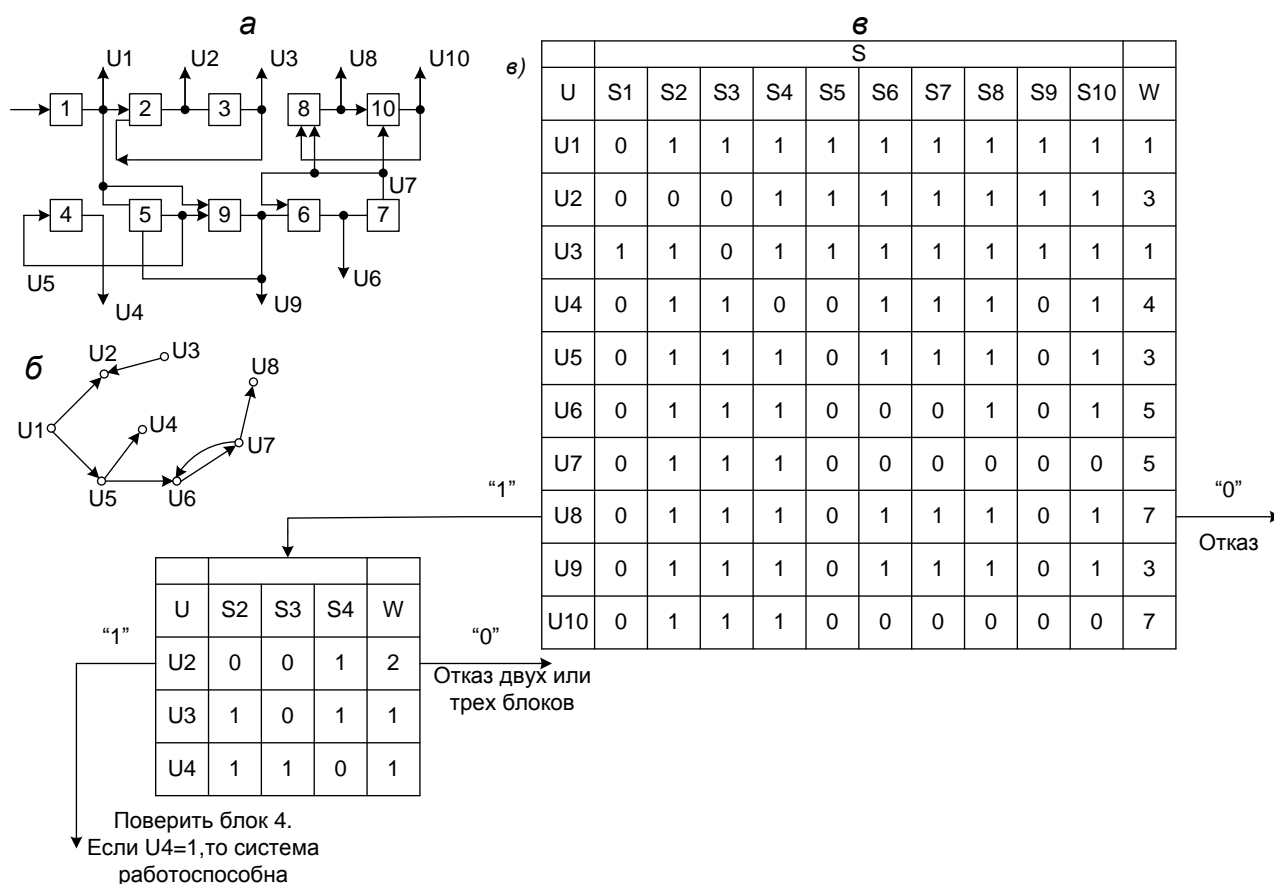


Рис. 14. Схема функциональной диагностической модели (а); ее ориентированный граф (б) и матрица состояний (в) при выборе диагностических параметров

Изложенный метод определения совокупности диагностических параметров по информационному критерию может быть применён только на начальной стадии разработки диагностического обеспечения локомотивных систем, когда отсутствуют статистические данные об отказах их элементов. Следует заметить, что полученная совокупность диагностических параметров, обеспечивающая полноту диагностирования объекта, часто включает такие физические величины, контроль которых технически сложен или экономически нецелесообразен. Если полнота проверки, вычисленная после исключения таких параметров, обеспечивает необходимые достоверность и эффективность диагностирования, то оставшаяся совокупность диагностических параметров будет минимально необходимой и достаточной для проверки состояния объекта.

### 1.5.2. Нормативные значения диагностических параметров

В правилах ремонта и технического обслуживания подвижного состава указаны допустимые значения параметров, которые должны контролироваться при плановых осмотрах и ремонтах. Любой параметр представляет собой технически обоснованную величину, значение которой необходимо выдерживать не только при ремонте, но и при диагностировании. Значение параметра может быть номинальным  $Z_n$ , предельным  $Z_{пр}$  и предельно допустимым  $Z_{пд}$ , при превышении которого наступает аварийный режим. Множества значений параметра  $Z_i$ , ограниченные номинальными и предельно допустимыми значениями, образуют *поля допусков* (рис. 15). Выход значений параметров за поле допуска может привести к отказу.

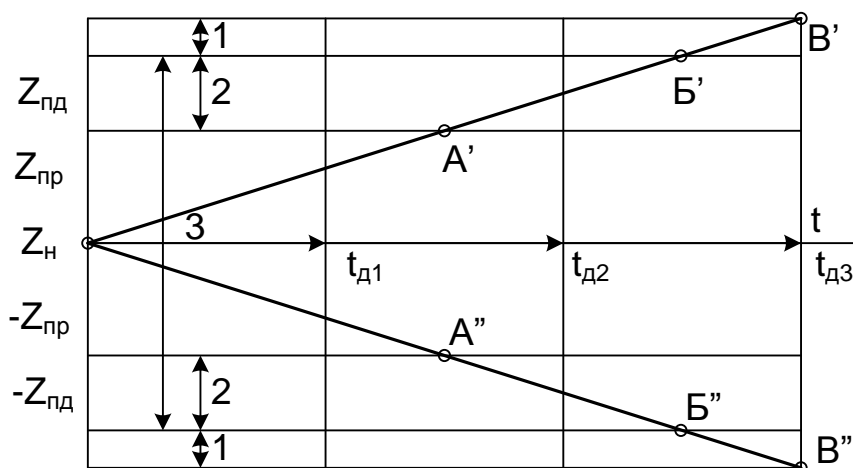


Рис. 15. Схема формирования нормативных значений диагностических параметров:  
 1 – зона предотказного состояния; 2 – запас исправной работы, соответствующий межконтрольному пробегу; 3 – зона работоспособного исправного состояния;  
 А, Б, В – граничные точки изменения состояния;  $t_{д1}$ – $t_{д3}$  – заданная периодичность планового диагностирования

Параметры, значения которых нормированы, можно условно подразделить на две группы. Нормативные значения параметров первой группы устанавливаются стандартами и рекомендуются заводами-изготовителями для узлов, обеспечивающих безопасность движения, а также для таких параметров, как токсичность и дымность отработанных газов у тепловозов, уровень вибрации, а также других, влияющих на окружающую среду и жизненные параметры человека.

Нормативные значения диагностических параметров второй группы обусловлены, с одной стороны, технологическими допусками при изготовлении, а с другой – оптимальными показателями надёжности и экономичности. Эти параметры устанавливают на стадии проектирования и корректируют при заводских и эксплуатационных испытаниях опытных локомотивов. Примером таких параметров являются: установленные нормативно-технической документацией зазоры в сопряжениях, в узлах с деталями трения, технологические допуски на сопротивление изоляции, ёмкости конденсаторов, сопротивление резисторов и т.д.

При определении нормативных значений диагностических параметров локомотивов возможны два подхода: *детерминистский* и *статистический*. В первом случае отклонение выходного параметра от номинального определяется по изменению структурных параметров и характера выходного сигнала. В этом случае удобно использовать описание системы дифференциальными уравнениями.

Для определения нормативных значений диагностических параметров узлов локомотива статистическим методом необходимо выбрать критерий оптимальности нормативных значений. Одним из критериев можно считать вероятность выхода параметра  $Z$  за пределы ремонтного допуска  $\delta_p$  в течение межремонтного периода, не превышающего допустимого значения. Вторым критерием являются суммарные затраты, вызванные ошибками диагностирования.

## **1.6. Прогнозирование технического состояния**

Весьма заманчивой, но не всегда достижимой целью диагностирования, является выявление зарождающихся дефектов, т.е. *прогнозирование* технического состояния. В этом случае при проведении периодических измерений значений технических параметров деталей или узлов локомотива, а также при анализе полученной информации выделяют только те элементы, которые имеют тенденцию к ухудшению своего технического состояния или выхода параметров за предельно допустимые значения. Процесс износа подшипников, старение изоляции, ухудшение электрических параметров электрической и электронной аппаратуры и других узлов локомотива – все это происходит по законам теории веро-

ятности и математической статистики. Если периодически измерять значения диагностического параметра и по ним строить график их зависимости от времени (рис. 16), то получим закономерность, присущую только этому виду износа и определённому узлу.

Из этого следует, что каждый узел локомотива или аппарат имеет свой, присущий только ему, характер изменения диагностического параметра. Узлы или приборы однотипной конструкции имеют в основном одинаковый характер изменения параметров. Но в процессе работы узла возможны непредвиденные факторы, которые влияют на характер нарастания дефекта, поэтому для однотипных деталей и узлов строится усредненная зависимость, полученная на основании статистических данных.

Если продолжить полученную кривую (рис. 16) до пересечения с прямой предельно допустимого значения параметра, то можно определить остаточный ресурс и момент времени, когда необходимы замена детали локомотива или ремонт во избежание аварийной ситуации. Вероятность безотказной работы, в соответствии с экспоненциальным законом надёжности, на этот временной интервал  $T$ :  $P = \exp(-T/T_0)$ , где  $T_0$  – контролируемый временной интервал. При наличии дополнительных сведений о техническом состоянии объекта можно получить более достоверную информацию о его будущем состоянии на основе более глубоких закономерностей, чем экспоненциальный закон надёжности.

Количественный прогноз состояния объекта вследствие случайного характера процессов всегда подчиняется случайным закономерностям. Но прогнозирующие оценки всегда имеют детерминированную  $R_{дет}$  и случайную  $R_{сл}$  составляющие, что и определяет совокупность диагностических параметров в будущем:

$$R(t + T_{пр}) = R_{дет}(t + T_{пр}) + R_{сл}(t + T_{пр}),$$

где  $T_{пр}$  – период прогнозирования.

Чтобы повысить качество прогнозирования, необходимо определить: периодичность диагностирования, оптимальную совокупность параметров для различных периодов диагностирования, неснижаемый запас аппаратов и приборов, откорректировать и оптимизировать алгоритм поиска места отказа, определить влияние различных посторонних факторов на условия работы узлов.

Результаты прогнозирования представляют чаще всего двумя методами: 1) в той же размерности, что и диагностические параметры, т.е.

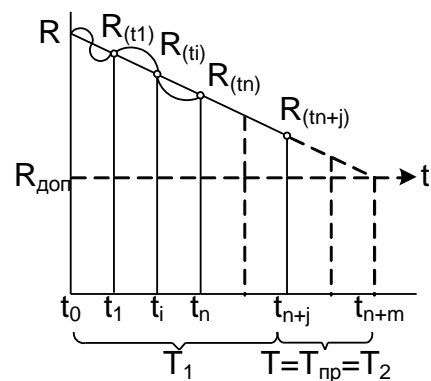


Рис. 16. Аналитическое прогнозирование значения диагностического параметра

определяется значение контролируемого параметра в будущем, это так называемый метод *аналитического* прогнозирования; 2) в виде вероятности отклонения диагностического параметра от допустимых значений. Этот метод называется *вероятностным* прогнозированием. Оба метода относятся к математическому прогнозированию, поскольку прогноз определяется математическими методами.

### **1.7. Контролепригодность локомотивов**

Под контролепригодностью локомотива понимают приспособленность его к диагностированию с необходимыми достоверностью и глубиной поиска неисправности при минимальных затратах труда, времени и средств. Важным условием осуществления технической диагностики является хороший доступ для измерения параметров. Уже при проектировании должны предусматриваться возможности диагностирования объекта по нужным параметрам локомотива. Поэтому успешное решение теоретических и практических вопросов при внедрении методов и средств контроля технического состояния подвижного состава во многом зависит от конструкции комплектующего оборудования локомотивов, что объясняется в первую очередь необходимостью повышения контролепригодности основного и вспомогательного оборудования локомотивов. Разделение локомотивов на отдельные функциональные блоки и выделение в них контрольных точек способствует хорошему доступу для измерения параметров.

Контролепригодность локомотивов определяется техническими требованиями, предъявляемыми к конструктивным особенностям устройств сопряжения локомотива с техническими средствами диагностирования, к параметрам и методам диагностирования, к номенклатуре и требованиями технической документации [1, 2, 10].

Для оценки контролепригодности локомотивов необходимо располагать системой показателей, обусловленных главным образом структурой системы диагностирования, числом и трудоёмкостью элементарных проверок. Показатели контролепригодности отражают приспособленность конструкции локомотива и отдельных его узлов к диагностированию в качественном и количественном выражениях.

В основу методики расчёта показателей контролепригодности локомотива положено деление его на иерархические соподчинённые системы и элементы. От выбранного уровня детализации структуры отдельных систем зависят значения дифференцированных показателей и комплексный уровень контролепригодности всего локомотива.

Дифференцированные показатели контролепригодности вычисляют по статистическим данным о диагностических операциях и элементарных проверках. Для этого определяют их перечень, число видов, повторяемость и трудоёмкость. В качестве дополнительных показателей можно использовать массо-габаритные характеристики устройств сопряжения, степень их унификации, быстродействие и помехозащищённость.

К основным показателям контролепригодности локомотива относят коэффициент полноты проверки исправности  $K_{пп}$  и коэффициент глубины поиска неисправности  $K_{гп}$ .

Коэффициент полноты проверки исправности  $K_{пп} = \lambda_k / \lambda_0$ , где  $\lambda_k$   $\lambda_0$  – суммарная интенсивность отказов соответственно проверяемых и всех составных частей сборочных единиц или элементов системы на принятом уровне деления.

Коэффициент полноты проверки можно приближённо рассчитать по формуле

$$K_{пп} = n_k / n_0,$$

где  $n_k$  – число диагностических параметров;  $n_0$  – число параметров технического состояния, использование которых обеспечивает методическую достоверность проверки.

Коэффициент глубины поиска неисправности рассчитывается по формуле

$$K_{гп} = F / B,$$

где  $F$  – число однозначно различимых составных частей сборочных единиц или элементов системы на принятом уровне деления, с точностью до которого определяется место неисправности;  $B$  – общее число составных частей сборочных единиц или элементов системы при принятом уровне деления, с точностью до которых требуется определение места неисправности.

## 1.8. Порядок разработки систем диагностирования локомотивов

Разработка и внедрение систем технического диагностирования тягового подвижного состава являются главными факторами повышения эксплуатационной надёжности и снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт. Диагностированию в первую очередь подлежат те узлы и детали подвижного состава, которые обеспечивают безопасность движения и безопасное обслуживание (колёсные пары, буксовые узлы, рессорное подвешивание и блокирующие устройства). Ко второй очереди относятся узлы локомотива, обеспечивающие его работоспособность и узлы, имеющие довольно низкую надёжность (силовые цепи и цепи

управления локомотивом, аппаратура защиты и аппараты управления). В третью очередь диагностируют узлы, которые косвенно влияют на функционирование подвижного состава (контролирующая аппаратура и приборы, системы охлаждения и вспомогательные машины).

Основной задачей на этапе разработки системы диагностирования является выбор диагностических параметров, по которым можно с высокой степенью достоверности определить техническое состояние объекта диагностирования. К диагностическим параметрам относятся такие величины или характеристики объекта, превышение значений которых приводит к отказу элементов машин, а затем и всей машины или механизма. Для каждого из элементов есть, как правило, несколько параметров, определяющих их надёжность, однако не все из них являются диагностическими в создаваемой системе диагностирования, что объясняется их разнообразием, невозможностью выявить эти параметры одним диагностическим методом, чрезмерным повышением сложности и стоимости систем диагностирования. Однако, несмотря на это, необходимо обеспечить максимальную полноту диагностирования.

Для построения *модели надёжности* машины необходимо установить нагрузки на элементы машин, приводящие к изменению значения диагностических параметров. Установленные нагрузки определяют физическую картину возникновения отказов при достижении предельного значения параметров состояния элементов. Для многих машин периодического действия определяемые нагрузки имеют циклический характер и постоянную амплитуду. В противном случае следует учитывать факторы, приводящие к изменению нагрузок. Факторы могут быть внешние и внутренние, связанные с точностью геометрических и других параметров самой машины. Содержание модели надёжности зависит от выбираемого показателя, характеризующего качество функционирования машины. При прогнозировании работоспособности машин по определённым текущим значениям диагностических параметров необходимо знать и закономерности изменения значений параметров во времени под действием определённых нагрузок. После построения модели надёжности выбирают метод диагностирования, который определяется физическими явлениями, происходящими при потере работоспособности элементов машины. Очень важно выбрать наиболее информативный метод, чтобы получить максимум информации с минимальными затратами.

Наиболее важной задачей при разработке системы диагностирования является составление *диагностической* модели, устанавливающей связь между параметрами состояния машины и диагностическими параметрами. Эта задача выполняется в два этапа: 1) выбор диагностических параметров, наиболее чувствительных к изменению состояния



элементов машины; 2) выбор типа диагностической модели (динамическая линейная или нелинейная, регрессионная, структурная и т.д.). Выбор типа модели зависит от конструкции машины, метода диагностирования и других, а диагностические параметры, как правило, выбираются на основании выделенных различных характеристик при преобразовании диагностического сигнала или при экспериментальном моделировании различных по значению диагностических параметров.

После построения диагностической модели разрабатывают техническое решение системы диагностирования, которое определяется методом диагностирования, условиями, в которых функционирует объект, видом диагностической модели. Такая последовательность разработки системы технического диагностирования приемлема не только для машин и механизмов, но и для более сложных объектов, которым является тяговый подвижной состав.

### **1.9. Вопросы для самоконтроля**

1. Чем отличается структурная схема тестового диагностирования от рабочего?
2. Как классифицируются средства технического диагностирования?
3. Что такое алгоритм технического состояния? Приведите примеры.
4. Для чего нужна математическая модель объекта диагностирования?
5. Как отобразить ориентированный граф?
6. Назовите основные вершины, которые используются при построении дерева решений.
7. Приведите структурную схему классификации методов диагностирования.
8. Приведите структурную схему виброизмерительного устройства.
9. Что обозначает порог чувствительности в тепловых методах измерения и как он измеряется?
10. Назовите основные методы спектрального анализа и охарактеризуйте их.
11. Как происходит получение атомно-абсорбционных и эмиссионных спектров?
12. Как устроен гибкий эндоскоп?
13. Как происходит формирование диагностических сигналов в буксе?
14. Что такое КТСМ и его измерительная схема?
15. Для чего предназначен коэффициент полноты проверки?
16. Назовите основные этапы разработки системы диагностирования локомотивов.

## **2. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

### **2.1. Тяговые электродвигатели**

Под дефектом электрической машины, работающей в заданном режиме, с точки зрения диагностики, понимают такое отклонение её параметров от нормированных значений, которое немедленно или с течением времени может привести к полной или частичной утрате ее работоспособности. Достоверность оценки работоспособности электрической машины зависит от того, насколько полно контролируемые параметры отражают её техническое состояние. При этом число контролируемых параметров должно быть таким, чтобы с достаточной точностью определить техническое состояние электрической машины. Выбор наиболее информативных и эффективных диагностических параметров является главной задачей при разработке средств диагностирования электрических машин.

