«КАЗАХСКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИИ
им. М.Тынышпаева»

Байкенов Б.С
Сагындикова А. Ж.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКОЙ

Учебное пособие

Алматы 2019

УДК 681.518(075) На правах рукописи
ББК 40.728.6
С 139

Рецензенты:
Федоренко И.А. – к.т.н., доцент кафедры АУ, АУЭС;
Токпанова К.Е.–д.т.н., профессор кафедры АиИТ, Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева.
Шульц В.А. – к.т.н., доцент кафедры АУ, Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева.

Авторы:
Байкенов Б.С. – канд. техн. наук, доцент кафедры Автоматизация и Информационные технологии, КазАТК им.М.Тынышпаева
Сагындикова А. Ж.- доктор PhD, доцент кафедры Автоматизация и Информационные технологии, КазАТК им.М.Тынышпаева

Байкенов Б.С., Сагындикова А.Ж.
С139 Автоматизированные системы управления с технической диагностикой. Учебное пособие : / Байкенов Б.С, Сагындикова А.Ж. – Алматы : «КазАТК», 2019. – 210с.

ISBN 978-5-88-575-343-2

Изложены основные понятия и определения технической диагностики, принципы разработки математических моделей диагностируемых объектов, статистические методы распознавания признаков, методы диагностирования. Даны физические методы контроля, применяемые в технической диагностике, при помощи которых дается заключение об исправности объектов. Описаны современные средства диагностирования, применяемые в системах электроснабжения железных дорог и системах автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. Приведены основные методы и способы измерения величин характеризующих состояние объектов систем электроснабжения и систем автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте.

Учебное пособие предназначено для магистрантов, докторантов и преподавателей технических вузов.

Рекомендовано к изданию Ученым советом НАО «КазАТК», от 10.04.2018 протокол №9

©Байкенов Б.С.,Сагындикова А. Ж. © КазАТК,2019

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	
	МОДУЛЬ 1 - Системы технической диагностики, определение	
1	Основные понятия и определения технической диагностики	6
	МОДУЛЬ 2 –Математические модели и методы в теории технической диагностики	
2	Математические модели, задачи и алгоритмы технической диагностики	20
3	Алгоритмы диагноза и средства диагноза	28
4	Статистические методы распознавания признаков	37
5	Методы оценки информативности диагностических параметров	51
	МОДУЛЬ 3 - Основные типы и свойства напольных и бортовых систем технического диагностирования	
6	Методы и программы поиска места отказа	59
7	Методы контроля в технической диагностике	71
8	Физические методы контроля в технической диагностике	80
9	Средства диагностирования объектов систем электроснабжения, автоматики, телемеханики и связи на железных дорогах	96
10	Методы и средства диагностики опорных конструкций контактной сети	112
11	Диагностика силовых трансформаторов и высоковольтных вводов	131
12	Диагностика токоведущих шин и контактных соединений	141
13	Диагностика кабельных линий электропередач	152
	МОДУЛЬ 5- Классификация методов контроля и диагностики на жд транспорте. Физические основы методов контроля	
14	Диагностирование релейно-контактных устройств автоматики и телемеханики	170
15	Основные принципы обслуживания и ремонта оборудования АТС и ЭНС по состоянию с применением автоматизированных систем технического диагностирования	188
	Заключение	206
	Литература	207

ВВЕДЕНИЕ

Техническая диагностика это молодая наука, которая возникла в связи с возрастающей ролью в народном хозяйстве сложных и дорогостоящих технических систем и предъявлении к ним повышенных требований по безопасности, безотказности и долговечности. Методы технической диагностики направлены на практическую реализацию этих требований путем определения технического состояния объектов и разработке оперативных рекомендаций по их дальнейшей эксплуатации.

Все более широкое внедрение в практику методов и средств технической диагностики предполагают наличие в эксплуатационных предприятиях инженерных кадров, имеющих соответствующую подготовку. Поэтому знание основ технической диагностики является обязательным требованием к специалистам, занимающимся эксплуатацией сложных технических систем, в том числе и транспортной техникой.

В данном пособии изложены теоретические основы технической диагностики. В нем нашли отражение следующие вопросы.

Первоначально дается трактовка основных понятий, терминов и определений технической диагностики, обсуждаются её роль и место в системе технической эксплуатации авиационной техники, рассматривается общая схема постановки и решения диагностических задач, описывается классификация методов диагностики и приводятся общие сведения о них.

Значительное место отведено математическим (диагностическим) моделям, которые используются при решении задач формализованного описания объектов диагностики и формировании описаний текущего или перспективного диагнозов.

В пособии нашли отражение вопросы, связанные с выбором диагностических признаков и оценкой их диагностической ценностью.

Большое внимание уделено математическим методам распознавания технических состояний (диагнозов) объектов. Рассмотрены метод Байеса, методы принятия статистических решений, методы распознавания в пространстве диагностических признаков. Изложены принципы решения прогностических задач диагностирования.