В электромеханических системах получить точную математическую модель достаточно трудно, так как известные системы управлений в электрических машинах описывают в основном электромагнитные процессы, к тому же конструкция электрической машины закрыта и лишена прямого доступа к внутренним элементам. Поэтому непосредственному измерению поддаются такие параметры, как значения тока, напряжения, мощности, температуры и частоты вращения. Однако этих параметров недостаточно для диагностирования электрических машин, так как в процессе работы появляются износы в подшипниках, в коллекторно-щёточном аппарате, происходит перегрев обмоток, что приводит к нарушению структуры машины. Поэтому знание параметров основных электромагнитных процессов для диагностирования необходимо, но не достаточно. Следовательно, математическую модель, основанную на уравнениях электромагнитных процессов, необходимо дополнить уравнениями побочных процессов, что связано с определенными трудностями. Для предварительного выбора набора диагностических параметров пользуются методом причинно-следственных связей объекта, чтобы определить функциональные зависимости контрольных параметров от рабочих факторов. Например, перегрев обмотки якоря может быть причиной потери целостности изоляции проводников в пазу, вследствие чего возникает их вибрация. А это значит, что если на первом этапе диагностическим параметром может быть температура, то на втором – вибрация проводников, а на третьем – степень износа витковой изоляции [1, 2, 13, 14].

В соответствии со стандартом [4, 5] отказы подразделяются на явные и скрытые, устранимые и неустраняемые, критические, значительные и малозначительные. Отказы, для которых ещё не разработаны методы и

средства обнаружения, называются *скрытыми*. *Критическими* отказами являются такие, при которых нормальное функционирование электрической машины практически невозможно или недопустимо, что соответствует предельному техническому ее состоянию (генератора). *Ключевым* является тот отказ, с появления которого происходит развитие аварийного отказа. Пример развития ключевого дефекта рассмотрим на структурной схеме (рис. 17). События и факты на этой схеме располагаются в хронологической последовательности.

При определении диагностических параметров на первом этапе схемы причинно-следственных связей машины выделяют основные элементы, исходя из их назначения и значимости. Для тягового двигателя основными элементами являются: якорь, коллекторно-щёточный аппарат, остов, подшипниковый щит, моторно-осевые подшипники и зубчатая передача. Подробное разделение конструкции на отдельные элементы позволяет выделить на каждом из них характерные диагностические параметры и выявить между ними функциональные связи.

Кроме неисправностей основных элементов возможны и другие дефекты, характеризующиеся отклонениями параметров от допустимых значений. Необходимо помнить, что одной неисправности соответствуют несколько признаков или одному признаку соответствует несколько неисправностей. Результаты анализа параметров показывают, что такие параметры, как ток, температура, вибрация и шум, с точки зрения диагностирования, неравноценны, так как параметр «температура», имеющий хорошую информативность, обладает инертностью, а потому должен заменяться другим, более быстросействующим.

Диагностические сигналы бывают одно- и многомерными. Наиболее предпочтительны многомерные сигналы, так как изменение одного из них приводит к изменению другого с определённой зависимостью, характеризующей техническое состояние диагностируемого объекта. Диагностические параметры определяют и вид диагностирования: с раз-

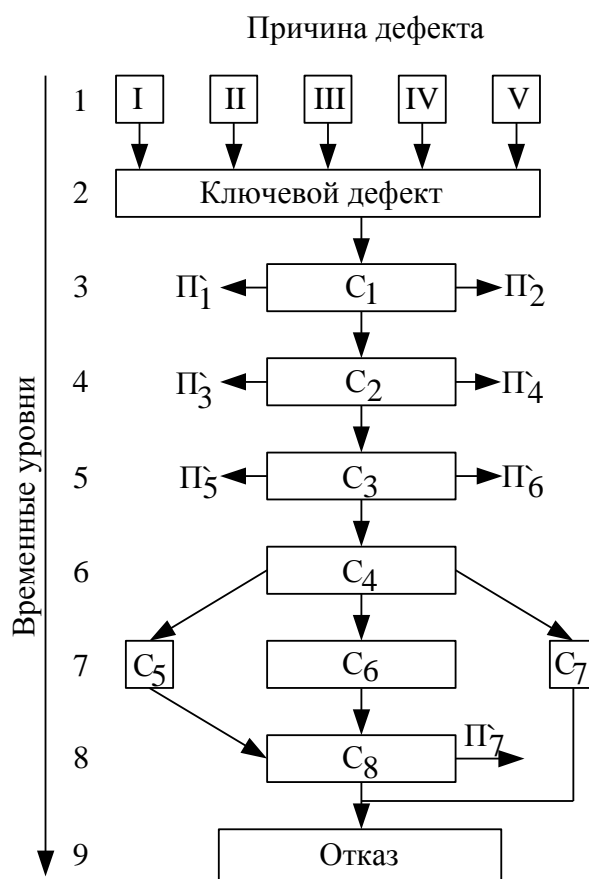


Рис. 17. Структурная схема причинно-следственных связей возникновения отказа: I–V – причины дефекта; П<sub>1</sub>–П<sub>7</sub> – признаки дефекта; С<sub>1</sub>–С<sub>8</sub> – события, являющиеся причиной дефекта

боркой объекта или без разборки. В условиях эксплуатации предпочтительнее безразборное диагностирование, а в условиях ремонта – разборное. Из сказанного выше следует, что правильный выбор диагностических параметров электрических машин и тяговых двигателей локомотива является, как уже было отмечено, первостепенной задачей диагностирования. Для эффективного проведения диагностирования электрических машин необходимо, кроме набора различных датчиков, использовать микропроцессорные средства, которые с высокой скоростью и точностью способны обрабатывать полученную информацию, сравнивать её с эталонными параметрами и устанавливать диагноз.

Основными параметрами, характеризующими нормальную работу электрической машины и тягового двигателя являются: сопротивление изоляции, виброакустический сигнал, определяющий техническое состояние якорных и моторно-осевых подшипников и биение якоря, а также коммутационный сигнал, определяющий параметры работы коллектора и щётчного аппарата. Все эти параметры проверяются стационарными устройствами диагностирования, в состав которых входят: высоковольтная установка; виброакустическая установка (см. далее рис. 21) для измерения вибрационных характеристик тяговых двигателей и электрических машин; устройства для определения параметров щётчного аппарата и параметров коммутации и коллектора (см. далее рис. 23, 28).

Рассмотрим измерительный комплекс с использованием микропроцессорных средств (рис. 18), в который входят ЭВМ, блок высоковольтной аппаратуры *БВА*, блок сопряжения *БС*, объект диагностирования *ОД* и линия связи *ЛС*. Блок *БВА* включает в себе стабилизированный источник высокого напряжения *ВСИН* и коммутационные реле  $P_0-P_8$ . Всей работой комплекса диагностирования управляет ЭВМ по заранее разработанной программе, в которой определена последовательность срабатывания реле  $P_0-P_8$ , установлены пределы и режимы измерений тока и напряжения.

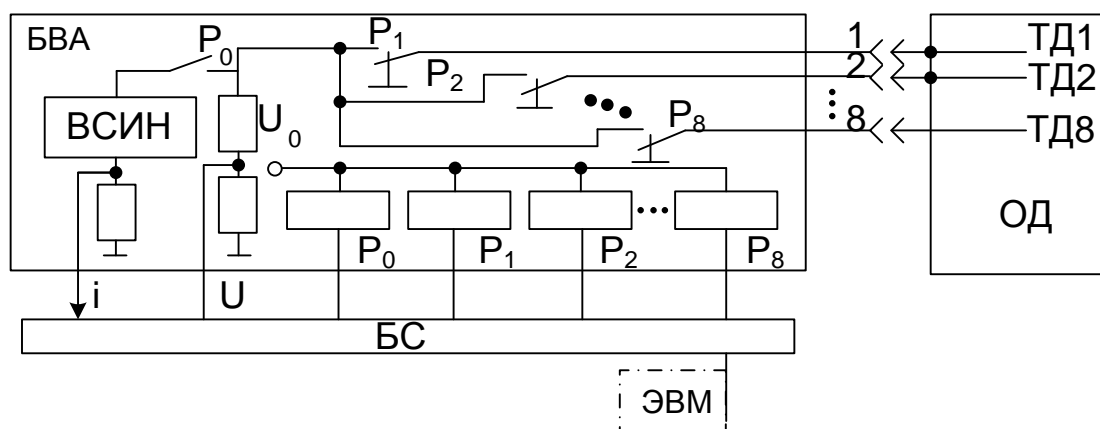


Рис. 18. Структурная схема диагностирования тяговых электрических двигателей с применением ЭВМ

Для каждого двигателя процесс измерений разбит на шесть циклов: 1) предварительный разряд на «землю»; 2) измерение сопротивления изоляции; 3) измерение напряжения саморазряда; 4) дозарядка; 5) кратковременный разряд; 6) измерение возвратного напряжения. В соответствии с циклами разрабатывается и программное обеспечение. Для данной схемы разработано две программы: по одной программе обеспечивается срабатывание реле в нужном сочетании, измеряются ток утечки и напряжение, а по второй – отрабатываются результаты измерений, рассчитывается электрическая ёмкость изоляции, оценивается качество изоляции и выдаётся информация на печать.

От качества изоляции электрических машин зависит их безотказная работа в условиях эксплуатации, особенно в районах с влажным климатом и в периоды выпадения большого количества осадков. Прочность изоляции электрических машин является важным фактором для оценки надёжности локомотива. При анализе причин, которые способствовали выходу из строя электрических машин, необходимо учитывать и характер пробоя изоляции. Следует помнить, что пробой изоляции носит необратимый процесс, а наличие влаги в диэлектрике способствует увеличению его теплопроводности. Повышение электропроводности, с одной стороны, способствует высыханию изоляции, а с другой – приводит к увеличению температуры, которая не успевает снижаться и является причиной теплового пробоя.

Процесс пробоя развивается в два этапа. На первом этапе нарушается стационарный режим работы изоляции, когда электропроводность увеличивается до значения, соответствующего короткому замыканию. На втором этапе происходит разрушение материала изоляции, характер которого определяется особенностями предыдущего цикла. На первом этапе образуется основной канал пробоя с высокой электропроводностью, а на втором – фиксируется пробой, который завершает разрушение изоляции.

Изменение электрических параметров изоляции в процессе старения приводит к постепенным и внезапным отказам. В результате старения изоляции увеличиваются диэлектрические потери, уменьшаются её сопротивление, электрическая и механическая прочность. Поэтому основным, уязвимым параметром при контроле технического состояния изоляции является ток утечки и чем хуже состояние изоляции, тем больше ток утечки.

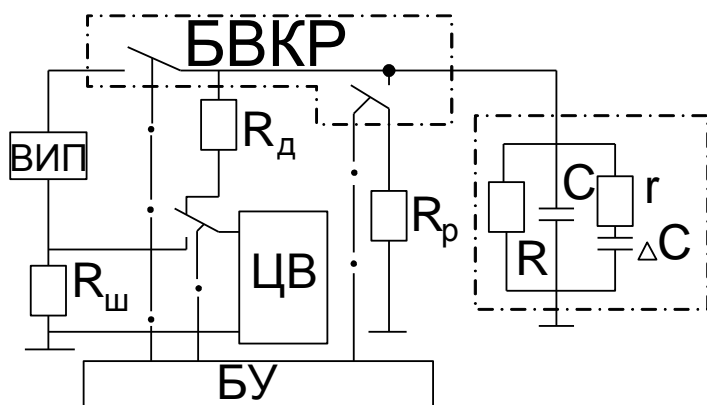


Рис. 19. Схема специализированного устройства диагностирования изоляции тяговых двигателей

Специализированное устройство, предназначенное для контроля качества изоляции на электровагонах переменного тока (рис. 19), даёт возможность измерить токи утечки, коэффициенты абсорбции и нелинейности, кривые саморазряда и возвратного напряжения. Специализированное устройство получает питание от сети переменного тока напряжением 220 В. Оно состоит из высоковольтного источ-

ника питания *ВИП* с выходными стабилизированными напряжениями 500 и 2500 В, блока высоковольтных коммутационных реле *БВКР*, цифрового вольтметра *ЦВ*, блока управления *БУ* с источником питания цепей управления. Специализированное устройство имеет быстродействующую электронную защиту, срабатывающую при недопустимо низком сопротивлении изоляции или коротком замыкании.

Поскольку изоляция на электровагонах неоднородна и состоит из нескольких диэлектриков с различными удельной объёмной проводимостью и коэффициентами диэлектрической проницаемости, то специализированное устройство дополняется схемами замещения в виде параллельно включённых конденсаторов *C* и резистора *R*. Конденсатор *C* учитывает геометрическую ёмкость неоднородной изоляции, а резистор *R* отражает сопротивление изоляции току утечки в установившемся режиме. Цепочка  $r - \Delta C$  компенсирует накопление зарядов абсорбции на границах раздела диэлектриков.

Для того чтобы измерить *ток утечки* и *коэффициент абсорбции*, необходимо на объект диагностирования через контакты коммутационных реле подать стабилизированное напряжение 500 или 2500 В. Затем цифровым вольтметром *ЦВ* через 15, 30, 45 и 60 секунд измерить падение напряжения на резисторе  $R_{ш}$  пропорционально токам утечки. Для определения сопротивления необходимо значение приложенного напряжения разделить на значение тока утечки. **Коэффициент абсорбции** рассчитывают исходя из соотношения падения напряжения на резисторе  $R_{ш}$ , измеренного через 15 и 60 секунд, т.е.  $K = \Delta U_{15} / \Delta U_{60}$ .

**Коэффициент нелинейности** определяется как частное от деления сопротивления изоляции при напряжении 500 В на значение той же величины при напряжении 2500 В. В обоих случаях сопротивление току утечки измеряют через 60 секунд после приложения напряжения.

Чтобы снять *кривую саморазряда изоляции*, объект необходимо отключить от источника напряжения и через добавочный резистор  $R_d$  вольтметром ЦВ автоматически измерить напряжение на изоляции через 15, 30, 45 и 60 секунд. Ёмкости изоляции при этом разряжаются на величину сопротивления утечки, происходит постепенный саморазряд конденсаторов  $C$  и  $\Delta C$ .

*Кривую возвратного напряжения* также снимают вольтметром ЦВ (рис. 20) после отключения высокого напряжения от объекта диагностирования. Кривая изменения возвратного напряжения  $U_B$  от времени  $t_p$  показывает, какой заряд был накоплен в изоляции.

Все эти параметры изоляции дают объективную оценку технического состояния электрических машин и аппаратов. Чем больше диагностических параметров, характеризующих техническое состояние электрической изоляции, тем выше достоверность диагностирования и точность поиска места неисправности. Рассмотренная конструкция специализированного устройства удовлетворяет требованиям глубины поиска места неисправности, имеет небольшую погрешность и обладает широкими возможностями при измерениях: предел измерений при напряжении 2500 В – от 0,3 до 100 МОм, а при напряжении 500 В – от 0,02 до 100 МОм.

**Вибрационный метод.** Технологией ремонта двигателей предусмотрен контроль вибрации с помощью современных приборов диагностирования: Доктор-030, Прогноз-1 и т.д. Источником вибрации могут быть неуравновешенность якоря, переменные магнитные силы, неправильный монтаж, перекос в подшипниках и неточность их установки, увеличенные радиальные зазоры и осевые разбеги вала якоря и др. При разработке методики диагностирования необходимо выбрать такие датчики и средства, которые обладали бы высокой помехозащищённостью, точностью и универсальностью. Особое внимание должно уделяться выбору мест контрольных точек, где должна измеряться вибрация. Остов двигателя необходимо изолировать от жёсткого фундамента толстой резиной или сухим деревом, чтобы свести до минимума передачу вибраций от посторонних предметов. Вибропреобразователи в процессе диагностирования не должны смещаться на корпусе относи-

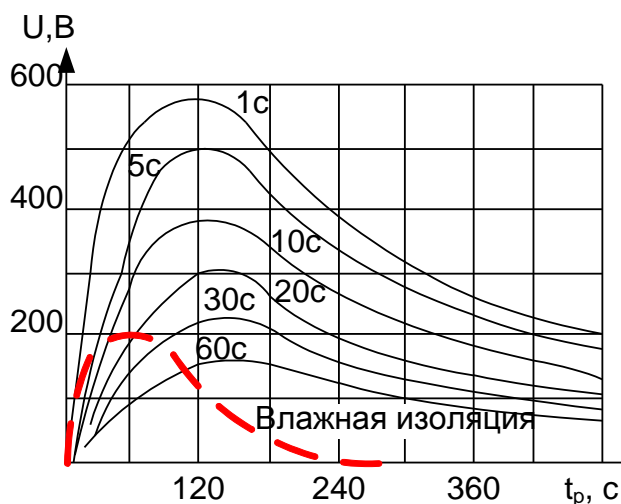


Рис. 20. Зависимость возвратного напряжения от времени разряда

тельно выбранных контрольных точек, так как это влияет на погрешность измерений.

Из этого следует, что достоверность результатов измерений при техническом диагностировании двигателей может быть получена только при условии применения единой методики диагностирования локомотива.

Немаловажное значение при диагностировании имеет и частота вращения вала якоря (ротора) двигателя. Для каждого типа двигателей необходимо выбрать свою оптимальную частоту вращения и эталонный вибросигнал для каждой контрольной точки. Вибросигналы, идущие от датчиков на измерительную аппаратуру, должны проходить через частотные фильтры, которые отсеивают посторонние шумы, усилители, если в них имеется необходимость, и аналого-цифровые преобразователи, если информация должна пройти через микропроцессорные устройства.

В установке диагностирования тяговых электродвигателей по виброакустическому методу (рис. 21) в качестве датчиков вибросигнала используются вибропреобразователи. Для визуального наблюдения за формой вибросигнала установлены электронно-лучевые осциллографы. Вся информация накапливается на регистраторе шума или диске. Применение микропроцессорных устройств при диагностировании тяговых двигателей позволило уменьшить размеры аппаратуры диагностирования с одновременным расширением её возможностей.

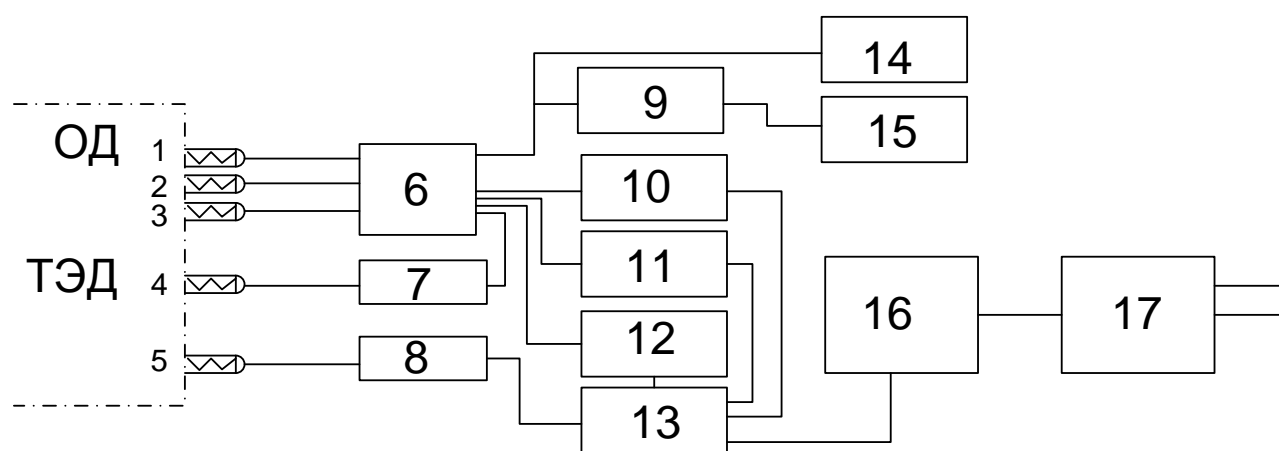


Рис. 21. Структурная схема измерения вибропараметров тяговых электрических двигателей: 1–5 – датчики вибросигнала; 6 – коммутатор сигналов; 7, 8 – усилители сигнала; 9 – шумомер; 10, 12 – виброизмерительный прибор; 11 – милливольтметр; 13 – лучевой осциллограф; 14 – электронный осциллограф; 15 – регистратор шума; 16 – ЭВМ; 17 – принтер

Основными шумами двигателей, согласно данным виброакустической диагностики, являются: механические шумы, вызываемые дисбалансом якоря, шумы из-за погрешности в сборке роликовых подшипников, а также из-за трения щёток и ударов; магнитные шумы, вызываемые магнитными полями в воздушном зазоре; аэродинамические шумы, создаваемые



мые при движении охлаждающего воздуха по каналам двигателя. В спектре частот вибраций присутствуют многочисленные составляющие, которые отражают интенсивность и характер динамических воздействий на корпусные детали и несут диагностическую информацию в диапазонах частот от 70 до 15000 Гц. При подборе датчиков-вибропреобразователей следует иметь в виду, что каждой детали соответствуют свои полосы резонансных частот, которые определяются при экспериментах на абсолютно исправных двигателях и принимаются за эталонные.