В настоящее время особое внимание уделяется сбору диагностической информации непосредственно в транспортной технике, что и определило включение в пособие сведений об устройствах регистрации параметров.

Пособие предназначено для докторантов, обучающихся по специальности 6D070200-Автоматизация и управление.

МОДУЛЬ 1 - Системы технической диагностики, определение

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

1.1. Основные понятия и определения технической диагностики
1.2. Показатели контролепригодности изделий АТ
1.3. Показатели диагностирования
1.3.1. Вероятность ошибки диагностирования
1.3.2. Вероятность правильного диагностирования и апостериорная вероятность ошибки диагностирования
1.3.3. Средняя продолжительность, средние трудозатраты и средняя стоимость диагностирования
1.4. Системы диагноза технического состояния
1.5. Объекты диагноза

1.1Основные понятия и определения технической диагностики

Термин «диагностика» происходит от греческого «диагностикос», что означает распознавание, определение. В процессе диагностирования изделию обычно ставится диагноз - то есть определяется его техническое состояние с указанием места, вида и причины дефекта (если он есть). Диагноз представляет собой процесс исследования объекта. Объект, состояние которого определяется, будем называть ***объектом диагноза***. Характерными примерами результатов диагноза состояния технического объекта являются заключения вида: объект исправен, объект неисправен, в объекте имеется какая-то неисправность.

Таким образом, диагностика есть отрасль знаний, включающая в себя теорию и методы организации процессов диагноза, а также принципы построения средств диагноза. Когда объектами диагноза являются объекты технической природы, говорят о технической диагностике.

Техническая диагностика решает три типа задач:

- задача диагноза (задачи по определению состояния, в котором находится объект в настоящий момент времени). Это техническая диагностика;

- задача прогноза (от греческого «прогнозис» - предвидеть, предсказывать.) Предсказание состояния, в котором окажется объект в будущий момент времени. Это техническая прогностика;

- задача генеза («генезис» - происхождение, возникновение).

Определение состояния, в котором находился объект в некоторый момент времени в прошлом. Это техническая генетика.

Задачи технической генетики возникают в связи с расследованием причин аварий и катастроф, когда настоящее состояние объекта отличается от состояния, в котором он оказался в прошлом в результате появления первопричины, вызвавшей аварию. Задача технической прогностики -

определение срока службы оборудования, или определение периодичности проверок и ремонтов. Техническая диагностика представляет собой основу технической генетики и технической прогностики, и последние развиваются в тесной взаимосвязи с первой.

Одной из важнейших задач диагноза состояния объекта является поиск неисправностей, т.е. указание мест и, возможно, причин возникновения неисправностей. Поиск неисправностей необходим для выявления и замены неисправных компонентов. После устранения неисправности объект становится исправным, работоспособным или правильно функционирующим.

В результате эксплуатации оборудование может находиться в одном из следующих технических состояний:

- исправном (изделие соответствует всем требованиям нормативно-технической документации);
- неисправном(изделие не соответствует хотя бы одному требованию нормативно-технической документации);
- работоспособном(значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции на всех режимах, соответствуют требованиям нормативно-технической документации);
- неработоспособном(значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданную функцию, не соответствует требованиям нормативно-технической документации);
- функционирующем(значение всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции на проверенных режимах, соответствуют требованиям нормативно-технической документации);
- нефункционирующем(значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции на проверенных режимах, не соответствует требованиям нормативно-технической документации).

Исправное и все неисправные состояния объекта образуют множество его технических состояний. Задачи проверки исправности, проверки работоспособности, проверки правильности функционирования и поиска неисправностей представляют собой частные случаи общей задачи диагноза технического состояния объекта.

На рисунке 1.1 множество технических состояний объекта диагноза условно ограниченно замкнутой кривой, причем исправное состояние обозначим кружком, неисправное - крестиками.