**Переносные устройства диагностирования** – это быстродействующие приборы, небольших размеров, массы и стоимости. Они работают в автоматическом и полуавтоматическом режимах, не требуют высокой квалификации обслуживающего персонала. Их используют для локального диагностирования наиболее ответственных узлов локомотива. Переносные приборы дублируют операции диагностирования, которые выполняются стационарными и бортовыми устройствами. Их можно стыковать для передачи информации в память вычислительных устройств.

Чтобы объективно оценить состояние изоляции, необходимо знать не только её сопротивление, но и электрическую ёмкость. Это позволяет судить о том, сухая или увлажнённая изоляция. Есть специальные приборы для измерения электрической ёмкости – это прибор контроля влажности ПКВ-13 и мост переменного тока Р5026 (мост Шеринга). Однако пользоваться ими следует с большой осторожностью, так как сама изоляция является полярным диэлектриком и при частоте 50 Гц эффект поляризации проявляется слабо. Поэтому такие приборы не нашли широкого применения в депо. Исследования показали, что устанавливать ёмкость изоляции нужно при медленном измерении параметров, например напряжением саморазряда и возвратным напряжением.

*Напряжением саморазряда* называется напряжение, которое остаётся на объекте после его отключения от источника высокого напряжения. Оно представляет собой монотонно убывающую во времени экспоненциальную функцию. Чем больше ёмкость изоляции при одном и том же значении её сопротивления, тем медленнее снижается напряжение саморазряда. Зная сопротивление изоляции и напряжение саморазряда, измеренное в заданный момент времени, можно определить электрическую ёмкость. Возвратное напряжение также измеряют на отключённом объекте, но после предварительного кратковременного разряда на «землю» (в течение 5 с). Оно характеризует степень неоднородности слоев изоляции. Поскольку напряжение саморазряда и возвратное напряжение измеряют на отключённом двигателе, то они зависят только от параметров его изоляции и позволяют более объективно судить о техническом состоянии изоляции по сравнению с оценкой только по её сопротивлению.

Для измерения рассмотренных контрольных параметров необходимо использовать универсальные приборы, например электронный мегаом-

метр Ф4102/1, дополненный вспомогательными блоками, расширяющими его функциональные возможности.

Серийно выпускаемый мегаомметр Ф4102/1 (рис. 22) содержит преобразователь высокого напряжения *ПВН*, измерительное устройство, выполненное на операционном усилителе *DA1*, и дополнительные устройства, состоящие из делителя напряжения на резисторах *R4* и *R5*, разрядного резистора *R6*, переключателей *SA1* и *SA2*, усилителя измеряемого напряжения на двух операционных усилителях *DA2* и *DA3*, блока управления *БУ* и блока индикации *БИ*. Усилитель измеряемого напряжения выполнен как устройство слежения и хранения, осуществляемое с помощью ключа *K* и запоминающего конденсатора *C5*. Блок управления состоит из задающего таймера, счётчика импульсов и дешифратора. Он позволяет поочередно измерять сопротивление изоляции, напряжение саморазряда и возвратное напряжение. О режиме работы сигнализируют светодиоды блока индикации *БИ*, расположенные на панели прибора, *r*, *R* – «Измерение сопротивления изоляции», *U*, *U<sub>c</sub>* – «Измерение напряжения саморазряда», *З* – «Заряд» – дозаряд изоляции до напряжения 1000 В, после саморазряда, *U<sub>в</sub>* – «Измерение возвратного напряжения». Все блоки прибора совместимы по значению напряжения и выполнены на интегральных микросхемах, что даёт возможность на перспективу соединять прибор с микропроцессорными устройствами.

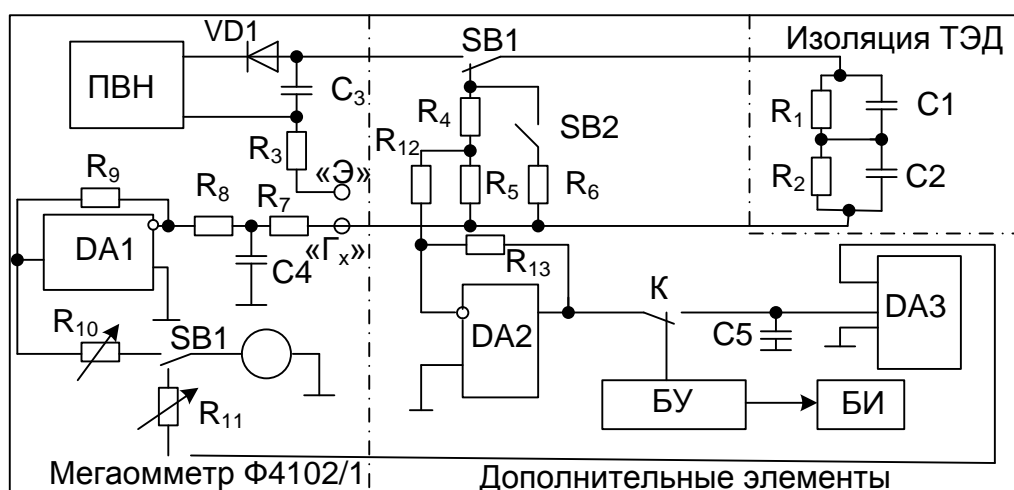


Рис. 22. Схема электронного мегаомметра

**Коллекторно-щёточные узлы.** Основным критерием технического состояния коллекторно-щёточного узла является степень искрения под бегающими краями щёток, которая определяется в основном визуально. Однако этот критерий субъективен и не всегда отражает подлинную картину. Более достоверным контролируемым параметром является значение *электромагнитной энергии*, выделяемой в зоне контакта коллектора со щёткой. Выделение энергии сопровождается искровым разрядом

под щёткой, видимым или невидимым для глаз человека. Для снятия информации необходим датчик, реагирующий на магнитные колебания, возникающие в процессе искрения под щётками. Между значением искрового разряда и возникающими при этом магнитными колебаниями имеется пропорциональная зависимость.

Степень искрения во многом зависит от качества изготовления и настройки двигателя, состояния коллектора и щёток, нажатия щёток на коллектор, биения коллектора и коллекторных пластин и других факторов. Поэтому магнитные колебания, возникающие в момент искрения, являются наиболее достоверными параметрами, характеризующими техническое состояние коллекторно-щёточного узла. Между тем большое количество влияющих факторов затрудняет определение конкретного места и узла с ухудшенными рабочими параметрами. Поэтому необходим ещё один диагностический параметр, объединивший некоторое количество факторов, влияющих на его состояние. Все диагностические параметры выбирают на основании статистических данных и данных испытаний.

Другим диагностическим параметром может служить *нажатие щёток на коллектор*. Как показывают экспериментальные данные, на коллекторную щётку двигателя, помимо статического нажатия, создаваемого нажимным устройством щёткодержателя, действуют различные динамические силы, обусловленные вибрацией коллекторно-щёточного узла и механическими воздействиями со стороны коллектора. От этого ухудшаются условия коммутации и сужается зона безыскровой работы.

Для измерения статических и динамических нажатий щёток на коллекторе применяют прибор, схема которого приведена на рис. 23. Прибор содержит ферромагнитный датчик (ферритовое кольцо с двумя обмотками), принцип действия которого основан на изменении магнитной проницаемости с изменением усилия. Датчик состоит из двух ферритных колец 1, 2. Первое выполняет функцию чувствительного элемента, а второе – компенсационного. Обмотки возбуждения  $W_2$ ,  $W_4$  соединены между собой согласно и через разделительный трансформатор 4 подключены к генератору синусоидального напряжения *ИСН*. Измерительные обмотки  $W_1$ ,  $W_3$  через разделительный трансформатор 3 и высоковольтные конденсаторы  $C_2$  и  $C_3$  соединены с

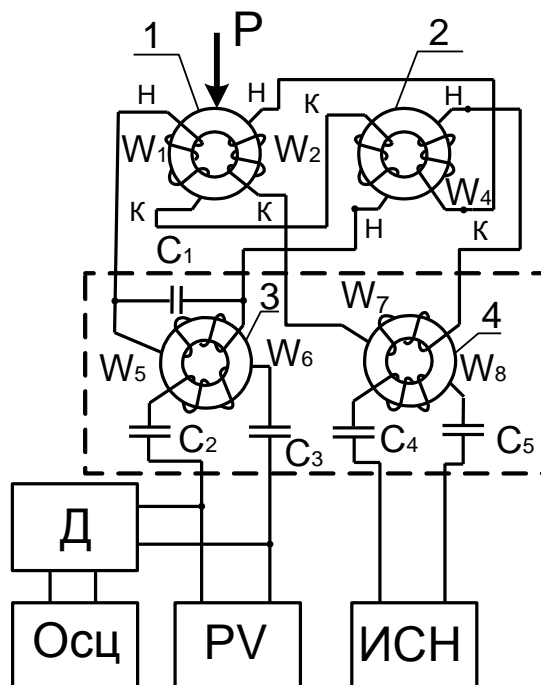


Рис. 23. Прибор диагностирования коллекторно-щеточного узла с устройствами обработки информации

измерительным прибором  $P$ , а через детектор  $D$  – с шлейфом магнито-электрического осциллографа. Между собой измерительные обмотки соединены встречно.

При нажатии нажимного пальца щёткодержателя на чувствительный элемент в нём возникают механические напряжения, приводящие к уменьшению его магнитной проницаемости и появлению разностного сигнала на измерительных обмотках  $W_1$ ,  $W_3$ , пропорционально измеряемому нажатию. Этот сигнал фиксируется вольтметром  $PV4$  через детектор  $D$  осциллографом, при этом выдается информация о техническом состоянии щётчного узла. Данным прибором можно контролировать параметры различных типов щёткодержателей, экспериментально оценить влияние различных механических факторов на их исправное состояние, выбрать критерий оценки их работы и оптимизировать параметры коллекторно-щёточного узла, что особенно важно при использовании его в комплексе диагностирования.

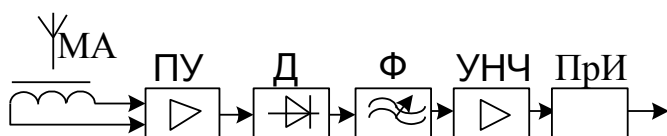


Рис. 24. Структурная схема устройства диагностирования коллекторно-щёточного узла: МА – магнитная антенна; ПУ – полосовой усилитель; Д – детектор; Ф – фильтр нижних частот; УНЧ – усилитель низких частот; ПриИ – измерительный прибор

Следует отметить, что коллекторно-щёточный узел диагностируется на работающем тяговом двигателе, установленном на специализированном стенде. Для измерения электромагнитной энергии, возникающей в зоне контакта щётки с коллектором, используется специальный прибор (рис. 24). Диагностический сигнал воспринимается маг-

нитной антенной, усиливается полосовым усилителем и далее через детектор, фильтр низких частот, усилитель низких частот поступает на регистрирующее устройство. Датчик прибора устанавливается в коллекторной камере диагностируемого двигателя на расстоянии 30–40 см от линии контакта щёток с коллектором.

Важно помнить, что каждая неисправность имеет свою частоту, поэтому настроив фильтр на частоту максимального сигнала, можно определить место и вид дефекта. Например, подъёму коллекторной пластины соответствует частота в диапазоне 439–459 Гц, сколу щёток – 750–790 Гц, сколу зуба малой шестерни тягового редуктора – 81–85 Гц, а зубчатого колеса – 17–19 Гц. Экспериментами установлено, что наиболее информативные данные можно получить при частоте вращения вала якоря 2,03–2,12 об/с. В этом диапазоне наиболее достоверно можно оценить класс коммутации, неисправности коллекторно-щёточного узла и тягового редуктора по частоте регистрируемого сигнала от датчика. При этом двигатели диагностируют при малой мощности нагрузки (3–5 кВт), что даёт возможность совмещать операции контроля состояния коллекторно-щёточного узла, якорных подшипников и тягового ре-

дуктора. Данные работы выполняет комплекс диагностирования с микропроцессором (рис. 25). Диагностический сигнал (аналоговый) от регистрирующего прибора *РП* через усилитель и коммутатор *К* подаётся на аналого-цифровой преобразователь, где преобразуется в цифровой и далее поступает на порт ввода микропроцессорного устройства для быстрой обработки информации. Напряжение аналогового сигнала колеблется от 0 до 5 В, а время измерения – между импульсами от 145 до 150 мкс из расчёта, что на каждой коллекторной пластине выполняются по 15 измерений.

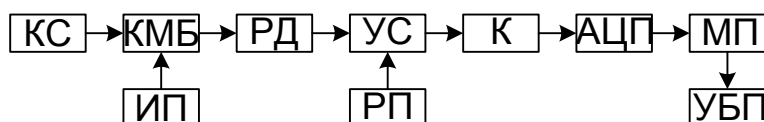


Рис. 25. Структурная схема диагностирования узлов тягового электрического двигателя на базе вычислительного комплекса ЭВМ: КС – катковый стенд; КМБ – колесно-моторный стенд; ИП – источник питания; РД – регистрирующий датчик; УС – усилитель сигнала; РП – регистрирующий прибор; К – коммутатор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МП – микропроцессор; УБП – устройство быстрой печати

Программное обеспечение диагностирования коллекторно-щеточного узла состоит из двух подпрограмм. Первая обеспечивает ввод диагностического сигнала от объекта в машину, вторая – анализ полученных данных. Она состоит из четырёх подпрограмм (рис. 26).

В задачу первой подпрограммы входит определение начальной точки отсчёта, максимального значения сигнала на каждой коллекторной пластине, вычисление среднего значения по всему коллектору, среднего квадратичного отклонения, минимального и максимального диагностических сигналов по всему двигателю. Для дальнейшего анализа полученной информации в работу вступает вторая подпрограмма, задачи которой – выявить

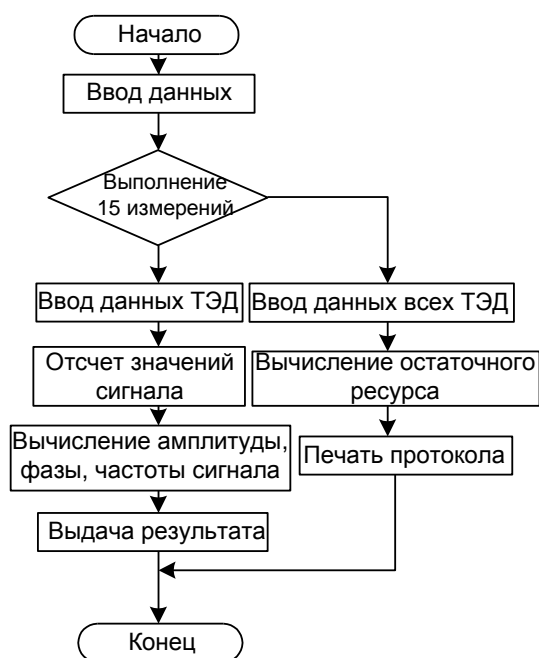


Рис. 26. Схема программы диагностирования коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя с применением ЭВМ

скрытые периодичности появления отклонений в работе ТЭД и по ним судить об имеющихся неисправностях. Третья подпрограмма на основании данных первой и второй подпрограмм обеспечивает оценку бальности коммутации, сравнение с предельно допустимыми значениями, определение остаточного ресурса двигателя и выдачу протокола диагностирования.

Помимо бесконтактных устройств снятия информации о техническом состоянии коллекторно-щеточного узла, описанных выше, существуют и контактные устройства. Принцип их действия заключается в следующем: всякое нарушение коммутации, которое сопровождается искрением щёток, вызывает небольшие колебания магнитного потока в главных и дополнительных полюсах машины. При этом на выводах обмотки якоря, т.е. на щётках, появляется напряжение повышенной частоты. С увеличением степени искрения амплитуда этого напряжения тоже возрастает, что даёт возможность судить о степени искрения.

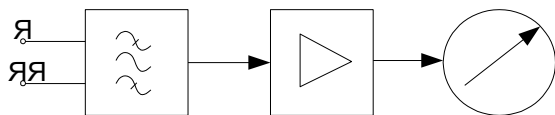


Рис. 27. Структурная схема диагностирования контакта в щеточном узле

Рассмотрим приборы, выполненные по данному принципу. Сигнал от щётки разной полярности поступает на фильтр (рис. 27), который пропускает напряжение высокой частоты, и далее на электронный усилитель и индикатор.

Если применяется чувствительный индикатор, то усилитель может отсутствовать. Фильтр является наиболее сложной и ответственной частью прибора. Он настраивается на частоты 20–200 кГц. Прибор, контролирующий правильность коммутации, калибруют для каждого типа электродвигателей отдельно на эталонный сигнал. Отклонение от эталонного сигнала указывает на наличие повышенного искрения и дефекты в коллекторно-щеточном узле.

При работе устройства (рис. 27) в составе комплекса диагностирования информацию можно передавать в микропроцессор и устройства памяти, предварительно преобразовав аналоговый сигнал в цифровой.

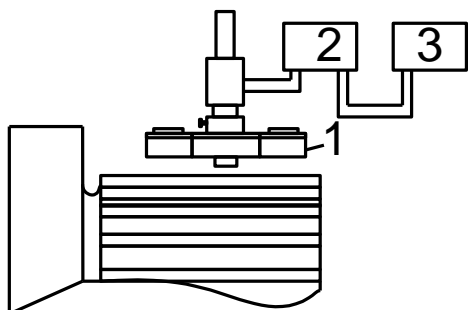


Рис. 28. Устройство диагностирования коллектора по его биению

На качество работы коллекторно-щеточного узла большое влияние оказывает биение коллектора, поэтому при диагностировании узла необходимо ввести его в систему диагностических параметров. Для определения биения коллектора используются токовых датчики (рис. 28), которые позволяют снимать информацию бесконтактным методом.

Датчик 1 устанавливается над коллектором на определённом расстоянии и при

вращении последнего информация снимается с обмоток датчика, усиливается, преобразуется и поступает на измерительное устройство 2 и осциллограф 3.

**Автоматизированное диагностирование.** Все перечисленные методы и способы диагностирования возможны при небольшом количестве контролируемых параметров. Для достоверной и всеобъемлющей информации необходимо все диагностические параметры объединить в общую систему с учётом их взаимозависимостей, чтобы обеспечить надёжную работу в эксплуатации и определить ресурс всех узлов тягового двигателя. Правильность количественной и качественной оценок надёжности двигателей во многом зависит от того, насколько полно и объективно выбранные диагностические параметры отражают их техническое состояние. Поскольку тяговые двигатели представляют собой закрытую систему, лишённую прямого доступа к внутренним элементам, то была разработана автоматизированная система диагностирования тяговых двигателей (рис. 29).