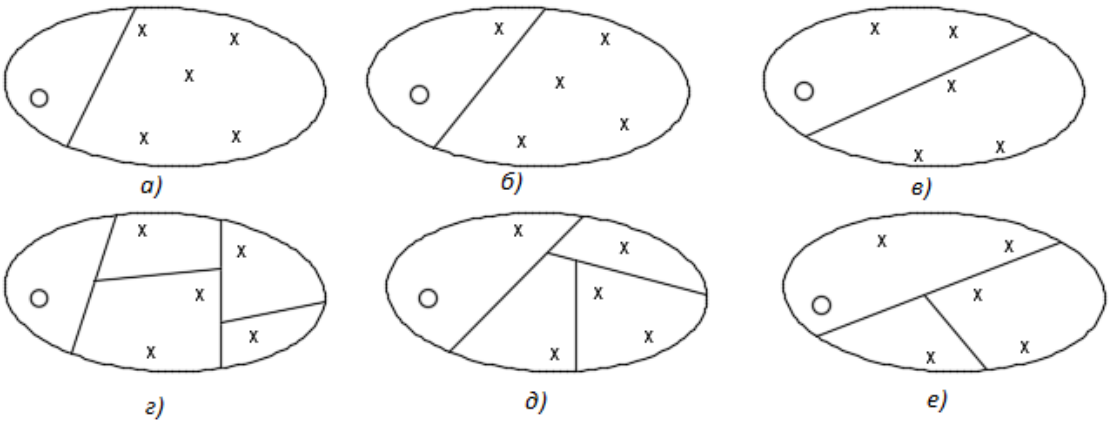


Рисунок 1.1- Представление задач диагноза через разбиение множества технических состояний обьекта

Результатами проверки исправности (а) проверки работоспособности (б) и проверки правильности функционирования (в) является получение двух подмножеств технических состояний. Одно из них (левое) содержит только исправное состояние или те неисправные состояния, находясь в которых объект остается работоспособным или правильно функционирующим. Второе подмножество содержит либо все неисправные состояния (при проверке исправности), либо такие, пребывание в которых делает объект неработоспособным или неправильно функционирующим.

Результатами поиска неисправностей (рисунок 1.1 г, д, е) являются разбиения на классы не различаемых между собой неисправных состояний вторых подмножеств. Число классов и, следовательно, числа входящих в них неисправных состояний определяют достигаемую при поиске степень детализации мест и состава имеющихся (или подозреваемых на наличие) в объекте неисправностей. Эту степень детализации принято называть глубиной поиска или глубиной диагноза.

Заметим, что при проверке правильности функционирования и при поиске неисправностей, нарушающих правильное функционирование объекта, разбиения относятся к определенному (настоящему) моменту времени и поэтому могут быть разными для разных моментов времени и разных режимов работы объекта.

Диагноз технического состояния объекта осуществляется при помощи тех или иных средств диагноза. Взаимодействующие между собой объект и средства диагноза образуют систему диагноза. Протекающий в системе диагноза процесс в общем случае представляет собой многократную подачу на объект определенных воздействий (входных сигналов) и многократное измерение и анализ ответов (выходных сигналов) объекта на эти воздействия. Воздействия на объект либо поступают от средств диагноза, либо являются

внешними (по отношению к системе диагноза) сигналами, определяемыми рабочим алгоритмом функционирования объекта. Измерение и анализ ответов объекта всегда осуществляются средствами диагноза.

В качестве количественных и качественных характеристик технических состояний изделия обычно используются контролируемые параметры с установленными нормативами по допустимому изменению их численных значений. Например, объектом диагноза является электрический кабельный жгут. По качественным показателям он оценивается по проверке правильности распайки (монтажа) проводов. Количественно он оценивается по сопротивлению изоляции между разными цепями.

По каждому из перечисленных параметров в эксплуатационной документации указываются порядок соединения проводов и предельно допустимые значения, т. е. по соответствию или несоответствию численных значений параметров установленным требованиям можно однозначно определить техническое состояние.

Под параметром в технической диагностике понимают наименование какой-либо физической величины, устанавливаемой для отличия данного состояния от других состояний объекта контроля.

Помимо параметров для оценки технического состояния объектов в технической диагностике используется понятие - признак состояния.

Под признаком состояния понимают значение (или интервал значений) какого-либо параметра, устанавливаемого для отличия данного состояния от других состояний. Смысловым эквивалентом признака состояния является значение параметра (входной сигнал на реле составляет 27 В).

Техническое диагностирование объектов представляет собой процесс исследования последних. Результатом этого исследования является заключение о техническом состоянии объекта с указанием вида технического состояния, а также, при необходимости, вида, места и причины неисправности.

По каждому контролируемому параметру в эксплуатационной документации указывается нормативное значение, чаще всего соответствующее состояниям: функционирования, работоспособности или исправности. Редко указываются нормативы параметра для нефункционирующего, неработоспособного или неисправного состояний.

Нормативные значения параметров могут указываться в виде:

- числа с указанием размерности (например, 5 А);
- диапазона чисел с указанием размерности (2…4 мВ);
- номинального значения числа с указанием его допуска и размерности 27^{+5}_{-5}(В).

В эксплуатационной документации наряду с параметром, и его значением также указывают и условия, диагностическую аппаратуру, а иногда - технологию контроля и интерпретации результатов контроля.

1.2 Показатели контролепригодности изделий

Важным аспектом технической диагностики является оценка контролепригодности изделий. *Контролепригодность*– свойство изделия обеспечивать достоверную оценку его технического состояния и раннее обнаружение неисправностей и отказов. Контролепригодность обеспечивается конструкцией изделия и принятой системой технической диагностики.