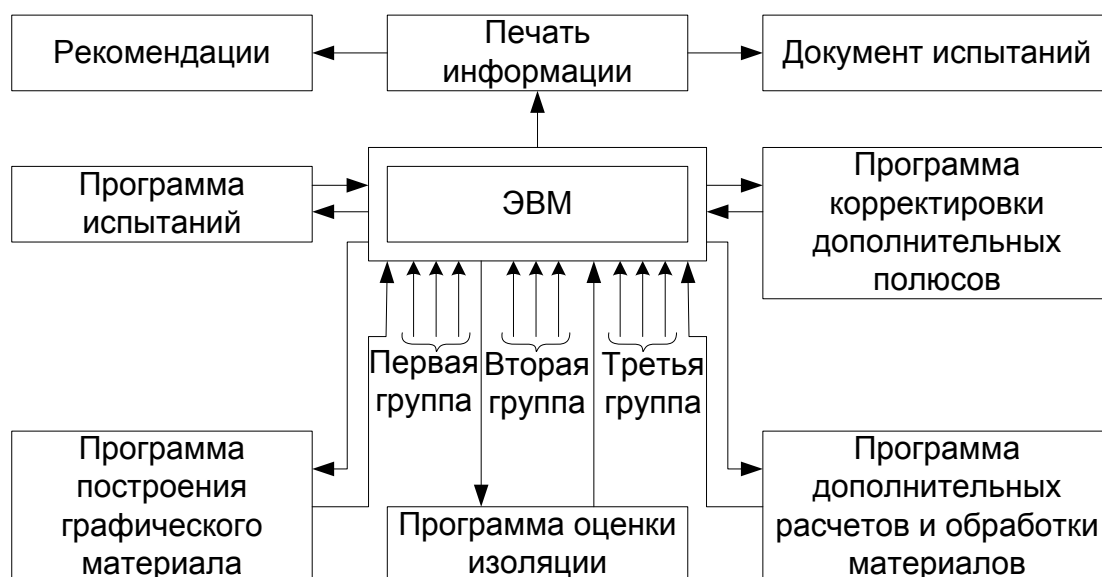


Рис. 29. Структурная схема автоматизированного комплекса диагностирования тяговых электродвигателей

Все параметры тягового электродвигателя подразделяются на три группы:

- 1) значения дискретных параметров, паспортные и технические данные (заводской номер, дата проведения диагностирования и ремонта, пробег от последнего ремонта, место последнего ремонта и др.);
- 2) значения дискретных параметров испытаний тяговых двигателей (сопротивление изоляции, сопротивление обмоток и др.), при этом сопротивление изоляции контролируется по нескольким параметрам;

3) основные аналоговые параметры испытаний двигателей (токи якоря, возбуждения, подпитки-отпитки, напряжение на коллекторе, параметры искрения щёток, вибрация в вертикальных и горизонтальных плоскостях, профиль коллектора, частота вращения и др.).

Для удобства диагностирования двигатели сортируют на три категории: первая – аварийные двигатели, которые сразу отправляют на разборку и ремонт; вторая – двигатели, у которых отсутствуют какие-либо признаки неудовлетворительной работы коллекторно-щёточного узла; третья – двигатели с наличием таких признаков. Двигатели каждой категории должны проходить свой технологический цикл ремонта и испытаний. Двигатели первой категории, имеющие механические повреждения, разрушенную изоляцию и коллекторно-щёточный узел, сразу необходимо направлять в электромашинный цех, а после ремонта – на испытательную станцию, где они проходят полный цикл испытаний. Двигатели второй и третьей категорий должны подвергаться предварительному диагностированию для определения потенциальной и коммутационной устойчивости, состояния изоляции и подшипников, а при необходимости – стабильности электромеханических, тепловых и вентиляционных характеристик тяговых электродвигателей. Если двигатели второй категории после предварительного диагностирования отправляют в электромашинный цех, то двигатели третьей категории – на испытательную станцию и только после этого в электромашинный цех с рекомендациями по устранению дефектов (рис. 30).

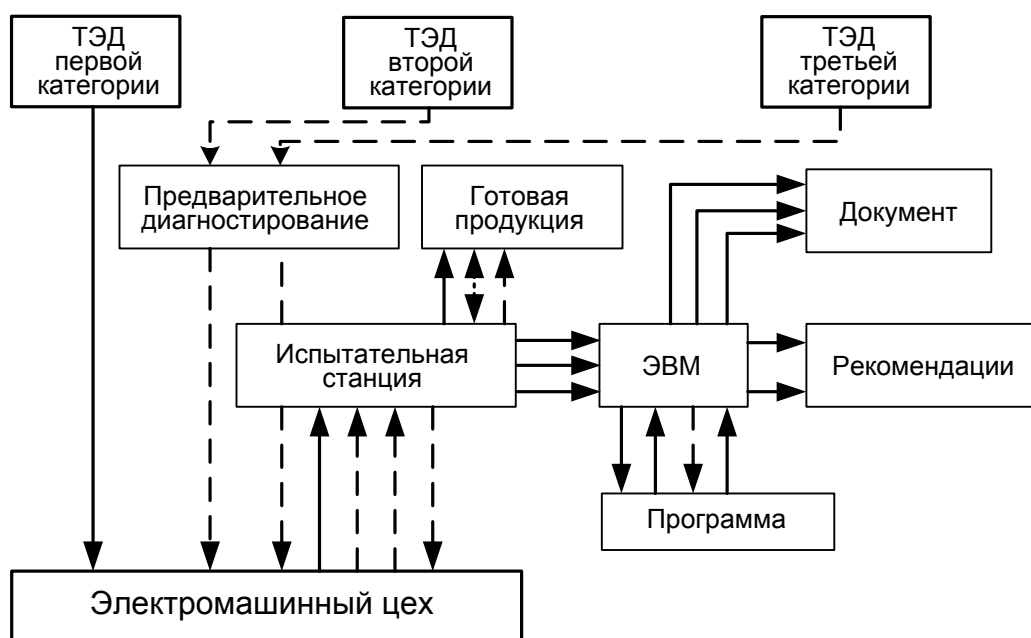


Рис. 30. Структурная схема автоматизированного процесса отбраковки тяговых электродвигателей при диагностировании



Приведенная методика (рис. 30) контроля качества ремонта тяговых электродвигателей и вспомогательных машин, кроме повышения надёжности в эксплуатации, позволяет следующее: собирать и накапливать информацию о двигателях и вспомогательных машинах в виде протоколов испытаний, с последующим анализом и прогнозированием ресурса; формировать экипаж локомотива, с учётом условий коммутации, оцененных при стендовых испытаниях; выявлять двигатели с аномальными проявлениями в работе коллекторно-щёточного узла, восстанавливать их нормативные параметры.

Прогнозирование ресурса любого узла тягового электродвигателя связано с его предельно допустимыми параметрами и характером нарастания отказа. Эти данные являются эталонными для программы диагностирования и определяются на основании статистических и экспериментальных. Для определённой группы тяговых электродвигателей или вспомогательных машин эти данные должны быть едиными и постоянными и использоваться в программах для сравнения их с полученными.

## 2.2. Вспомогательные машины

К вспомогательным машинам относят фазорасщепители. Основным рабочим параметром фазорасщепителя является время разгона ротора до синхронной частоты вращения при оптимальном напряжении. Например, для фазорасщепителя НБ-455 оно должно быть не более 10 с при напряжении 380 В и не более 15 с при напряжении 285 В. Временем разгона асинхронного фазорасщепителя считается время от срабатывания пусковых контакторов до момента срабатывания реле оборотов. Следовательно, чтобы оценить время разгона фазорасщепителя, нужно измерить время его запуска, напряжение на обмотке собственных нужд и сравнить их с эталонными параметрами.

Для измерения используется специальное устройство (рис. 31). Оно является одним из узлов комплексной стационарной системы диагностирования и состоит из блока сопряжения *БС*, измерителя времени *ИВ*, компаратора *К*, выходного устройства *ВУ*, преобразователя напряжения *П* и источника питания *ИП*. Сигналом для измерения времени разгона фазорасщепителя является наличие напряжения на пусковых контакторах, которое подаётся на устройство через контакты переключателя *SA*. Момент окончания запуска совпадает

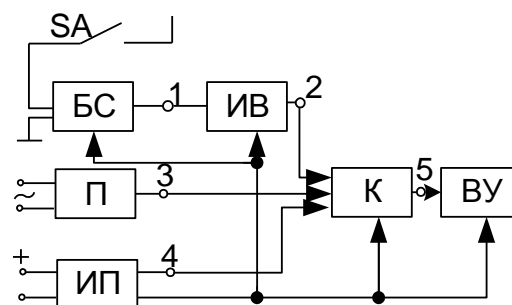


Рис. 31. Структурная схема устройства диагностирования фазорасщепителя

с моментом снятия напряжения с обмоток этих контакторов и временем срабатывания реле оборотов. А это значит, что время подачи напряжения на обмотку контактора и его снятия больше времени разгона фазорасщепителя, требуемого для срабатывания контактора, обычно равно 0,28 с. Для получения чистого времени разгона фазорасщепителя необходимо из общего времени вычесть время срабатывания контактора. Это вычитание выполняется в блоке *БС*, который предназначен для сопряжения блока измерителя времени *ИБ* с релейной схемой управления фазорасщепителями [1, 2, 11, 13, 14].

Входным сигналом блока *БС* является напряжение на пусковом контакторе, а выходным – импульс стабилизированного напряжения, длительность которого равна времени разгона фазорасщепителя. Этот сигнал подаётся на измеритель времени *ИБ*, где длительность сигнала преобразуется в напряжение, пропорциональное времени разгона фазорасщепителя.

В качестве измерителя времени используется интегратор. После отключения входного сигнала интегратор переходит в режим запоминания, значение напряжения на его выходе остаётся неизменным. Результаты измерения времени разгона подаются на вход компаратора *К*, где сравниваются с напряжением, пропорциональным допустимому времени разгона при данном напряжении на обмотке собственных нужд силового трансформатора. Результат сравнения с выхода компаратора поступает на вход выходного устройства *ВУ*, состоящего из усилителя мощности и сигнальной лампы. Если измеренное время разгона превышает допустимое, то на выходе усилителя появляется сигнал, указывающий на наличие отклонений в техническом состоянии фазорасщепителя.

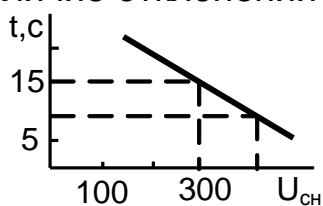


Рис. 32. Зависимость времени разгона фазорасщепителя от подводимого напряжения

Обычно между временем разгона фазорасщепителя и значением подводимого напряжения имеется линейная зависимость: чем меньше подводимое напряжение, тем больше время разгона (рис. 32). Чтобы реализовать эту зависимость, необходимо на вход 4 (рис. 31) подать постоянное опорное напряжение, а на вход 3 – однополярное напряжение, пропорциональное напряжению на обмотке собственных нужд силового трансформатора с обратным по отношению к опорному напряжению знаком.

Из сигналов, подаваемых на входы 3 и 4 формируется напряжение, пропорциональное разности этих сигналов, т.е. оно уменьшается с ростом напряжения на обмотке собственных нужд, реализуя прямолинейную зависимость. Источник питания служит для преобразования напряжения бортовой сети в стабилизированное напряжение питания всех блоков устройства.

### 2.3. Токоприёмники

Токоприёмник относится к электроаппарату, влияющему на эксплуатационную надёжность, поэтому для проверки его технического состояния существует много различных измерительных приборов. Контроль параметров токоприёмников, влияющих на качество токосъёма, осуществляется на стадиях его испытания, изготовления, эксплуатации и хранения. Так как токоприёмник является неотъемлемой частью электровоза, все средства его диагностирования считаются специализированными и локальными в общей системе диагностирования локомотива. Наиболее перспективными являются средства диагностирования токоприёмника непосредственно в движении.

При техническом диагностировании токоприёмников главным является правильный выбор диагностических параметров, определяющих с достаточной достоверностью качество токосъёма и необходимую надёжность. К основным параметрам, характеризующим техническое состояние токоприёмников, относятся: статическое нажатие полоза токоприёмника на контактный провод; время подъёма и опускания; перекосы полоза. Контроль всех этих параметров требует большого количества датчиков и специальных методик.

Устройства диагностирования подразделяются на устройства, работающие без снятия токоприёмника с крыши локомотива и со снятием. Устройства первой группы обеспечивают контроль статического нажатия полоза токоприёмника на контактный провод во всём рабочем диапазоне износа контактных вставок и перекоса полоза с помощью светотехнических или лазерных устройств. Эти устройства дают возможность измерить один-два параметра в автоматическом режиме. Ко второй группе относятся в основном ручные средства контроля: динамометры, линейки, отвесы, штангенциркули, микрометры и др.

Автоматическое диагностирование проводится с использованием встроенных датчиков, средств и различных устройств непосредственно на ремонтных и испытательных стендах. Применение информационно-вычислительных и измерительных систем диагностирования токоприёмников способствует накоплению данных о влиянии параметров на безотказную работу локомотива.

Широкое распространение получают устройства диагностирования, встроенные непосредственно в проверяемый объект. Для диагностирования используют оптические и тепловые устройства. Их применение позволяет определять работоспособность токоприёмников не по пробегу, а

по реальному состоянию. Для регистрации отрывов токоприёмника от контактного провода используются оптические устройства, а для контроля за качеством электрических соединений и изоляции – инфракрасные пирометры. Применение вычислительной техники, бесконтактных датчиков износа, перекося и смещения, времени подъёма и опускания, нажатия и отрывов даёт возможность создать автоматизированные средства диагностирования токоприёмников, которые едины для всех позиций технологического цикла обслуживания токоприёмников любого типа.

Рассмотрим структурную схему (рис. 33), которая содержит генератор высокочастотных колебаний, выход которого соединён с передающей антенной  $A_d$  (антенна-датчик). Последняя выполнена в виде проводника и закреплена на контактном проводе  $KП$  с помощью изоляторов. Над передающей антенной расположена приёмная антенна  $A_{пр}$ , подключенная к входу усилителя высокой частоты  $УВЧ$ . Его выход через узел измерения  $УИ$  соединён с входом регистрирующего устройства  $РУ$ . Контактный провод при нажатии на него токоприёмника перемещается вверх вместе с антенной, изменяя расстояние между антеннами. Это приводит к изменению амплитуды принимаемого высокочастотного сигнала, пропорционального нажатию токоприёмника. Информация после измерения и преобразования в  $P_p$  подаётся в микропроцессор  $МП$  и далее в блоки памяти на печать.

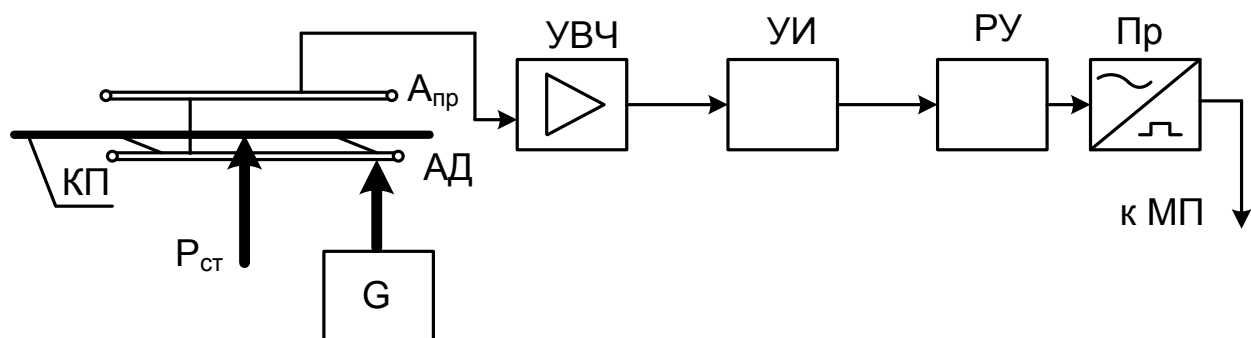


Рис. 33. Структурная схема измерения статического нажатия полоза токоприёмника на контактный провод

## 2.4. Электрические аппараты

Электрические аппараты на тяговом подвижном составе относятся к узлам низкой надёжности, поэтому необходимость в их диагностировании является важной задачей при разработке и внедрении систем диагностирования. Следует отметить, что многие электрические аппараты

обладают низкой контролепригодностью, особенно для встроенных средств контроля, в связи с этим они требуют большого количества разнотипных датчиков и преобразователей [1, 2, 13, 14].

Поскольку на локомотивах, а особенно на электровозах, имеется большое количество электрических аппаратов, то необходимо иметь много контрольных точек, стыковочных узлов и тестовых сигналов, что усложняет средства контроля. Для диагностирования электрических аппаратов применяют переносные, бортовые и стационарные средства. Часть аппаратов, например, таких, как аппараты защиты, предпочтительнее диагностировать в процессе испытания и настройки, а коммутационные аппараты – при техническом обслуживании, прибегая к стационарным средствам. Большую достоверность диагностирования следует ожидать от встроенных средств, так как с любого аппарата в процессе работы можно снять самую объективную информацию, учитывающую влияние всех факторов. Поэтому сочетание встроенных и стационарных средств контроля является наиболее оптимальным вариантом при разработке систем технического контроля. Особенно важное значение имеет наличие на локомотиве постоянных средств контроля за состоянием цепей управления, обеспечивающих безотказную работу локомотива в условиях эксплуатации. Это даёт возможность быстро отыскать отказ в схеме локомотива и освободить перегон. Если на обычном локомотиве без средств технического контроля возникает неисправность в цепях управления, то для её отыскания необходимо иметь простейшие средства, такие, как лампочка-прозвонка или омметр, а у работника должен быть психологический фактор уверенности. Поэтому для быстрого обнаружения места отказа необходимо на локомотивах применять быстродействующие автоматизированные средства технического контроля. Электрические аппараты можно подразделить на аппараты, подлежащие диагностированию стационарными средствами контроля, и на аппараты, которые необходимо диагностировать встроенными средствами.

Электрические аппараты на локомотиве, несмотря на их большое разнообразие, имеют много общих параметров, которые легко поддаются измерению и способствуют внедрению автоматизированных средств контроля. К таким параметрам относятся: сопротивление электрической изоляции, качество электрического контакта, активные сопротивления обмоток, контактное нажатие и др. При выборе диагностических параметров необходимо выполнить исследовательские работы, эксплуатационные испытания и расчёт надёжности. Основу таких исследований составляет изучение условий эксплуатации и закономерностей развития

отказов. На основе теории вероятности и математической статистики выбирают систему диагностических параметров, методику диагностирования и разрабатывают средства диагностирования по группе аппаратов и силовых цепей. Ключевой задачей является разработка и выбор датчиков для снятия информационных сигналов и преобразования их в форму, удобную для передачи на средства обработки полученной информации. Датчики должны обеспечивать точность измерений, иметь небольшие размеры, высокую помехоустойчивость и надёжность. Таковыми свойствами обладают датчики, построенные на основе полупроводниковых элементов.

**Силовые контакторы.** В процессе эксплуатации силовые контакторы подвергаются воздействию сил вибрации, колебаниям температуры и влажности окружающей среды, а также процессу гашения электрической дуги при размыкании контакта. Экспериментами установлено, что во время гашения электрической дуги износ контактов с некоторыми допущениями можно определить по формуле

$$\delta = (C_1 + C_2)/n,$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  – коэффициенты пропорциональности износа контактов при включении и выключении контактора соответственно;  $n$  – число включений контактора.

Необходимо отметить, что износ контактов при выключении контактора происходит значительно интенсивнее, чем при включении. К тому же при определении предельного износа необходимо учитывать материал контактов, их форму, особенности системы дугогашения, параметры кинематической системы, динамику его работы и электрические параметры. Всё это позволяет выбрать наиболее информативный параметр, каким является переходное сопротивление в зоне контакта  $R_{пер}$ . Со снижением качества контакта увеличивается переходное сопротивление, а следовательно, и падение напряжения на контакте при большом токе. При этом происходит рост температуры в зоне контакта с последующим его перегревом и оплавлением. В этом случае возникает другой диагностический параметр, который определяет качество контакта и метод его определения. Нагревание зоны контакта сопровождается выделением инфракрасных лучей, которые можно улавливать специальными приборами, называемыми *балометрами*.

Любой силовой коммутационный аппарат имеет систему приводов, которая со временем теряет свои первоначальные параметры и приводит к нарушению нормального функционирования контактора. Это про-

является в снижении контактного нажатия, времени срабатывания, а также в нарушении очередности замыкания групповых контакторов.

## **2.5. Полупроводниковые выпрямительные блоки**

Наличие большого количество полупроводниковых диодов и тиристоров на подвижном составе требует более объективно и с высокой степенью достоверности обеспечивать их эксплуатационную надёжность, используя методы и средств технической диагностики. К наиболее характерным эксплуатационным причинам, влияющим на надёжную работу выпрямителей, относятся: повышенная запылённость (до 5 мг/м); поперечная вибрация (до 1,6 Гц); продольная вибрация (до 0,7 Гц); вертикальная вибрация (до 0,6 Гц); колебания температуры охлаждающего воздуха (от  $-50^{\circ}$  до  $+60^{\circ}$  °C); повышенная влажность (до 90 %); переменные нагрузки по току и напряжению; повышенные электромагнитные помехи, приводящие к неисправностям в схемах защиты и управления.

Надёжность выпрямительных блоков зависит от надёжности дискретных элементов, схемы их соединения и переходных процессов, проходящих в силовых цепях, аппаратах и тяговых двигателях. Особенно это относится к тем аппаратам и цепям, которые обладают значительной индуктивностью (переходные и сглаживающие реакторы, индуктивные шунты и тяговые электрические двигатели) [1, 2, 13, 14].

Все отказы полупроводниковых диодов можно подразделить на внезапные (пороговые) и постепенные. Внезапные отказы возникают вследствие превышения предельных значений тока или напряжения нагрузки, которые подразделяются на деградационные, когда диод находится в предотказном состоянии, и на катастрофические, когда диод в процессе длительной эксплуатации теряет свои запирающие способности в обратном (а для тиристоров и в прямом) направлении. Постепенные отказы являются следствием воздействия длительных нагрузок и старения конструкции. Диоды, имеющие предотказное состояние, относятся к приборам ограниченной годности, потому они должны своевременно заменяться на новые. А это возможно только в том случае, если все диоды будут подвергаться периодическому диагностированию.

Согласно статическим данным, причиной отказов в выпрямительных блоках являются: пробой кремниевой структуры – 70 %; обрыв внутри вентиля – 23 %; нестабильность характеристик – 4 %; механические разрушения – 1,5 %; прочие отказы, не связанные с отказами вентиля – 1,5 %.

При диагностировании выпрямительных блоков анализу статистических данных особое внимание должно уделяться виду отказа и его при-

чинам, а также количеству отказов с числом вышедших из строя диодов, с тем, чтобы иметь технические и экономические обоснования применения на подвижном составе средств технического контроля.

Все указанные отказы возникают, как уже говорилось ранее, под действием таких эксплуатационных факторов, как температура, напряжение, ток, вибрация, переменные нагрузки, которые способствуют увеличению скорости развития процессов, под действием которых происходит изменение структуры, а дефекты из незначительных могут стать критическими.

Для диагностирования выпрямительных блоков существует множество методик и технических средств, но важным требованием при этом является выбор диагностических параметров, характеризующих силовые полупроводниковые диоды. Основными из них принято считать: обратный ток  $i_{обр}$ , прямое падение напряжение  $\Delta U$  и тепловое сопротивление  $R_T$ . Все эти три параметра в совокупности дают полное представление о техническом состоянии диода. Однако при диагностировании технического состояния необходимо выбрать такой диагностический параметр, по значению которого можно следить за постепенным развитием отказа, чтобы выявить предотказное состояние. К тому же диагностический параметр должен быть, с одной стороны, универсальным и позволять с высокой точностью выявить самые разнообразные отказы силовых диодов в выпрямительном блоке, а с другой – должен способствовать внедрению автоматического контроля выпрямительного блока без разборки последнего.

Для того чтобы выбрать такой параметр, необходимо знать, как и по какому закону он реагирует на изменяющиеся параметры диода. Зная закон изменения диагностического параметра, можно спрогнозировать процесс наступления отказа. Рассмотрим диагностические параметры.

*Тепловое сопротивление* характеризует способность конструкции диода отводить поток тепла, образующийся внутри при его работе. Оно определяется отношением температуры  $p-n$ -перехода к потере мощности, град/Вт:

$$R_T = \frac{(T_{p-n} - T_{охл})}{\Delta P}.$$

Отдача тепла от  $p-n$ -перехода в окружающую среду зависит от конструкции диода и охладителя. Снижение теплоотдачи является первым признаком нарушения технического состояния диода, которое в дальнейшем перейдет в отказ. Тепловое сопротивление диодов таблеточной конструкции существенно меньше, чем у паяных штыревых диодов и определяется в основном усилием, создаваемым прижимным устройством.



Поэтому, выбрав определённое прижимное усилие, можно значительно уменьшить значение теплового сопротивления. Поэтому тепловое сопротивление не может служить основными диагностическим параметром. В условиях эксплуатации тепловое сопротивление измеряют чаще всего косвенным способом, используя при этом свойство полупроводниковой структуры изменять падение напряжения  $\Delta V$  при её нагревании. С повышением температуры  $p$ - $n$ -перехода динамическое сопротивление  $R_d$  уменьшается линейно, а следовательно, линейно уменьшается и падение напряжения на диоде.

*Прямое падение напряжения  $\Delta V$*  характеризует как внутреннее состояние  $p$ - $n$ -перехода, так и техническое состояние конструкции диода. Падение напряжения для разных диодов и тиристоров тоже разное и в основном определяется динамическим сопротивлением  $R_d$  и пороговым напряжением  $U_0$ . Пороговое напряжение зависит от качества монокристаллического кремния, подвижности и времени жизни носителей, а также от правильности размеров элемента перехода и составляет в среднем 0,2–0,4 В. Динамическое сопротивление  $R_d$  у разных диодов и тиристоров также отличается и колеблется от  $0,7 \cdot 10^{-3}$  до  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Ом.

Таким образом, прямое падение напряжения:

$$\Delta U = U_0 + R_d I_{пр},$$

где  $I_{пр}$  – прямой ток, проходящий через диод А.

Это выражение характеризует прямую ветвь вольт-амперной характеристики. Однако с увеличением температуры происходит уменьшение прямого падения напряжения, что положительно отражается на потерях мощности, но в то же время указывает на то, что в работе диода появляются некоторые отклонения.

Таким образом, падение напряжения и динамическое сопротивление находятся между собой в прямой зависимости и влияют на тепловое сопротивление, поэтому величину  $\Delta U$  также можно считать диагностическим параметром. Сначала измеряют  $\Delta U$  при температуре плюс 20 °С, затем – плюс 140 °С, сравнивают результаты измерений и устанавливают диагноз. При разности падений напряжения более 0,14 В диод имеет предотказное состояние и подлежит замене. Как видно из условий измерений, схема диагностирования довольно сложна, требует больших затрат на диагностирование и мало пригодна для встроенного безразборного диагностирования.

*Обратный ток  $i_{обр}$*  диода характеризует как внутреннее состояние кремниевой структуры, так и техническое состояние конструкции диодоохладитель-выпрямительного блока. Для обоснования выбора диагностического параметра значения обратного тока необходимо рассмот-

реть процессы, проходящие в условиях эксплуатации в выпрямительном блоке, которые влияют на значение обратного тока диода или тиристора, и те законы, по которым идёт процесс старения и разрушения конструкции. Особое внимание должно быть уделено тем факторам, которые способствуют росту обратного тока  $i_{обр}$ . Значение обратного тока зависит от многих факторов, но в первую очередь от температуры  $p$ - $n$ -перехода  $T_{p-n}$ , обратного напряжения  $U_{обр}$  и концентрации неосновных носителей в зоне  $p$ - $n$ -перехода. Обратный ток  $i_o$  содержит следующие основные составляющие:

$$i_{обр} = I_S + I_T + I_Y,$$

где  $I_S$  – ток насыщения;  $I_T$  – ток термогенерации;  $I_Y$  – ток утечки.

Ток утечки складывается из тока утечки внутри диода и по наружной поверхности. На значение токов утечки влияет нарушение герметичности, наличие влаги внутри диодов, низкое качество защиты поверхности выпрямительного элемента и попадание различных химических элементов вместе с воздухом. Попадание влаги на поверхность выпрямительного элемента, даже весьма в малом количестве, нарушает его вентиляционные свойства. Влага вследствие электролиза резко снижает сопротивление диода, что приводит к увеличению обратного тока и возможному поверхностному пробое.

Ток насыщения  $I_S$  полностью зависит от концентрации неосновных носителей и не зависит от значения обратного напряжения. Концентрация неосновных носителей зависит от температуры экспоненциально. А это означает, что и обратный ток, определяемый плотностью неосновных носителей, растёт экспоненциально с температурой по закону

$$i_{обр} = \frac{\Delta E}{(KT)},$$

где  $\Delta E$  – ширина запрещённой зоны;  $K$  – коэффициент концентрации носителей (при комнатной температуре он равен 0,026 эВ).

Если исходить из того, что время жизни неосновных носителей экспоненциально растёт с увеличением температуры, то происходит и рост самих носителей, что приводит к появлению приращения обратного тока, называемого *током термогенерации*  $I_T$ . Таким образом, любые отклонения от температурного режима внутри  $p$ - $n$ -перехода приводят к повышению числа носителей и к увеличению коэффициента диффузии.

Если в электрической цепи выпрямительного диодного или тиристорного выпрямителя имеется индуктивность, то к рассмотренным выше трём видам обратного тока при температуре выше плюс 110 °С

добавляется ток, обусловленный переходными процессами  $I_L$ , т.е.  $i_{обp} = I_y + I_T + I_s + I_L$ .

Принимая во внимание все перечисленные факторы, которые влияют на значение обратного тока, приходим к выводу, что выбранный диагностический параметр обладает достаточной информативностью, легко измеряется, преобразуется и передаётся на расстояние. По диагностическому параметру выбираются метод и средства диагностирования.

Существует два вида диагностирования: с разборкой выпрямительного блока и без разборки. Хотя диагностирование с разборкой требует значительных затрат времени, однако оно имеет более высокую достоверность диагностирования без разборки. Средства диагностирования делятся на бортовые и стационарные. Ранее отмечено, что некоторые диоды с увеличением температуры изменяют свои технические параметры, поэтому бортовые средства наиболее предпочтительны и обладают большими возможностями.

Для обнаружения повреждённых диодов или диодов в предотказном состоянии разработано достаточное количество методик и технических средств. С помощью одних средств проверка выполняется на специализированных стендах диагностирования, с помощью других – непосредственно на локомотивах, при этом используется напряжение аккумуляторной батареи.

Если рассматривать устройства диагностирования с точки зрения конструкции, то здесь можно выделить два основных принципа их построения: аппаратный и индикаторный, с применением тепловых датчиков, светодиодов, обычных ламп накаливания и др. Применение *индикаторных устройств* позволяет упростить методику диагностирования и сами устройства, однако точность и достоверность диагностирования при этом снижаются. К тому же эти устройства трудно поддаются процессу автоматизации. Например, для контроля температуры диода используются термоиндикаторы, которые изменяют свой цвет при определённой температуре и сохраняют его после охлаждения. Термоиндикаторы выполняются на разные значения температуры, которые наносятся в виде небольших меток диаметром до 2 мм на детали диода. Термоиндикаторы дают наиболее полную картину о температурных режимах диодов и тиристоров под нагрузкой, что способствует сокращению объёма ревизионных работ и уменьшению затрат на их выполнение.

Светодиодные индикаторы нашли применение при разработке диодного тестера, состоящего из двух щупов и блока питания. Один из щупов содержит светодиодный индикатор, с помощью которого можно проверять техническое состояние диодов в цеху и на локомотиве.

На основании закона распределения токов по параллельным ветвям в выпрямительном блоке можно с помощью сигнальной лампы и фотодиода определить дефектный диод. При пробое хотя бы одного диода появляются уравнивающие токи, которые через разделительный трансформатор или сигнальную лампу и фотодиод поступают на индикаторное устройство.

*Аппаратный принцип* построения устройств диагностирования получил наибольшее распространение, так как позволяет получать наиболее достоверные данные о техническом состоянии выпрямительных блоков, обладает большой универсальностью и способностью более глубоко исследовать физические свойства кремниевой структуры.

**Измерение температуры полупроводниковых диодов.** Для измерения температуры  $p$ - $n$ -перехода существует множество разнообразных схем, одна из которых приведена на рис. 34.

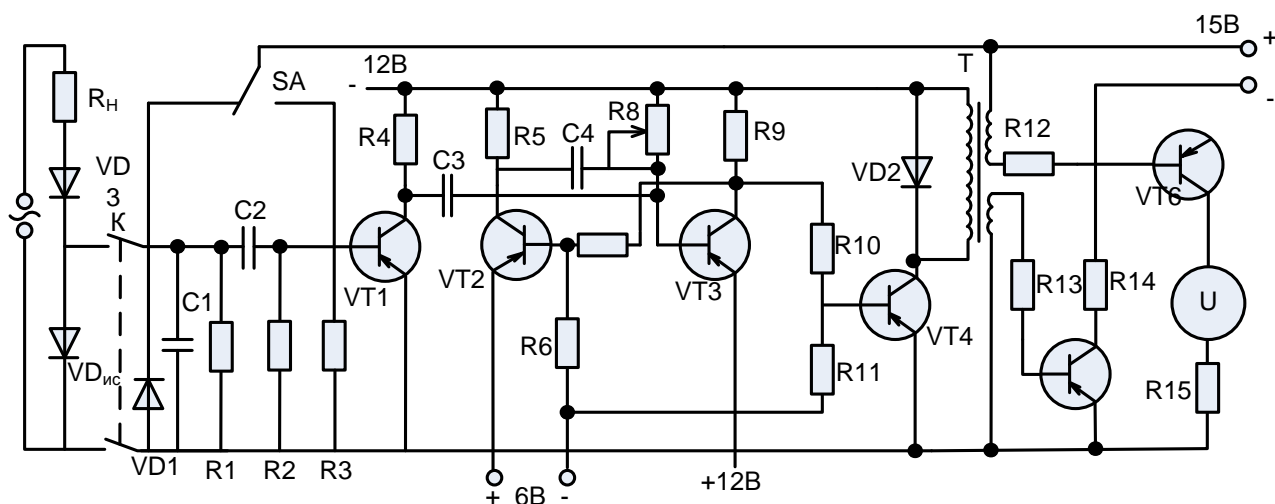


Рис. 34. Принципиальная схема прибора для контроля тепловых параметров диодов

Принципиальная схема прибора (рис. 34) даёт возможность измерить температуру выпрямительного элемента в установившихся режимах работы в любых преобразовательных блоках независимо от характера нагрузки. Схема прибора выполнена на транзисторах  $VT1$ – $VT6$ , диодах  $VD1$ ,  $VD2$ , резисторах  $R1$ – $R15$ . Переключателем  $SA$  схема переключается на калибровочный резистор  $R3$  или исследуемый диод  $VD_{uc}$ . Для защиты прибора от напряжения силовой цепи служит диод  $VD3$ . При открытии транзистора  $VT1$  срабатывает мультивибратор, собранный на транзисторах  $VT2$  и  $VT3$ . Время его срабатывания измеряется несколькими десятками микросекунд, поэтому схема позволяет измерять падение напряжения на диоде  $VD_{uc}$ , пропуская по нему в непроводящий пе-

риод постоянный ток в прямом направлении. При постоянной амплитуде прямого тока падение напряжения на диоде линейно изменяется с изменением его температуры: с повышением температуры сопротивление уменьшается. Благодаря этому можно вольтметром измерять непосредственно температуру *p-n*-перехода. При подключении источника питания 12 В открывается транзистор *VT3* и заряжается конденсатор *C4*.

Транзистор *VT1* открывается при подключении прибора к исследуемому диоду ключом *K*, а *VT3* – закрывается, при этом конденсатор *C4* разряжается, определяя время работы выходного усилителя на транзисторе *VT4*. По первичной обмотке трансформатора начинает проходить ток, а наведённое напряжение на вторичных обмотках открывает транзисторы *VT5* и *VT6*. Это позволяет пропустить через диод *VD<sub>uc</sub>* в непроводящий период его работы прямой ток от источника тока напряжением 15 В и измерить падение напряжения от этого тока. Данным прибором без предварительной градуировки можно по значению падения напряжения измерить температуру, а информацию о состоянии *p-n*-перехода передать на средства обработки полученных данных.

**Измерение теплового сопротивления.** В процессе работы выпрямительных блоков происходит их нагрев из-за потерь мощности, причем чем больше нагрев, тем больше нарушена конструкция диод-радиатор. Потери мощности обусловлены в основном током нагрузки, протекающим через диод в проводящем направлении. Кроме того, незначительная часть мощности рассеивается в диоде при протекании обратного тока. Преобладающая часть потерь мощности выделяется в виде тепла в небольшом объёме полупроводниковой структуры. Поэтому основным критерием технического состояния диода является тепловой режим конструкции.

Тепловое сопротивление диода можно представить как сумму тепловых сопротивлений отдельных элементов системы:

$$R_T = R_{п-к} + R_{п-р} + R_{р-о},$$

где  $R_{п-к}$  – тепловое сопротивление участка от *p-n*-перехода до корпуса;  $R_{к-р}$  – тепловое сопротивление между корпусом диода и радиатором;  $R_{р-о}$  – тепловое сопротивление между контактной поверхностью радиатора и охлаждающим воздухом.

Все три параметра численно равны установившемуся перегреву на соответствующем участке, отнесённому при рассеянии в структуре *p-n*-перехода единичной мощности. Все эти величины зависят от геометрических размеров, конфигурации и материала, качества контактных соединений элементов конструкции, степени чистоты поверхности радиатора и скорости охлаждающего воздуха. При надлежащем уходе за выпрямительным блоком в процессе его эксплуатации (проверка креп-

ления диодов на радиаторе, содержание в чистоте радиаторов, обеспечение необходимой скорости охлаждающего воздуха) значения тепловых сопротивлений  $R_{к-р}$  и  $R_{р-о}$  не меняются. В то же время тепловое сопротивление  $R_{п-к}$ , равное тепловому сопротивлению собственно диода  $R_B$ , в эксплуатации значительно возрастает. Так как номинальное значение сопротивления  $R_B$  составляет почти 45 % номинального значения сопротивления всей тепловой системы, то с увеличением  $R_B$  сопротивление  $R_T$  тоже возрастает весьма значительно. Это приводит к перегреву структуры диода (свыше +140 °С) и выходу его из строя.

Основная причина увеличения теплового сопротивления диода в эксплуатации – постепенное разрушение мягкого припоя между термокомпенсирующей вольфрамовой пластиной и медным основанием диода. Разрушение в свою очередь приводит к ухудшению контакта между упомянутыми деталями, а, следовательно, к увеличению его теплового сопротивления.

Рост теплового сопротивления сопровождается увеличением температуры структуры диода, что со временем приводит к полному разрушению припоя. Для оценки значения теплового сопротивления разработано множество электронных специализированных установок, однако все они имеют сложные принципиальные схемы, поэтому рассмотрим только структурные схемы (рис. 35).

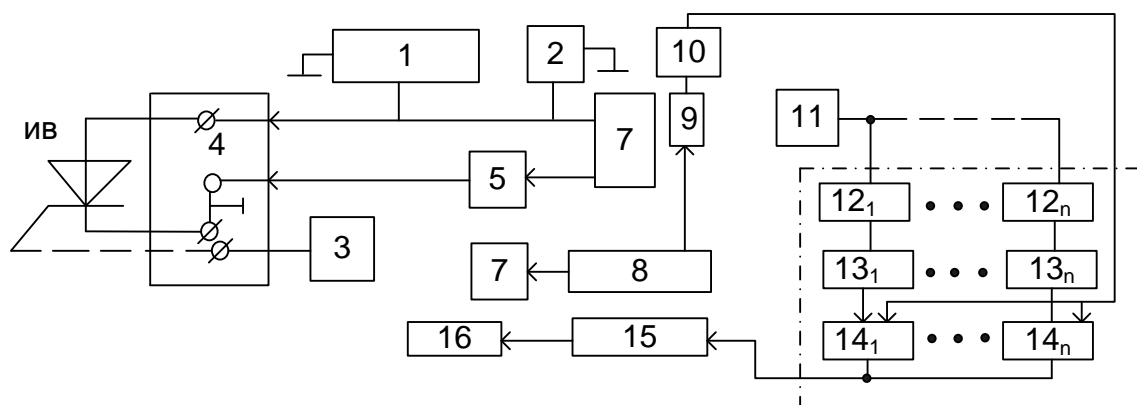


Рис. 35. Структурная схема установки для экспресс-контроля значения теплового сопротивления: 1 – источник греющего тока; 2 – источник измерительного тока; 3 – источник управления (для тиристоров); 4 – клеммы; 5 – переключательный блок; 6, 10, 11 – импульсные ключи; 7 – ячейка памяти; 8 – усилитель; 9 – переключатель; 12<sub>1</sub>–12<sub>n</sub> – делители; 13<sub>1</sub>–13<sub>n</sub> – ячейки памяти; 14<sub>1</sub>–14<sub>n</sub> – компараторы; 15 – дешифратор; 16 – цифровое табло

Испытуемый диод *ИБ* через клеммы 4 подключается к источнику измерительного тока 2 (если испытанию подвергается тиристор, то включают источник управляющего тока 3). Измеряется падение напряжения на диоде и полученные значения записываются в ячейку памяти 7, подключаемую к диоду через переключатель 5. После фиксации падения напряжения блок управления подключает переключатель 5 к входу импульсного ключа 6. При этом ячейка 7, которая не только фиксирует измеренные значения падения напряжения, но и воспроизводит его, подключается к импульсному ключу 6. На его вход подаётся разность напряжений на диоде и ячейке памяти. Одновременно с этим подключается источник тока 1, который вызывает нагревание диода. Через некоторое время блок управления отключает источник тока 1 и подаёт сигнал на включение импульсного ключа 6. На входе ключа при этом создается разность напряжений на нагретом диоде и ячейке памяти 7, пропорциональная температуре перегрева полупроводниковой структуры диода. Импульсный ключ 6, включившись, передаёт эту разность напряжений на вход импульсного усилителя 8. С выхода импульсного усилителя через переключатель 9 и импульсный ключ 11, срабатывающий одновременно с ключом 6, напряжение, пропорциональное перегреву диода, через делители  $12_1-12_n$  с различными коэффициентами деления поступает в запоминающие ячейки  $13_1-13_n$ . Здесь оно фиксируется и с выходов поступает на опорные входы компараторов  $14_1-14_n$ .