Контролепригодность изделия задается на стадии разработки и обеспечивается на стадии производства. Возможности улучшения контролепригодности в условиях эксплуатации практически отсутствуют.

В качестве показателей контролепригодности используются:

-коэффициент полноты проверки исправности (работоспособности, функционирования)

$$К_{ПП} = \frac{\lambda_К}{\lambda_о}, \quad (1.1)$$

где$\lambda к$– суммарная интенсивность отказов проверяемых составных частей изделия;$\lambda о$– суммарная интенсивность отказов всех составных частей изделия; -коэффициент глубины поиска дефекта (повреждения)

$$K_{ГП} = \frac{F}{R}, \quad (1.2)$$

где F - число составных частей изделия, с точностью до которых определяется место дефекта; R - общее число составных частей изделия, с точностью до которых требуется определение места дефекта; -среднее время подготовки изделия к диагностированию заданным числом специалистов

$$Т_В = Т_{УСЛ}+Т_{МДР}, \quad (1.3)$$

где $T_{УСЛ}$ среднее время установки и снятия измерительных устройств, необходимых для диагностирования; $T_{МДР}$ - среднее время монтажно-демонтажных работ на изделии, необходимых для подготовки к диагностированию (вскрытие люков, разъемов, снятие блоков и т.д.);

-средние трудозатраты на подготовку изделия к диагностированию

$$Q_В = Q_{УСЛ} + Q_{МДР}, \quad (1.4)$$

где $Q_{УСЛ}$ - средние трудозатраты на установку и снятие измерительных устройств, необходимых для диагностирования; $Q_{МДР}$ - средние трудозатраты на монтажно-демонтажные работы на изделии, необходимые для подготовки к диагностированию (вскрытие люков, разъемов, снятие блоков и т.д.);

-коэффициент избыточности изделия

$$К_{ИИ} = \frac{G_{И}+G_{ИИД}}{G_{И}}, \quad (1.5)$$

где $G_{И}$ - масса составных частей, введенных в конструкцию для диагностирования изделия;$G_{ИИД}$ - масса всего изделия; -коэффициент использования специальных средств диагностирования

$$К_{ИС} = \frac{G_{СД}-G_{ССД}}{G_{СД}}, \quad (1.6)$$

где $G_{СД}$ - суммарная масса серийных и специальных средств диагностирования изделия; $G_{ССД}$ - масса специальных средств диагностирования изделия; -коэффициент трудозатрат на подготовку к диагностированию

$$К_{ТД} = \frac{Q_{Д}+Q_{В}}{Q_{Д}}, \quad (1.7)$$

где $Q_{Д}$ - средние трудозатраты на диагностирование изделия; $Q_{В}$ - средние трудозатраты на подготовку изделия к диагностированию; - дифференциальная оценка контролепригодности

$$g_i = \frac{K_i}{K_{iб}}, \quad (1.8)$$

где $К_{i}$ - значение *i*-го показателя ремонтопригодности (любого из указанных выше) рассматриваемого изделия; $К_{iб}$- значение *i*-го показателя ремонтопригодности (любого из указанных выше) базового (эталонного) изделия; -комплексная оценка контролепригодности

$$g = \prod_{i=1}^{n}(a_i \cdot g_i), \quad (1.9)$$

где n - количество показателей контролепригодности рассматриваемого изделия; g_i - *i*-ая дифференциальная оценка контролепригодности; a_i - коэффициент весомости *i*-го показателя контролепригодности.

1.3 Показатели диагностирования

Стандартом устанавливаются следующие показатели диагностирования:

- вероятность ошибки диагностирования P_{ij};
- апостериорная вероятность ошибки диагностирования P_{aij};

- вероятность правильного диагностирования D;
- средняя оперативная продолжительность диагностирования $T_Д$;
- средняя стоимость диагностирования $C_Д$;
- средние оперативные трудозатраты на диагностирование $Q_Д$.

Показатели диагностирования определяются при проектировании, испытаниях и эксплуатации системы диагностирования. Показатели включаются в техническое задание на изделие и нормируются.

1.3.1 Вероятность ошибки диагностирования

В общем случае вероятность ошибки диагностирования P_{ij} вычисляют по формуле

$$P_{ij} = P_{oi} \cdot \sum_{l=1}^{k} P_{cl} \cdot P_{yjil}, \quad (1.10)$$

где k - количество технических состояний (далее - состояний) средства диагностирования; P_{oi} - априорная вероятность нахождения объекта диагностирования в состоянии i; P_{cl} - априорная вероятность нахождения средства диагностирования в состоянии l; P_{yjil} - условная вероятность того, что в результате диагностирования объект диагностирования признается находящимся в состоянии j при условии, что он находится в состоянии i и средство диагностирования находится в состоянии l.