Через определённый промежуток времени с блока управления подаётся сигнал на переключение переключателя 9 с входа импульсного ключа 11 на вход импульсного ключа 10 и сразу же вслед за этим идет подача сигнала на включение импульсных ключей 6 и 10. Так как при этом на входе ключа 6 существует разность напряжений, пропорциональная перегреву полупроводниковой структуры диода после её охлаждения в течение определённого времени, то напряжение, пропорциональное этому перегреву, после усиления усилителем 8 через переключатель 9 и импульсный ключ 10 поступает на вторые входы компараторов  $14_1-14_n$ . Здесь они сравниваются с напряжениями, поступающими из ячеек памяти  $13_1-13_n$ . Те компараторы, у которых напряжение, зафиксированное ячейками  $13_1-13_n$ , оказывается меньше напряжения, поступающего от импульсного ключа 10, срабатывают. Информация о числе сработавших компараторов дешифратором 15 преобразуется в информацию о значениях тепловых сопротивлений и подаётся на табло 16. Установка имеет пять градаций значений установившегося теплового сопротивления. При значении  $R_T$  от 0,3 до 0,55  $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  диоды характеризуются как дефектные, имеющие большой

процент разрушения припоя. Машинное время измерения для диодов В-200 и ВЛ-200 примерно 1 с. Испытание диодов проводится без снятия их с выпрямительного блока. Установка подключается к диодам силовыми кабелями с пружинными зажимами.

Тепловое сопротивление диодов в выпрямительном блоке измеряют на передвижном стенде (рис. 36).

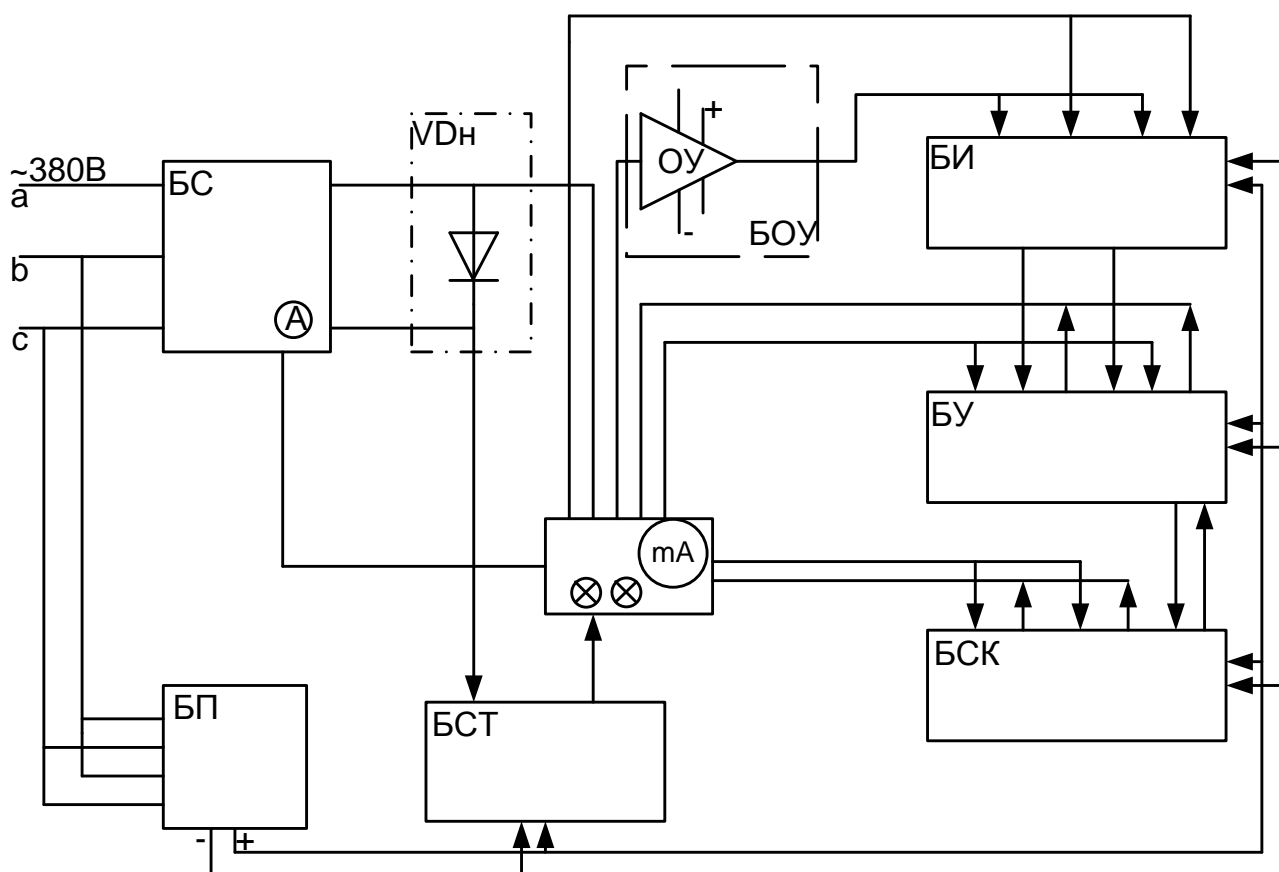


Рис. 36. Структурная схема передвижного стенда измерения теплового сопротивления диодов: БС – силовой блок; БП – блок питания; БОУ – блок операционных усилителей; БИ – блок измерения; БУ – блок управления; БСК – блок самоконтроля; БСТ – блок стабилизаторов; ПУ – пульт управления;  $VD_{и}$  – исследуемый диод

Он построен на электронных элементах и имеет небольшие размеры и массу. Стенд состоит из следующих блоков: блока операционных усилителей *БОУ*, блока измерений *БИ*; блока самоконтроля *БСК* и блока стабилизаторов *БСТ*. Кроме того, стенд содержит силовой блок, основу которого составляет силовой трансформатор с выпрямительным тиристорным блоком. Все блоки получают питание от блока питания *БП* напряжением постоянного тока: 6; 12; 15; 20; 25 В и переменного тока: 3, 13; 25 В. Управление блоками ведётся с пульта управления *ПУ*, а управление процессом измерения – с блока управления *БУ*. Стенд подклю-



ется к источнику трёхфазного тока напряжением 380 В, а для подключения к выпрямительному блоку стенд оборудован гибкими медными кабелями с зажимами на концах.

Методика измерения теплового сопротивления во многом аналогична ранее рассмотренной, однако процесс измерения имеет некоторые особенности, связанные с автоматическим сравнением токов бесконтактным коммутационным блоком БС, на стенде фиксируются измеренные данные, которые можно передавать в устройства накопления и обработки информации для прогнозирования отказа.

К недостаткам выше рассмотренных устройств можно отнести то, что они имеют сложные электрические схемы, значительную стоимость и большие эксплуатационные расходы, связанные с обслуживанием этих стендов. Применение микроэлектронных и микропроцессорных устройств позволяет значительно повысить достоверность диагностирования.

## 2.6. Тиристорные преобразователи

На тяговом подвижном составе используется большое количество тиристоров. Их применяют для регулировки напряжения, преобразования его из переменного в постоянное, из однофазного – в трёхфазное и т.д.

Согласно статистическим данным число отказов тиристоров среди всей электрической аппаратуры довольно большое. В соответствии с техническими условиями число отказов тиристоров не должно превышать 12 на  $10^6$  км пробега, однако, как показывают статистические данные, это число достигает 25,5 на  $10^6$  км пробега. Поэтому для повышения надёжности тиристорных преобразователей необходимо иметь специальные стенды и установки для их диагностирования в условиях эксплуатации. В соответствии со стандартом [4, 5] проверять необходимо следующие диагностические параметры тиристоров: повторяющийся импульсный обратный ток и повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии; отпирающий ток управляющего электрода; импульсное напряжение в открытом состоянии; предельно преобразуемая мощность.

При диагностировании тиристорных преобразователей необходимо знать те параметры, которые определяют техническое состояние как отдельного тиристора, так и преобразовательной установки в целом. Для диагностирования тиристорных преобразователей разработаны и внедряются в локомотивных депо переносные и стационарные устройства *тестового и рабочего* диагностирования. При выборе средств технического диагностирования необходимо учитывать компактность, стоимость, массу, универсальность и возможность подключения к автоматизированным средствам обработки информации.

Прибор, схема которого приведена на рис. 37, позволяет контролировать значение импульсного напряжения в открытом состоянии тиристора и максимальную амплитуду тока. Если тиристор не выдерживает максимальных параметров, то его отбраковывают. Прибор состоит из:

генераторного импульсного тока *ГИТ*, вырабатывающего одиночные синусоидальные импульсы тока с амплитудой до 4000 А; аналого-цифрового преобразователя *АЦП*, преобразующего аналоговый сигнал в цифровой для выдачи информации на цифровое табло; блока запуска *БЗ* (при достижении током определённого значения он запускает *АЦП*); преобразователя кодов *ПК* (преобразует двоичный код в двоично-десятичный и выдаёт информацию на табло). С помощью этого прибора проводится подбор заменяемых тиристоров по прямому падению напряжения. Согласно инструкции, разброс по суммарному прямому падению напряжения между параллельными ветвями тиристоров плеча допускается не более 0,25 В.

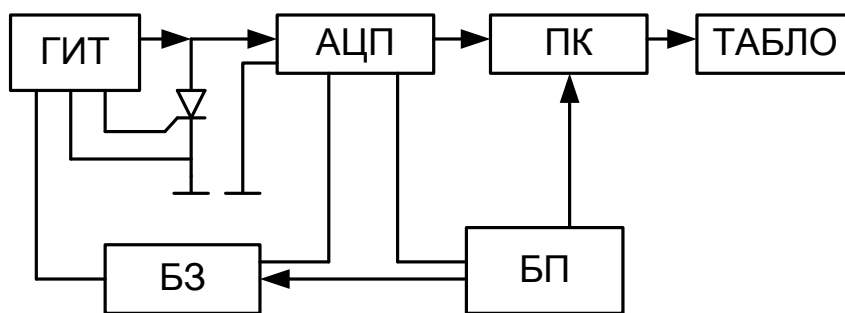


Рис. 37. Структурная схема измерения максимальных значений параметров тиристора

В комплект ранее рассмотренного прибора (рис. 37) входит прибор, предназначенный для диагностирования цепи управления тиристором (рис. 38).

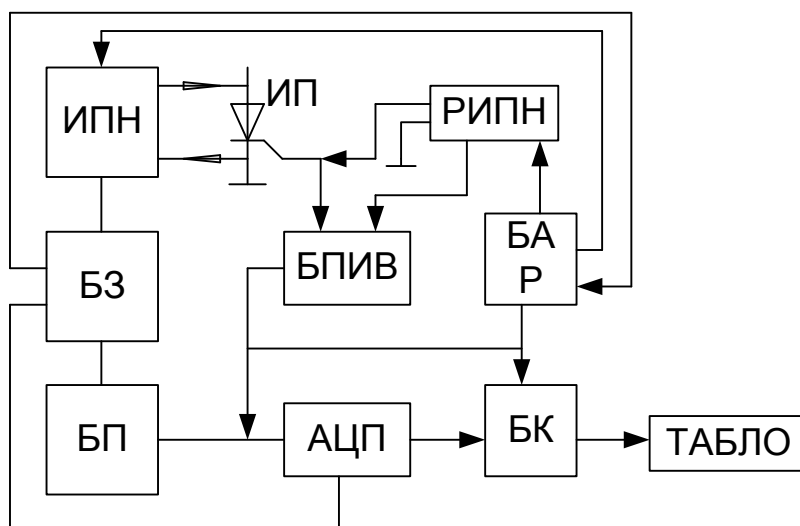


Рис. 38. Структурная схема прибора УИПТ-2 для диагностирования цепи управления тиристорами:  
ИПН – источник постоянного напряжения; БЗ – блок запуска; БПИВ – блок преобразования измеряемых

величин; РИПН – регулируемый источник постоянного напряжения; БАР – блок автоматической регулировки; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БП – блок питания; ПК – преобразователь кода

Основные параметры, определяющие работоспособность управляющей цепи тиристора: значения тока, напряжения и продолжительность импульса управления. Немаловажную роль играет и форма управляющего импульса, поэтому при диагностировании цепи управления необходимо определить роль и влияние формы на надёжность включения тиристора.

Рассмотрим характеристику цепи управления тиристором. Все параметры находятся в определённой зависимости от температуры окружающей среды. Параметры тиристоров, приведённые в технических условиях завода-изготовителя, являются нормированными. В условиях эксплуатации эти параметры меняются и происходит разброс характеристик, что приводит к перегрузкам по току и напряжению, особенно при нарушении одновременности включения или выключения.

В результате постоянных перегрузок тиристор быстро теряет свои свойства и выходит из строя. Кроме того, если тиристор включается при малых значениях тока управления и напряжения на управляющем электроде, то это существенно снижает помехоустойчивость преобразователя.

Для разработки методики диагностирования выбираются эталонные параметры и параметры предотказного состояния. Согласно техническим условиям завода-изготовителя, при замене тиристорov вновь устанавливаемые должны иметь ток управления не менее 30 мА и напряжение управления не менее 1 В при температуре окружающей среды плюс 25 °С.

Работа устройства заключается в подаче на анод тиристора напряжения 12 В и автоматическом снятии его после включения тиристора. Тиристор включается напряжением, подаваемым от блока *РИПН*. Измеряемые величины полученного сигнала преобразуются в блоке *БПИВ* и далее через блоки *АЦП*, *ПК* поступают на табло.

Рассмотренное устройство имеет некоторые недостатки, связанные с тем, что не все параметры можно проверить одним прибором, а вместе они имеют большую массу (более 50 кг), поэтому использовать их как переносные не всегда удобно. Эксплуатация этих устройств в условиях локомотивных депо позволяет значительно повысить качество проверки тиристорov по сравнению с типовым прибором НР 247, с помощью которого определяется только класс тиристора.

*Комплексное* диагностирование является наиболее перспективным видом контроля за техническим состоянием тиристорных преобразователей на электровозах и в электропоездах. В комплекс входят встроенные и внешние (стационарные) средства диагностирования. Встроен-

ные средства работают по принципу рабочего диагностирования. При этом определяются тиристоры, имеющие пробой, внутренний обрыв, тепловые перегрузки и ухудшение условий рабочего режима из-за разброса их характеристик.

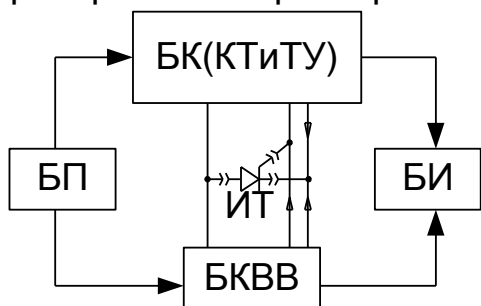


Рис. 39. Структурная схема переносного прибора контроля параметров тиристоров:

БП – блок питания; БК (КТ и ТУ) – блок контроля класса тиристора и тока управления; БКВВ – блок контроля времени включения и выключения; БИ – блок индикации; ИТ – испытуемый тиристор

– время включения тиристора при прямом импульсном токе с амплитудой 250 А с последующим приложением через определённый регулируемый интервал времени прямого напряжения с амплитудой 100 В и крутизной 10 В/мкс. Диапазон измеряемого времени выключения при заданных условиях составляет 5–375 мкс.

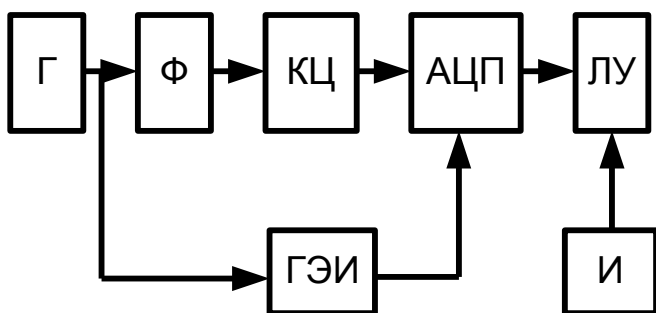


Рис. 40. Структурная схема прибора диагностирования силовых цепей тиристора:

Г – генератор; Ф – формирователь; КЦ – контролируемая цепь; АЦП – амплитудно-цифровой преобразователь; ЛУ – логическое устройство; И – индикатор; ГЭИ – генератор эталонных импульсов

подаётся на амплитудно-цифровой преобразователь АЦП, в котором

Схема стенда тестового диагностирования частичных отказов силовых тиристоров приведена на рис. 39.

С помощью этого стенда (рис. 39) контролируются следующие параметры:

– ток утечки при прямом и обратном анодном напряжениях, равных паспортным данным тиристора соответствующего класса. При этом фиксируется превышение тока утечки над допустимым (10 мА);

– включение тиристора управляющим током при прямом анодном напряжении, равном напряжению тиристора соответствующего класса. При этом стенд определяет принадлежность испытываемого тиристора к одному из разрядов по отпирающему току управления;

Стенд используется для отбраковки тиристоров при комплектовании преобразователей. Для диагностирования силовых цепей тиристорного преобразователя применяется прибор тестерного типа, входящий в комплексную установку (рис. 40).

На контролируемую цепь КЦ подаётся сформированное генератором Г и формирователем Ф требуемое тестовое воздействие, при этом в цепи возникает переходной процесс. Выходное напряжение с контролируемой цепи КЦ

происходит сравнение эталонных сигналов, снимаемых с генератора эталонных импульсов *ГЭИ*, с полученными сигналами от воздействия на контролируемую цепь *КЦ* в заданный момент времени. В зависимости от значения напряжения в контролируемой цепи в данный момент в логическое устройство *ЛУ* из *АЦП* поступает информация, которая расшифровывается и подаётся в устройства индикации *И*. Прибор используется также для диагностирования конденсаторов или участков цепи с ёмкостной реакцией. В качестве тестового сигнала подаётся постоянный ток. Аналогично определяются обрыв в силовой цепи, короткое замыкание или уменьшение ёмкости.

Диагностирование тиристорных преобразователей выполняется при плановых ремонтах.

## 2.7. Электронные устройства

В системах контроля, управления и защиты современных локомотивов применяются электронные устройства на дискретных элементах и интегральных микросхемах.

К ним относятся: блоки управления выпрямительно-инверторным преобразователем БУВИП, блоки управления реостатным и рекуперативным торможением БУРТ и САУРТ, блоки обеспечения безопасного движения, устройства автоматизации управления и контроля и многие другие. Блочность конструкций позволяет лучше и с большими удобствами проводить контроль технического состояния сложных электронных устройств. Каждый блок имеет контрольные точки, которые позволяют быстро выполнять техническое диагностирование. Для удобства контроля все точки выводятся на лицевые панели блоков. Главным при диагностировании электронных устройств локомотива является правильный выбор диагностических параметров и методики диагностирования. Сигналы любого электронного блока характеризуются амплитудой, формой, частотой, периодом и др.

Процедура контроля строится обычно по классической схеме проверочного эксперимента: на входы контролируемого блока подаются тестовые (стимулирующие) воздействия, а с выходов снимается необходимый сигнал. Сравнение полученного сигнала с ожидаемым эталонным позволяет судить о техническом состоянии электронного устройства. Наиболее простым вариантом сравнения сигналов является процесс *тестирования* по заранее составленной таблице истинности, когда каждой совокупности входных сигналов соответствует определённая ожидаемая реакция.

Помимо тестового применяется рабочее диагностирование, но при этом необходимо иметь стыковочные устройства с разделительными

устройствами во избежание взаимного воздействия рабочих и диагностических сигналов.

К обычным средствам контроля относятся приборы, которые наиболее широко используются для тестирования измерительных устройств. В качестве тестовых приборов используются генераторы, а в качестве измерительных – осциллографы, импульсные вольтметры, частотометры, счётчики и др. Для фиксации и индикации непериодических сигналов применяют запоминающие осциллографы, в которых аналоговый сигнал преобразуется в цифровой, хранится в памяти и затем вновь преобразуясь в аналоговый, индуцируется на экране. Сопоставив фактические характеристики выходного сигнала контролируемого блока с эталонными, определяют его исправность, а проверив прохождение сигнала по контрольным точкам, выявляют участок электронной схемы, содержащий дефектный элемент. Такой способ диагностирования характерен для блоков с аналоговыми сигналами и для цифровых блоков, выполненных по ниточной структуре.

Для аппаратуры шинной структуры с программным управлением предпочтительнее представление информации в параллельном коде одновременно на большом числе линий. В этом случае обычная контрольно-измерительная аппаратура может использоваться как вспомогательная, а для диагностирования созданы специальные устройства, такие, как логические и сигнатурные анализаторы, генераторы логических состояний, внутрисхемные эмуляторы.

*Генераторы логических состояний* вырабатывают последовательность многоразрядных слов, поступающих параллельно на проверяемые блоки. В них устанавливают длину последовательности, частоту поступающих сигналов, вид кода и т.п.

*Сигнатурный анализ* основан на том, что технически исправное электронное устройство (чаще цифровое) при периодическом воздействии на него тестового сигнала всегда выдаёт один и тот же выходной сигнал. Если же этот выходной сигнал отличается от ожидаемого, то блок считается технически неисправным.

*Логические анализаторы* представляют собой первые приборы диагностирования, заменившие традиционные приборы и аппараты. Основная задача логических анализаторов – следить за изменением параметров сигналов в выбранных точках и сопоставлять полученные данные с эталонными. Сигналы со временем меняются по форме и амплитуде, с учетом этого подразделяются и логические анализаторы. Для работы с логическими анализаторами необходимо хорошо знать методику отыскания неисправностей, уметь интерпретировать получен-

ные данные и ясно представлять структуру контролируемого блока и особенности его работы.

Совокупность операций, при которых одно устройство (моделирующее) копирует действие другого устройства (моделируемого), называется эмуляцией. Комплексы аппаратных и программных средств, реализующих эти операции, получили название эмуляторы. Они широко используются при поиске неисправностей в программно-управляемой аппаратуре, такой, как блок управления выпрямительно-инверторным преобразователем, блоки управления электрическими тормозами и др.

Достоверность диагностирования зависит от принятых допусков, точности измерительной аппаратуры и выбранных датчиков имитации контроллера машиниста и силовых цепей. Следует заметить, что схемы диагностирования электронных устройств довольно сложны и нередко дополняются элементами самодиагностирования. Наличие последних сопряжено с заметным повышением стоимости разработки и самих приборов. Однако дополнительные затраты с избытком окупаются за счёт снижения простоя объектов диагностирования при техническом обслуживании и повышения степени уверенности пользователя в измерительных приборах. Наличие средств самодиагностирования повышает надёжность таких сложных схем, как схемы управления тиристорными преобразователями.

Рассмотрим устройство диагностирования цепей управления тиристорным преобразователем (рис. 41), которое состоит из датчиков тока *ДТ*, выходных каскадов *ВК*, блока управления *БУ* с индикацией результатов диагноза по критериям «Норма», «Больше нормы», «Меньше нормы». Блок устройства управления *УУ* хранит алгоритм диагностирования и управляет работой всех остальных элементов схемы.

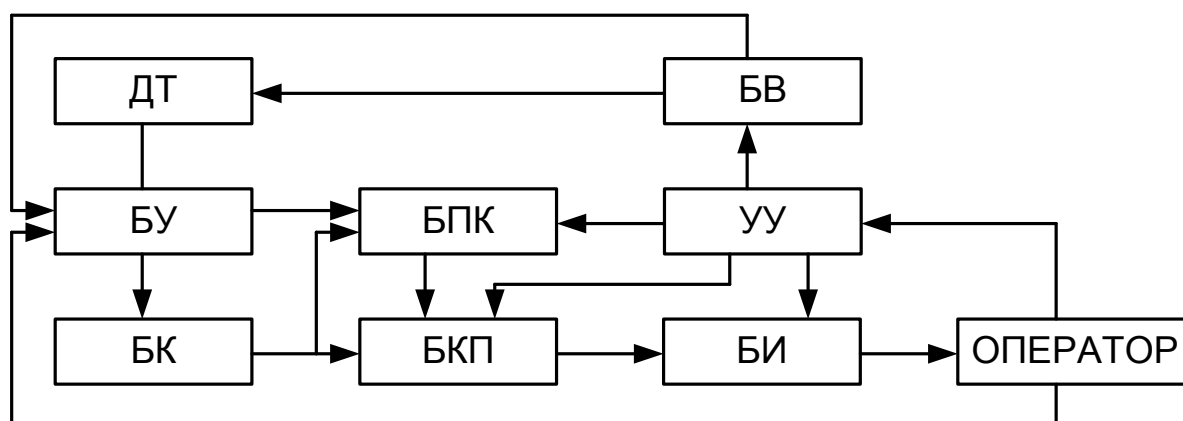


Рис. 41. Структурная схема прибора диагностирования электронной аппаратуры управления тиристорными преобразователями: ДТ – датчик тока; БУ – блок управления; ВК – выходной каскад; БПК – блок преобразования и коммутации;

БКБ – блок контроля параметров; БВ – блок воздействия; УУ – устройство управления; блок питания

Устройство управления представляет собой дискретный автомат, выполненный на интегральных микросхемах. На его вход подаются сигналы от оператора для запуска устройства. По командам УУ блок воздействия *БВ* вырабатывает тестовые сигналы и в соответствии с алгоритмом диагностирования в определённой последовательности подаёт их на контрольные точки электронного блока управления тиристорным преобразователем. Этими сигналами воздействия являются все сигналы контроллера машиниста и соответствующие различным режимам токи имитации нагрузки, поступающие в датчики тока ДТ. Выходные сигналы с блока управления подаются в блок преобразования и коммутации *БПК* по команде УУ. Нормализованные в *БПК* сигналы поступают в блоки контроля параметров *БКП*, которые по сигналам УУ сравнивают значения выходных параметров с электронного блока с соответствующими верхними и нижними допустимыми его значениями и выдают информацию о результатах сравнения в блок индикации *БИ*. Оператор, руководствуясь информацией *БИ*, в случае необходимости может регулировать уставки тока в блоке управления *БУ*.

Именно таким образом происходит диагностирование электронных блоков непосредственно на месте, с помощью переносного прибора, т.е. без его снятия с локомотива. Прибор можно использовать и для стендовых исследований состояния электронных блоков, и поиска дефекта с глубиной поиска неисправности до отдельного конструктивно разделённого блока.

Прибор получает питание от бортового источника напряжением +50 В. Он подключается к блоку электронного управления через разъём. Прибор позволяет проводить безосциллографическую проверку правильности функционирования электронного блока управления преобразователем.

## 2.8. Цепи управления

Техническое состояние локомотива, обеспечивающего выполнение им заданных функций, во многом зависит от надёжной работы низковольтных цепей управления. В процессе эксплуатации подвижного состава количество отказов, приходящихся на низковольтную аппаратуру, довольно большое. Прежде всего, это такие отказы, как отсутствие контакта, обрыв проводов, пробой на корпус, появление постороннего напряжения питания, дефекты электрической схемы. Для быстрого отыскания отказа в многочисленных блокировочных контактах и проводах цепей управления разработано достаточное количество устройств и ме-



тодик, но все они требуют дополнительных затрат на подключение устройств диагностирования к проверяемой схеме [1, 2, 9, 14].

В условиях депо диагностирование цепей управления можно проводить, используя междвагонные и межелектровозные разъёмы (рис. 42).

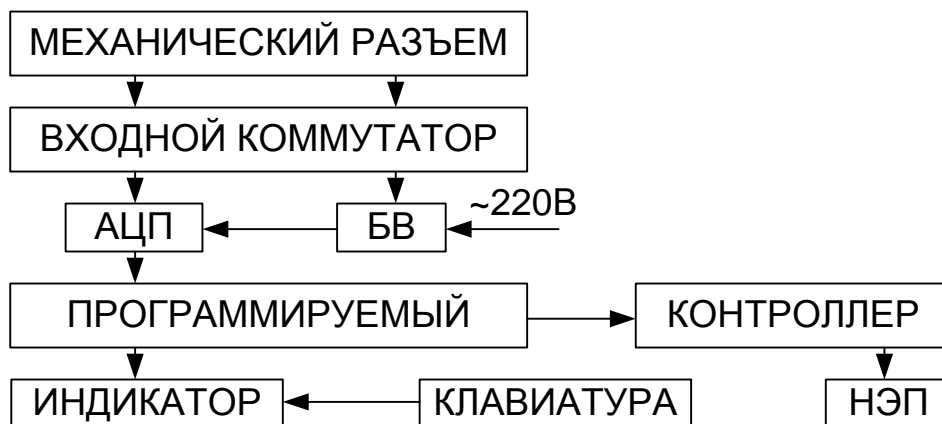


Рис. 42. Структурная схема диагностирования цепей управления локомотива с помощью ЭВМ: НЭП – накопитель на электронных платах

Основными диагностическими параметрами цепи управления являются: целостность цепи, качество контакта и отсутствие короткого замыкания. Для диагностирования цепи управления используется ЭВМ, которая обрабатывает информацию. Каждый локомотив имеет электронный паспорт ЭП, куда записывается состояние цепей управления. Электронный комплекс диагностирования цепей управления состоит из портативного электронного блока, служащего для сбора диагностической информации (УСДИ), стационарного обрабатывающего комплекса на ЭВМ типа IBM PC с принтером и пакета прикладных программ. Переносной блок УСДН-148, состоящий из программируемого микроконтроллера, контроллера накопления электронных паспортов (НЭП), клавиатуры и индикатора, находится в кабине машиниста и подключается к локомотиву через разъёмы кабелем, имеющим 148 жил. В качестве критерия состояния цепи управления принимается степень совпадения измеряемых параметров с эталонными. При эксплуатации необходимо иметь на локомотиве бортовую систему диагностирования цепей управления, это позволит машинисту в критических ситуациях, особенно в пути следования, отыскать дефектное место в цепи управления.

Устройства диагностирования должны удовлетворять следующим требованиям: быстро отыскивать не только место отсутствия контакта, но и его качество; работать в условиях эксплуатации и при ремонте; обеспечивать высокую скорость диагностирования и его достоверность;

обеспечивать связи с внешними (стационарными) и внутренними (бортовыми) устройствами.

Для разработки алгоритма диагностирования низковольтных цепей локомотива всю схему разбивают на отдельные функциональные блоки: блок запуска дизеля; блок управления линейными контакторами, блок управления защитой и т.д. Для каждого блока разрабатывается логическая схема, в которой выбирают контрольные точки и присваивают им соответствующий номер. Порядок нумерации определяется очередностью срабатывания электрических аппаратов и замыканием блокировочных контактов. Каждая контрольная точка должна иметь выход на узел стыковки с устройством диагностирования. Контрольные точки выбирают, исходя из их информативности и надёжности узла, контролируемого в данной точке. Для низковольтных цепей управления локомотива в основном применяют рабочее диагностирование.

Устройства диагностирования по используемой элементной базе подразделяются на релейные и электронные. Последние наиболее перспективны при использовании на локомотивах микропроцессорных устройств. Применение интегральных микросхем в устройствах диагностирования цепей управления позволяет уменьшить их размеры, массу, потребление электрической энергии и расширить технические возможности (определение качества контакта и правильности функционирования цепи управления).

## **2.9. Вопросы для самоподготовки**

1. Для чего нужна схема причинно-следственных связей при диагностировании ТЭД?
2. Как рассчитывается коэффициент абсорбции?
3. Для чего используется мегаомметр?
4. Назовите основные частоты неисправностей ТЭД.
5. По каким параметрам диагностируется фазорасщепитель?
6. Объясните принцип работы структурной схемы измерения диагностирования токоприемника.
7. Назовите основные параметры диагностирования силовых контакторов.
8. Почему возникают отказы в выпрямительных блоках?
9. Объясните принцип работы схемы для диагностирования тепловых параметров диода.
10. Как рассчитать тепловое сопротивление диода?
11. Объясните принцип работы схемы для диагностирования цепи управления тиристора.

12. Объясните принцип работы структурной схемы диагностирования цепей управления локомотива.
13. Как определить обратный ток диода?
14. Назовите три группы параметров ТЭД при автоматизированном диагностировании.
15. Приведите схему устройства диагностирования коллектора по его биению.
16. Приведите алгоритм работы программы диагностирования коллекторно-щеточного узла.

### **3. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

#### **3.1. Экипажная часть**

В самых трудных условиях эксплуатации находится механическая часть тягового подвижного состава. Динамические воздействия от пути, продольные удары от вагонов, поперечные колебания в кривых рождют самые разнообразные усилия, вызывающие появление чрезмерных износов, трещин, изломов и других дефектов. Быстрое развитие дефекта приводит к аварийной ситуации, а иногда и к аварии с большими последствиями. Экипажная часть локомотива является той частью, которая обеспечивает безопасность движения, поэтому её детали и узлы должны проверяться и диагностироваться в первую очередь. К основным узлам экипажной части локомотива, обеспечивающим безопасность движения, относятся: колёсные пары, буксовые узлы, рессорное подвешивание, автосцепные устройства и рамы тележек. Основными задачами технического диагностирования экипажной части является не только своевременное выявление дефектов, но и предупреждение при этом аварийного состояния всех узлов и деталей.

При разработке систем диагностирования узлов экипажной части следует учитывать, что технический контроль должен проводиться не только в стационарных условиях, но и в движении. Следует отметить, что в большинстве случаев наиболее достоверную информацию о состоянии экипажной части можно получить только в движении. Поэтому наибольшей информативностью обладают встроенные (бортовые) средства, особенно для электровозов, имеющих большие плечи обслуживания. Но не все дефекты можно обнаружить с помощью встроенных средств, поэтому применяют стационарные средства контроля, которые дополняют и углубляют информацию, полученную с помощью бортовых средств.

Для технического диагностирования экипажной части используют разнообразные методы: виброакустические, тепловые, методы спектрального анализа и др. Наибольшее распространение получили виброакустические и тепловые методы. Для обнаружения греющихся букс в поезде применяют напольные датчики, работа которых основана на тепловом методе контроля.

**Буксовые узлы.** Буксовый узел на любом локомотиве является наиболее важным узлом, обеспечивающим безаварийную работу, поэтому контроль за его состоянием должен проводиться в первую очередь. Условия работы буксового узла и конструктивные особенности не позволяют проводить визуальный контроль его технического состояния, а требуют наличия специальных средств. Для того, чтобы получить информацию о техническом состоянии деталей буксы, необходимо подобрать датчики и преобразователи физических параметров в электрические. Датчики подбирают, исходя из сигналов, поступающих от деталей буксового узла. Сигналы можно получить или во время движения локомотива, или в депо при вывешивании колёсных пар, но в каждом случае необходимо учитывать взаимное расположение деталей буксы.

Работоспособность буксового узла в основном определяется состоянием подшипников. Сигнал в подшипнике зарождается при взаимодействии наружного и внутреннего колец, а также роликов в рабочей зоне, которая при вывешивании колёсных пар переходит в нижнюю часть буксы. Масса колёсной пары передаётся на нижнюю часть роликов (рис. 43).

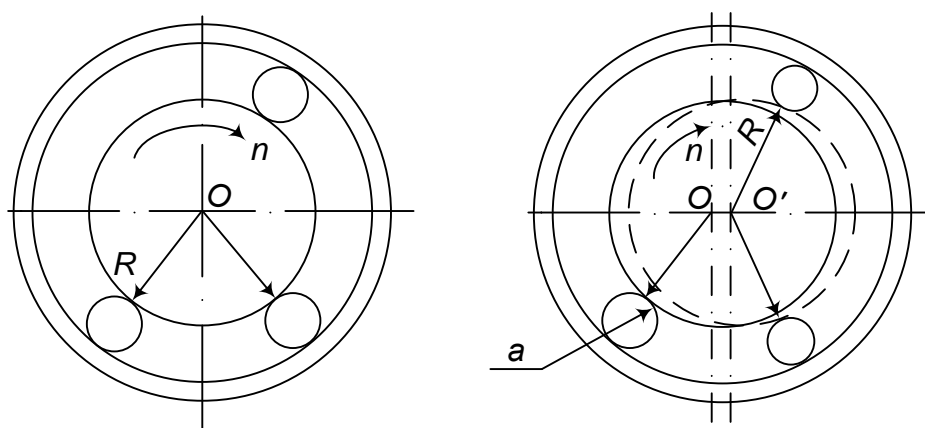


Рис. 43. Схема формирования диагностических сигналов в подшипнике

Обычно акустический сигнал буксового подшипника представляет собой лёгкий шум, среднее значение которого значительно ниже шума редуктора. При разгоне и остановке локомотива хорошо прослушивается постукивание, возникающее от перекатывания внутреннего кольца подшипника по роликам. Такое явление называется *прецессией вала*.

Вал при вращении в подшипниках занимает два положения «низкое» и «высокое». В первом случае вал опирается на два ролика и имеет устойчивое положение. Вращаясь, вал (внутреннее кольцо) вращает ролики и въезжает на них как на колёсах вверх по беговой дорожке наружного кольца подшипника. Подъём происходит сравнительно медленно и продолжается до тех пор, пока центр одного из роликов не пересечёт линию действия радиальной силы. В этот момент вал занимает неустойчивое положение и опрокидывается, ударяясь при этом о следующий ролик. Сила удара зависит от размера радиального зазора, а частота удара равна частоте пересечения роликами линии действия радиальной силы. Она зависит от размера подшипника, числа роликов и частоты вращения вала. Кинетическая энергия удара расходуется на разрушение подшипника, его нагрев и возбуждение в механизме упругих волн. И в этот момент зарождается сигнал, соответствующий техническому состоянию подшипника. Данное явление прослушивается у всех подшипников при вращении колёсной пары на малой скорости. С увеличением скорости звуки от перестукивания сливаются в однотонный гул.

Подобные колебания вала при перекачивании по роликам называются *релаксационными, или разрывными*. Релаксационные колебания характеризуются периодом, амплитудой и начальной фазой, что позволяет рассчитать необходимые параметры диагностического сигнала.

Период опрокидывания вала

$$T = \frac{20(R + a)}{RNn},$$

где  $R$  – радиус внутреннего кольца;  $a$  – радиус ролика;  $n$  – частота вращения вала;  $N$  – число роликов в подшипнике.

Все однотипные подшипники имеют одинаковые параметры, что даёт возможность иметь одно устройство диагностирования для всех однотипных букс.

Для диагностирования буксовых узлов необходимо выбрать эталонные параметры. Их выбирают на основе анализа отказов, причин, вызвавших их, при обязательном использовании методик, рассмотренных ранее. К эталонным параметрам буксового узла относятся: температура внутри буксы и разночастотные акустические сигналы.

Основная неисправность буксового подшипника – разрыв внутреннего кольца. Она возникает преимущественно из-за нарушения технических условий при напресовке. В момент разрыва кольцо раздаётся и зажимает все ролики. При вращении колёсной пары слышны щелчки, возникающие в момент прохождения места разрыва точки касания ролика. Щелчки отчётливо слышатся в течение всего оборота колёсной пары на любой частоте вращения в обе стороны в режиме тяги и на выбеге.

При наличии электроожога на роликах происходит зажим роликов в дефектном месте, особенно при небольшом радиальном зазоре. При свежих электроожогах появляются приглушённые периодические импульсы, ощущаемые рукой. С течением времени следы электроожога закатываются, но остаются местные одиночные дефекты, вокруг которых выкрашивается металл.