По статистическим данным оценку вероятности ошибки диагностирования определяют по формуле

$$P_{ij}^{*} = P_{oi} \cdot \sum_{l=1}^{k} P_{cl} \frac{r_{jil}}{N_{il}}, \quad (1.11)$$

где N_{il} - общее число испытаний системы диагностирования (диагностирование объекта, находящегося в состоянии i, средством диагностирования, находящимся в состоянии l); r_{jil} - число испытаний, при которых система диагностирования зафиксировала состояние j.

Для систем диагностирования, предназначенных для проверки работоспособности (то есть при различении только двух состояний объекта диагностирования - работоспособное и неработоспособное) возможны ошибки диагностирования видов *(i=1, j=2) и (i=2, j=1)*.

Очевидно, что при *i=1 и j=1* - состояние объекта работоспособное и ошибка диагностирования отсутствует. При *i=2 и j=1* – состояние объекта неработоспособное и ошибка диагностирования также отсутствует.

Вероятность ошибки диагностирования вида (1,2) P_{12} - это вероятность совместного наступления двух событий: объект находится в

работоспособном состоянии, но в результате ошибки диагностирования признан неработоспособным.

Вероятность ошибки диагностирования вида (2,1) P_{21} - это вероятность совместного наступления двух событий: объект находится в неработоспособном состоянии, но в результате ошибки диагностирования признан работоспособным. Для рассмотренного частного случая вероятности P_{12} и P_{21} вычисляются по формулам

$$\mathrm{P_{12} = P_{o1} \cdot \sum_{l=1}^{k} P_{cl} \cdot P_{y21l}}, \quad (1.12)$$

$$\mathrm{P_{21} = P_{o2} \cdot \sum_{l=1}^{k} P_{cl} \cdot P_{y21l}}, \quad (1.13)$$

где P_{o1} - априорная вероятность нахождения объекта диагностирования в работоспособном состоянии; P_{o2} - априорная вероятность нахождения объекта диагностирования в неработоспособном состоянии; P_{y21l} - условная вероятность того, что в результате диагностирования объект считается находящимся в неработоспособном состоянии при условиях, что он находится в работоспособном состоянии и средство диагностирования в состоянии *l;* P_{y12l} - условная вероятность того, что в результате диагностирования объект считается находящимся в работоспособном состоянии при условиях, что он находится в неработоспособном состоянии и средство диагностирования в состоянии *l;* P_{cl} - априорная вероятность нахождения средства диагностирования в состоянии *l.*

1.3.2 Вероятность правильного диагностирования и апостериорная вероятность ошибки диагностирования

Вероятность правильного диагностирования часто называют достоверностью контроля и считают основным показателем диагностирования.

Достоверность контроля - это показатель степени объективного отображения результатами контроля действительного технического состояния изделия.

Вероятность правильного диагностирования (достоверность контроля) *D* вычисляют по формуле

$$D = \sum_{i=1}^{m} P_{ij}, \quad (1.14)$$

где P_{ij} - вероятность ошибки диагностирования вида *(i,j); m* - число возможных технических состояний объекта диагностирования (для систем

диагностирования, определяющих работоспособное и неработоспособное состояния объекта в целом $m = 2$).

Оценку правильного диагностирования определяют по формуле

$$D^* = \sum_{i=1}^{m} P_{ij}^*, \quad (1.15)$$

где P_{ij}^* - оценка вероятности ошибки диагностирования вида *(i,j);*

Для распространенного класса систем диагностирования, предназначенных для проверки работоспособности ($m = 2$), вероятность правильного диагностирования определяют по формуле

$$D = 1 - P_{12} - P_{21}. \quad (1.16)$$

Апостериорную вероятность P_{aij} вычисляют по формуле

$$P_{aij} = \frac{P_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} P_{ij}} = \frac{P_{ij}}{D}, \quad (1.17)$$

где P_{ij} - вероятность ошибки диагностирования вида *(i,j);* m - число возможных технических состояний объекта диагностирования (для систем диагностирования, определяющих работоспособное и неработоспособное состояния объекта в целом $m = 2$); D - вероятность правильного диагностирования.

1.3.3 Средняя продолжительность, средние трудозатраты и средняя стоимость диагностирования

Среднюю оперативную продолжительность диагностирования в общем случае определяют по формуле 1.18

$$T_Д = \sum_{i=1}^{m} T_{oi} \cdot P_i, \quad (1.18)$$

где T_i - средняя оперативная продолжительность диагностирования объекта, находящегося в состоянии i. Величина Ti включает продолжительность выполнения как вспомогательных операций, так и собственно диагностирования; P_{oi} - априорная вероятность нахождения объекта диагностирования в состоянии i.

Оценку средней оперативной продолжительности диагностирования выполняют по формуле,1.19

$$T_Д^* = \frac{1}{N} \cdot \sum_{g=1}^{N} \sum_{i=1}^{m} T_{ij} \cdot P_{oi}, \quad (1.19)$$

где N - общее число испытаний системы диагностирования (диагностирований объекта); T_{ig} - оперативная продолжительность диагностирования объекта, находящегося в состоянии i при g-ом испытании.

Средние оперативные трудозатраты на диагностирование в общем случае определяют по формуле

$$Q_{Д} = \sum_{i=1}^{m} Q_{0Дi} \cdot P_i, \tag{1.20}$$

где $Q_{ОДi}$ - средние оперативные трудозатраты на диагностирование объекта, находящегося в состоянии i.

Оценку средних оперативных трудозатрат на диагностирование выполняют по формуле

$$Q_{Д}^{*} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{g=1}^{N} \sum_{i=1}^{m} Q_{0Дig} \cdot P_i, \tag{1.21}$$

где N - общее число испытаний системы диагностирования (диагностирование объекта); $Q_{ОДig}$ - оперативные трудозатраты на диагностирование объекта, находящегося в состоянии i при g-ом испытании.

Среднюю стоимость диагностирования $S_{д}$ вычисляют по формуле

$$C_{Д} = \sum_{i=1}^{m} C_{oi} \cdot P_i, \tag{1.22}$$

где C_{oi} - средняя стоимость диагностирования объекта, находящегося в состоянии i. Величина C_i включает амортизационные затраты диагностирования, затраты на эксплуатацию системы диагностирования и стоимость износа объекта диагностирования при его диагностировании.

1.4 Системы диагноза технического состояния

На рисунке 1.2 представлены обобщенные функциональные схемы системы тестового диагноза и системы функционального диагноза технического состояния. Системы содержат объект диагноза ОД и средства диагноза СД. Схемы даны в «однолинейном» изображении. Физически каждая линия схемы, снабженная стрелкой на конце, может представлять несколько каналов передачи информации.

Как видно из рисунка 1.2,а в системах тестового диагноза воздействия на объект поступают от средств диагноза. Поэтому как состав, так и последовательности подачи этих воздействий можно выбирать, исходя из условий эффективной организации процесса диагноза. Более того, каждое очередное воздействие в процессе диагноза может назначаться в зависимости от ответов объекта на предыдущие воздействия. Воздействия в системах тестового диагноза будем называть тестовыми.

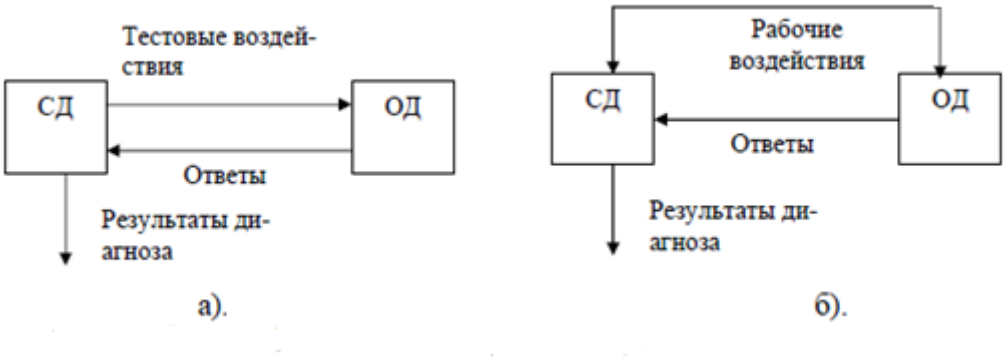


Рисунок 1.2- Обобщенные функциональные схемы систем диагноза технического состояния:
А) система текстового диагноза; б) система функционального диагноза

Тестовые воздействия могут подаваться как на основные входы объекта, т.е. на его входы, необходимые для применения объекта по назначению, так и на дополнительные входы, организованные специально для целей диагноза.

В системах функционального диагноза (рисунке 1.2,б) воздействия, поступающие на основные входы объекта, заданы его рабочим алгоритмом функционирования и поэтому, как правило, не могут выбираться, исходя из условий эффективной организации процесса диагноза. Эти воздействия будем называть рабочими. Указанная на рисунке 1.2,б подача рабочих воздействий и на средства диагноза часто имеет место в системах функционального диагноза, хотя и не является обязательной.

Отметим, что системы функционального диагноза могут использоваться также в режимах имитации функционирования объекта. При этом, естественно, должна быть обеспечена имитация рабочих воздействий. Такое использование систем функционального диагноза целесообразно при наладке или ремонте объекта.

Ответы объекта (на тестовые или на рабочие воздействия) в обоих видах систем диагноза поступают (рисунке 1.2) на средства диагноза. Ответы могут сниматься как с основных выходов объекта, т.е. с выходов, необходимых для применения объекта по назначению, так и с дополнительных выходов, организованных специально для целей диагноза. Эти основные и дополнительные выходы часто называют контрольными точками.