Одиночный дефект на ролике вызывает едва слышимые глухие импульсы и толчки. Частота появления импульсов меньше частоты вращения колёсной пары, поскольку ролик вращается вместе с сепаратором с частотой, которая меньше частоты вращения колёсной пары в 2,4 раза. Сигнал возникает в рабочей зоне, а размеры ролика таковы, что касание дефектного места внутреннего и наружного колец происходит всего 1 раз. Одиночный дефект на внутреннем кольце вызывает появление периодического приглушённого дребезга (три-четыре импульса одновременно). Его период равен времени оборота колёсной пары.

При длительной стоянке локомотива происходит обводнение смазочного материала, вследствие этого нижние ролики и внешние кольца покрываются ржавчиной, поэтому при прокручивании колёсной пары появляются приглушённые непрерывные импульсы, но более частые, чем от дефекта на внутреннем кольце. Это объясняется тем, что на один оборот колёсной пары приходится шесть перекатываний по дефектному месту.

Малый радиальный зазор одного из рядов буксового подшипника вызывает непрерывный приглушённый перестук роликов. В данном случае явление прецессии проявляется более отчётливо на низкой и высокой частотах вращения. К перекатыванию добавляется шум повышенной частоты. Он более звонкий, причём на высокой частоте вращения появляются посвистывание (заедание роликов) и сильные удары, связанные с выходом ролика из рабочей зоны. Этот дефект быстро прогрессирует и может привести к разрушению деталей подшипника.

Если прослушивается небольшой периодический шум, то это указывает на возможность касания фигурной втулкой задней крышки буксы.

Период касания равен периоду оборота колёсной пары. Если переставлять датчик по шпилькам, то можно определить точное место заедания (касания).

Выкрашивание кусков медно-графитовой токоотводящей щётки на некоторых буксах вызывает периодическое одиночное постукивание. Для убедительности и достоверности датчик необходимо установить на корпус буксы (токосъёмную часть).

Сдвоенное постукивание появляется в буксах, на которых установлен привод к скоростемеру. Период постукивания в 18 раз меньше времени оборота колеса. Причина – большой зазор между пальцем и планкой привода. Для подтверждения необходимо датчик установить на крышке

привода. Плохое крепление стопорной планки или выпадение болта характеризуется звонким непериодическим постукиванием.

Все эти признаки определяются виброакустическим методом и приборами, построенными на его основе. Следует отметить, что каждый дефект, как уже отмечалось, имеет свою определённую частоту, это позволяет более точно установить вид дефекта. Кроме этого, постоянно должна измеряться температура внутри буксы, а в условиях депо следует проверить качество смазочного материала и наличие в нём продуктов износа методом спектрального анализа.

Таким образом, при наличии трёх диагностических параметров обеспечивается достаточная глубина поиска места неисправности и высокая достоверность диагностирования.

**Колёсные пары.** К неисправностям колёсных пар, оказывающим влияние на безопасность движения поездов, относятся равномерный и неравномерный износы бандажей и цельнокатанных колёс по поверхности катания. Существующая методика измерения параметров колёсной пары шаблонами обладает невысокой точностью измерения, наличием субъективных ошибок, большой трудоёмкостью и неудобством измерений под локомотивом, поэтому предпочтительнее использование автоматизированных средств контроля. При автоматизированном контроле необходимо выбрать оптимальные параметры бандажа и методику их измерения. В основу построения известных датчиков автоматизированного измерения проката колёс положены различные физические явления, обеспечивающие бесконтактный метод измерения. Для этих целей можно использовать фотоэлектрические, акустикоэлектрические и датчики, реализующие радиометрический метод измерения.

Рассмотрим использование фотоэлектрического датчика с волоконно-оптическим преобразователем.

При движении колёсной пары по рельсам размер опускания гребня зависит не только от проката, но и от поперечных перемещений. Амплитуда перемещения колёсной пары определяется суммарным зазором между гребнями бандажей и внутренними гранями рельсов, который зависит от ширины колеи  $S$ , расстояния между внутренними гранями бандажей  $t$  и толщины гребней.

Определяющую роль в точности измерения параметров играют *датчики*. Для диагностирования параметров бандажа используют контактные и бесконтактные датчики. Контактный специализированный электромеханический датчик (рис. 44) разработан в локомотивном депо Иркутск. Датчик крепится к специальной раме и состоит из подвижного улавливающего угольника 11, на котором смонтированы датчики толщины гребня 1 и проката 2, связанные с резисторами 3, 4 и измерительным прибором. Управляющий угольник прижимается к вершине гребня поршнем 6,

который вставлен в боковую подвеску 5. К реборде колеса угольник прижимается пружиной 9. Стойка 10 укрепляется болтами на пластине 7. Датчики настраивают методом сравнения с результатами ручных измерений. При необходимости под стойку подкладывают пластины 8.

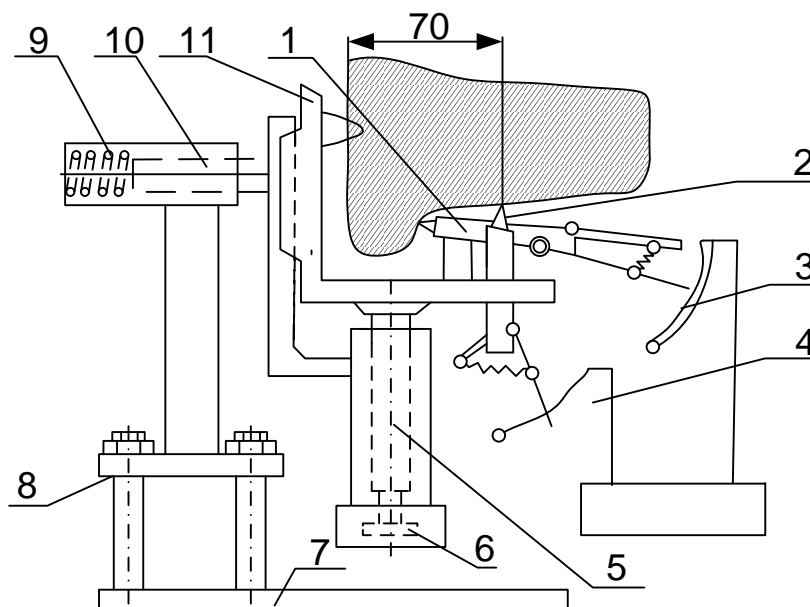


Рис. 44. Датчик контроля за износом бандажей

Скорость передвижения по установке не более 5 км/ч. Одновременно контролируются два колеса. В микропроцессорное устройство вводится информация о состоянии всех колёсных пар каждого локомотива для обработки и хранения, которая передаётся дежурному по депо для своевременной постановки локомотива на обточку бандажей колёсных пар.

### 3.2. Колёсно-моторные блоки

Колёсно-моторный блок относится к тем узлам, надёжность которых непосредственно влияет на безопасность движения поездов. Необходимо помнить, что контроль за техническим состоянием колёсно-моторного блока (КМБ) затруднён в силу его конструктивных особенностей: трудный доступ ко многим деталям, необходимость разборки – все это увеличивает время простоя локомотива в ремонте. Поэтому наиболее целесообразно проводить диагностирование без разборки, в условиях, близких к эксплуатационным.

Исследованиями установлено, что при прокручивании вывешенных колёсных пар в КМБ возникают упругие колебания с частотами 200–10000 Гц. Каждой детали соответствуют свои полосы резонансных частот. Поэтому по амплитуде импульсов и месту расположения датчи-



ков относительно оси вращения колёсной пары или шестерни можно судить о техническом состоянии детали и виде дефекта. Различными способами определяются десятки частотных полос, которые соответствуют работающим подшипникам букс и редуктора, зубчатой передаче, корпусу редуктора и др. При этом виброперемещения содержат в основном информацию о работе зубчатой передачи, а акустический шум – о работе роликовых подшипников [1, 2, 9, 10, 14].

Для технического диагностирования КМБ под локомотивом используются катковые стенды, которыми создаются такие колебательные движения, как при вращении колёсных пар, приближая тем самым условия диагностирования к эксплуатационным. Следует отметить, что наиболее достоверную информацию о техническом состоянии любого объекта можно получить только в движении, в условиях рабочей нагрузки. Определение технического состояния кинематических пар виброакустическими методами возможно при их импульсном движении. Такой характер движения наблюдается при пересопряжении зубьев шестерен и перекатывании роликов подшипников по беговым дорожкам во время вращения колёсной пары. Используя эти свойства деталей и узлов, измеряют вибрационные характеристики, по которым можно судить о техническом состоянии узла. Основными диагностическими параметрами КМБ можно считать значения *виброперемещения* или *виброускорения* и *частоту виброколебаний*. Существующие методы виброакустического диагностирования делятся на два вида: номинальный и рациональный.

*Номинальный метод* предполагает диагностирование объекта при номинальных частотах вращения. В этом режиме виброакустический сигнал содержит очень плотный спектр частот. Спектр частот заполняется не только полезной информацией, но и ненужной, вызванной соударениями, которые не несут полезной информации. Из-за этого спектр виброакустического сигнала содержит много помех. Преимуществом данного метода является то, что в полном спектре виброакустического сигнала есть динамическая составляющая сигнала дефектного элемента. Чем больше значение виброакустического сигнала, тем хуже техническое состояние объекта. Этот метод требует сложной и дорогостоящей аппаратуры диагностирования.

*Рациональный метод* предполагает диагностирование объекта при номинально возможных частотах вращения. Частота вращения выбирается, исходя из технических возможностей измерительной аппаратуры и обеспечения совпадения моментов соударения элементов пары с частотой вращения осей валов. Небольшая частота вращения обеспечивает незначительный уровень помех, а резонансный режим позволяет заранее рассчитать, в какой зоне находится сигнал от дефектного элемента. Преимущество этого метода в том, что процесс выделения диагностиче-

ского сигнала более прост и не требует сложной и дорогостоящей аппаратуры, но в спектре виброакустического сигнала отсутствует динамическая составляющая сигнала, что является недостатком данного метода.

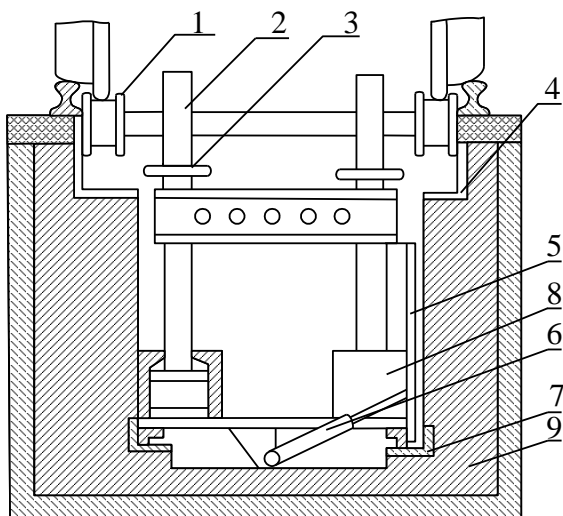


Рис. 45. Катковый стенд диагностирования колесно-моторных блоков: 1 – опорные ролики; 2 – подшипники качения; 3 – тарельчатые пружины; 4 – вертикальная опорная плита; 5 – опорная планка; 6 – гидроцилиндр подъема опорной планки; 7 – нижняя опорная плита; 8 – силовой гидроцилиндр; 9 – фундаментная яма

Диагностирующая установка, выполненная на основе рационального метода (рис. 45), состоит из каткового стенда, набора датчиков и измерительной аппаратуры.

Датчики устанавливаются над диагностируемыми узлами КМБ. Информация от каждого датчика через коммутаторы поступает на самопишущие приборы. Полученные вибропрограммы подлежат расшифровке, всплески сигналов указывают на наличие в диагностируемом узле определённого дефекта.

Достоверность диагностирования колёсно-моторных блоков можно повысить, используя средства автоматики и вычислительной техники.

Рассмотрим комплекс безразборного диагностирования зубчатой передачи и моторно-осевых подшипников (рис. 46).

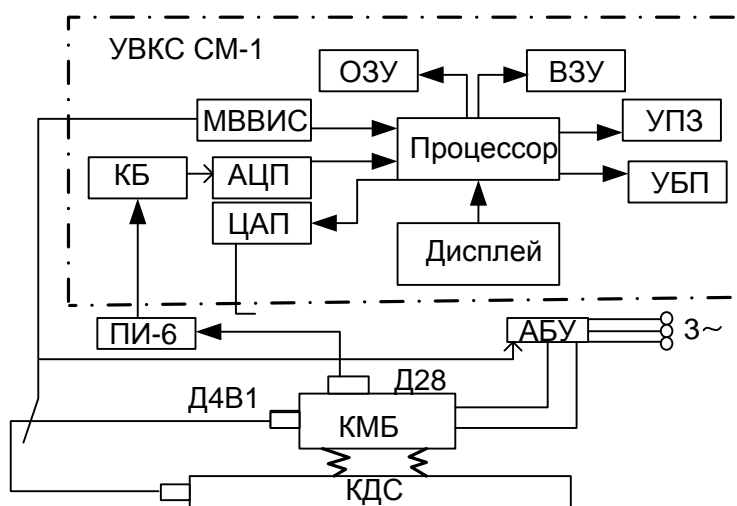


Рис. 46. Структурная схема диагностирования колесно-моторного блока

Автоматизированный комплекс создан на базе управляющего вычислительного комплекса СМ-1. Он включает в себя процессор СМ-1П, запоминающие устройства – оперативное ОЗУ и внешнее ВЗУ, знаковинтезирующее устройство печати УПЗ, устройство быстрой печати УБП, бесконтактный коммутатор КБ (мультиплексор), аналого-цифровой АЦП и цифроаналоговый ЦАП преобразователи, модуль ввода инициативных сигналов МВВИС и пульт оператора с дисплеем. Кроме этого, в автоматизированный комплекс входят: катковый диагностический стенд КДС, измеритель шума и вибраций ПИ-6 с датчиком виброускорений Д28, автоматизированный блок управления АБУ с датчиком частоты вращения вала якоря двигателя, который можно устанавливать в кожухе редуктора (ДЧВ1) или на диагностическом стенде (ДЧВ2).

При проверке технического состояния КМБ с применением автоматизированного комплекса гребни бандажей колёсной пары устанавливают на катки стенда, а электрический двигатель подключают к источнику питания с регулируемым напряжением. Датчик виброускорений Д28 размещают в верхней части проверяемого подшипникового щита. Частота вращения двигателя управляется и регулируется автоматизированным блоком управления АБУ. Импульсные сигналы от датчика частоты вращения ДЧВ поступают на вход усилителя-формирователя УФ, а затем через конденсатор С1 – на вход генератора пилообразного напряжения, выполненного на транзисторе VT1. Далее напряжение пилообразной формы через интегрирующую цепочку R3C3, на которой выделяется постоянная составляющая, поступает на инверсный вход операционного усилителя DA. На его прямой вход подаётся эталонный сигнал от процессора через ЦАП. Частота вращения вала якоря двигателя задаётся вычислительным комплексом и автоматически поддерживается постоянной независимо от изменения напряжения и нагрузки на валу двигателя.

При вращении вала якоря импульсы, пропорциональные частоте вращения, запускают генератор пилообразного напряжения, что уменьшает напряжение постоянной составляющей пилообразных импульсов. Когда оно станет меньше опорного напряжения на прямом входе усилителя, то напряжение на его выходе поменяет знак. Именно таким образом компаратор К формирует характеристику прямой передачи  $U_{\text{вых}} f(U_{\text{вх1}} U_{\text{вх2}})$  релейного типа и управляет работой блока регулятора мощности БРМ. При установившейся частоте вращения вала якоря запускается программа диагностирования, которая вводит диагностическую информацию в вычислительный комплекс через АЦП, где она обрабатывается и выдаётся на печать в виде протокола диагностирования. Обработка диагностической информации на ЭВМ основана на вычислении автокорреляцион-

ной функции  $R$  виброускорений  $z$  подшипникового щита двигателя, которая имеет вид:

$$R_z(\tau) = \int_0^{\infty} z(t)z(t+\tau)dt.$$

Накопление банка данных по результатам диагностирования КМБ совместно с измеренными данными после разборки позволяет контролировать зазоры и прогнозировать возможный их рост в эксплуатации. Для этого программой диагностирования предусмотрена запись результатов диагностирования каждого КМБ в ПЗУ и компоновка библиотеки банка данных. Во время диагностирования перемещение локомотива должно осуществляться вдоль диагностической позиции с помощью ЭВМ, что значительно сокращает время диагностирования и позволяет использовать многоканальную виброаппаратуру.

### 3.3. Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные параметры формирования диагностических параметров в подшипнике.
2. Что такое процессия вала?
3. Что такое релаксационные колебания вала?
4. Приведите структурную схему контроля износа бандажей.
5. Что такое рациональный метод диагностирования?
6. Изобразите структурную схему каткового стенда диагностирования колесно-моторных блоков.
7. В чем заключается принцип диагностирования колесно-моторного блока локомотива?
8. Для чего нужна автокорреляционная функция виброускорений?

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате изучения курса «Диагностические комплексы электроподвижного состава» студент должен: иметь необходимое представление о диагностических комплексах, применяемых на железнодорожном транспорте; знать принцип построения диагностических систем; теорию выбора диагностических параметров; структуру элементной базы диагностических систем.

Для успешного освоения дисциплинарного модуля необходимо хорошее знание таких дисциплин, как: «Высшая математика», «Теоретическая механика», «Физика», «Сопротивление материалов», «Материаловедение», «Надежность», «Эксплуатация и ремонт ЭПС».

## РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бервинов, В. И. Техническое диагностирование локомотивов : учеб. пособие / В. И. Бервинов. – М. : УМК МПС России, 1998. – 190 с.
2. Бервинов, В. И. Электроника, микроэлектроника, автоматика на железнодорожном транспорте : учебник для техникумов / В. И. Бервинов. – М. : Транспорт, 1987. – 223 с.
3. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – [Взамен ГОСТ 16-504-74] ; введ. 01.01.82 Постановлением Гос. комитета СССР по стандартам от 8 дек. 1981 г. № 5297. – М. : Изд-во стандартов, 1982 ; 2003. – 12 с.
4. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – [Взамен ГОСТ 18353-73] ; введ. 01.07.80 Постановлением Гос. комитета СССР по стандартам от 11 нояб. 1979 г. № 4245. – М. : Изд-во стандартов, 1982 ; 2003. – 17 с.
5. Голинкевич, Т. А. Прикладная теория надёжности / Т. А. Голинкевич. – М. : Высш. шк., 1985. – 157 с.
6. Дмитренко, И. Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики / И. Е. Дмитренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1986. – 144 с.
7. Основы технической диагностики : в 2 кн. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / под ред. П. П. Пархоменко. – М. : Энергия, 1976.
8. Совершенствование методов и средств контроля технического состояния и технического обслуживания электрического подвижного состава : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Н. А. Ротанова. – М., 1985. – Вып. 28.
9. Криворудченко, В. Ф. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта : учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта / В. Ф. Криворудченко, Р. А. Ахмеджанов ; под ред. В. Ф. Криворудченко. – М. : Маршрут, 2005. – 433 с. : ил.
10. Визуальный и измерительный контроль / В. В. Ключев [и др.]. – М. : РОНКТД, 1998.
11. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Ключев [и др.] ; под ред. В. В. Ключева. – М. : Машиностроение, 1995. – 488 с.
12. Ильин, В. А. Ультразвуковой метод неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железных дорог : учеб. пособие / В. А. Ильин, Л. А. Карпов, Л. Н. Косарев. – М., 1998. – 26 с.
13. Экспертно-информационные системы тепловой диагностики транспорта / В. М. Алексенко [и др.]. – Ростов н/Д : Изд-во Северо-Кавказского научного центра высш. шк., 1999. – 240 с.
14. Трестман, Е. Е. Автоматизация контроля буксовых узлов в поездах / Е. Е. Трестман, С. Н. Лозинский, В. Л. Образцов. – М. : Транспорт, 1983. – 352 с.

Учебное издание

**Бобровников** Яков Юрьевич  
**Стецюк** Андрей Евгеньевич

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Учебное пособие

Редактор *Э.Г. Долгавина*  
Технический редактор *С.С. Заикина*

---

План 2012 г. Поз. 1.17. Подписано в печать 13.06.2012.  
Уч.-изд. л. 4,7. Усл. печ. л. 6,0. Зак. 170. Тираж 50 экз. Цена 336 р.

---

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