Обратимся теперь к средствам диагноза. Средства диагноза реализуют некоторый алгоритм диагноза, задающий состав и очередность реализации, а также способ анализа результатов элементарных проверок объекта.

Целью анализа результатов элементарных проверок является получение результатов диагноза, т. е. определение технических состояний, в одном из которых фактически находится объект.

Так или иначе, для выполнения операций анализа результатов элементарных проверок средства диагноза должны располагать

определенной информацией о поведении исправного объекта. Аппаратуру средств диагноза, хранящую информацию о поведении объекта, или другой носитель этой информации будем называть физической моделью объекта. Наглядным примером физической модели объекта является эталонный, заведомо исправный его экземпляр. В широко распространенных системах централизованного контроля, являющихся системами проверки правильности функционирования, физическая модель объекта представляет собой аппаратуру для задания допустимых значений (установок) контролируемых параметров, а также средства коммутации и подключения этой аппаратуры к устройствам сравнения допустимых значений.

Средства, осуществляющие сопоставление информации об объекте, с фактическими результатами элементарных проверок и вырабатывающие сигнал «результаты диагноза», назовем блоком расшифровки результатов.

Наконец, средства диагноза должны иметь тот или иной носитель алгоритма диагноза. Носителем жестких или редко изменяемых алгоритмов диагноза обычно является аппаратура, конструктивно объединенная с остальной аппаратурой средств диагноза. Для задания сменных алгоритмов диагноза часто применяются стандартные программные носители - магнитные барабаны, магнитные ленты, гибкие магнитные диски, жесткие диски и т. п. В последнем случае, естественно, средства диагноза должны содержать соответствующие устройства считывания информации с программные носителей.

Итак, по завершении процесса определения технического состояния объекта средства диагноза вырабатывают сигнал «результаты диагноза». Знание технического состояния объекта может быть использовано для различных целей, в том числе, например, для выбора и применения другого алгоритма диагноза, позволяющего более точно определить техническое состояние объекта.

1.5 Объекты диагноза

Для построения математических моделей объектов диагноза в процессе проектирования и создания систем диагноза необходимо знать физические свойства и характеристики этих объектов.

В получении таких знаний важное место занимает изучение возможных физических неисправностей объекта, а также параметров, характеризующих исправное и все неисправные состояния объекта. При этом полезна классификация объектов по принципу их действия, по назначению, по сложности, по энергетическим и другим признакам. Необходимо также классифицировать неисправности по их видам (например, на производственные и эксплуатационные, на катастрофические и постепенные), определять вероятности или частности, анализировать причины их возникновения, разрабатывать методы определения признаков неисправностей и т.п. Работы по исследованию параметров объектов включают в себя разработку методов задания допусков и определения

контрольных соотношений между отдельными параметрами, изучение вопросов точности измерения параметров при диагнозе, определение законов изменения параметров во времени и т.п.

Для построения оптимальных алгоритмов диагноза большое значение имеет организация сбора и обработки статистических данных, особенно по вероятностям возникновения неисправностей и по затратам (времени, энергии, материальных или денежных средств и т. д.) на отыскание неисправностей и их устранение. Отметим, что статистические данные важны не только для оптимизации алгоритмов диагноза, но также для эффективного решения задач технической прогностики и технической генетики.

Объектами диагноза могут быть любые технические изделия, устройства или системы, относительно которых имеет смысл ставить и решать задачи проверки их исправности, работоспособности, правильности функционирования или задачи поиска неисправностей.

Последствия любых явлений или действий, которые переводят объект в некоторое неисправное состояние, называются физическими неисправностями объекта.

Объект может состоять из компонент - функционально или конструктивно выделенных частей. Тогда совокупность компонент объекта, связей между компонентами (внутренних связей) и связей объекта с внешней средой (внешних связей) называют структурой объекта. Понятия исправного и неисправного состояний, а также физической неисправности приложимы к компонентам объекта, его внутренним и внешним связям.

Взаимодействие объекта с внешней средой осуществляется через его основные и дополнительные входы и выходы. Сигналы на входах и выходах объекта характеризуются параметрами тех физических величин, с помощью которых передаются указанные сигналы. Это - входные и выходные параметры объекта. Часто возникает необходимость рассматривать внутренние параметры объекта, т. е. такие параметры, которые не являются его входными или выходными. Например, необходимо замерить сопротивление резистора, снять напряжение на трансформаторе и т.д.

Последовательности (или, в частном случае, совокупности) возможных значений входных параметров образуют множество возможных воздействийна объект. Аналогично, множество ответов объекта определяется последовательностью (или, в частном случае, совокупностью) значений его выходных параметров.

Таким образом, воздействие на объект (ответ объекта) характеризуется составом входов (выходов) и теми моментами времени, в которые поступают заданные (измеряются получаемые) значения параметров на этих входах (выходах). Последовательность (совокупность) значений указанных параметров можно называть значением воздействия (ответа).

Элементарная проверка представляет собой некоторый физический эксперимент над объектом и определяется значением воздействия,

подаваемого или поступающего на объект, а также ответом объекта на это воздействие. Значение ответа объекта является результатом элементарной проверки. Ясно, что объект, находящийся в разных технических состояниях, может выдать разные результаты одной и той же элементарной проверки. Понятие элементарной проверки применимо также к отдельным компонентам объекта. В этом случае, естественно, предполагается доступность входов и выходов компонент, что может потребовать организации дополнительных входов и выходов объекта.

Рекомендованная литература: [1,4,8]

Контрольные вопросы

1. Основные понятия и определения технической диагностики.
2. Поясните представление задач диагноза через разбиение множества технических состояний обьекта.
3. Что называется вероятностью правильного диагностирования?
4. Как расчитать среднюю продолжительность, средние трудозатраты и средняя стоимость диагностирования?
5. Обьясните работу обобщенных функциональных схем системы тестового диагноза и системы функционального диагноза технического состояния
6. Перечислите физические свойства и характеристики объектов диагноза.

МОДУЛЬ 2 –Математические модели и методы в теории технической диагностики

2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙДИАГНОСТИКИ

2 Алгоритмы технической диагностики

2.1. Математические модели объектов диагноза

2.2. Функциональные схемы систем тестового и функционального диагноза

2 АЛГОРИТМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙДИАГНОСТИКИ

2.1 Математические модели объектов диагноза

Формализация методов построения алгоритмов диагноза некоторого объекта предполагает наличие формального описания объекта и его поведения в исправном и неисправных состояниях. Такое формальное описание (в аналитической, табличной, векторной, графической или другой форме) будем называть математической моделью объекта диагноза. Математическая модель объекта диагноза может быть задана в явном или неявном виде.

Явная модель объекта диагноза представляет собой совокупность формальных описаний исправного объекта и всех (точнее, каждой из рассматриваемых) его неисправных модификаций. Для удобства обработки все указанные описания желательно иметь в одной и той же форме. Неявная модель объекта диагноза содержит какое-либо одно формальное описание объекта, математические модели его физических неисправностей и правила получения по этим данным всех других интересующих нас описаний. Чаще всего заданной является математическая модель исправного объекта, по которой можно построить модели его неисправных модификаций.

Общие требования к моделям исправного объекта и его неисправных модификаций, а также к моделям неисправностей состоят в том, что они должны с требуемой точностью описывать представляемые ими объекты и их неисправности. В неявных моделях объектов диагноза модели неисправностей, кроме того, должны удовлетворять требованию удобства их «сопряжения» с имеющимся описанием объекта и тем самым обеспечить достаточно простые правила получения других описаний объекта.

Исправный или неисправный объект может быть представлен как динамическая система, состояние которой в каждый момент времени t определяется значениями входных, внутренних и выходных координат (параметров). Частным является случай, когда состояние объекта не зависит от времени.

Обратим внимание на то, что термин «состояние объекта» (как динамической системы), обозначающий совокупность значений параметров

объекта в определенный момент времени, не следует смешивать с термином «техническое состояние объекта», обозначающим наличие или отсутствие неисправности в объекте.

Объекты диагноза разделим на классы. Объекты, все координаты которых могут принимать значения из континуальных множеств значений, отнесем к классу непрерывных объектов. К классу дискретных объектов причислим объекты диагноза, значения всех координат которых задаются на конечных множествах, а время отсчитывается дискретно. Если значения части координат объекта заданы на континуальных, а значения других - на конечных множествах, то объект является гибридным

Объекты будем называть комбинационными, или объектами без памяти, если значения их выходных координат однозначно определяются только значениями их входных координат. Последовательностными, или объектами с памятью, являются объекты, у которых наблюдается зависимость значений их выходных координат не только от значений входных координат, но и от времени.

Приведем примеры простых объектов разных классов: резистивная электрическая сеть - непрерывный объект без памяти, аналоговая система регулирования с обратными связями - непрерывный объект с памятью, диодный дешифратор двоичных сигналов - дискретный комбинационный объект, двоичный счетчик - дискретный объект с памятью, аналого-цифровой преобразователь - гибридный объект.

Часто входные и внутренние координаты объекта называют входными и соответственно внутренними переменными, а выходные координаты - выходными функциями. Мы также будем пользоваться этими названиями. Заметим, что входные переменные и выходные функции могут быть сопоставлены как основным, так и дополнительным входам и соответственно выводам объекта.

Обозначим символом X n-мерный вектор, компонентами которого являются значения n входных переменных x_1, x_2, …, x_n. Аналогично Y является m-мерным вектором значений m внутренних переменных y_1, y_2, ..., $y_т$, а Z - k-мерным вектором значений k выходных функций z_1, z_2, …, z_k.

$$Z = \psi(X, Y_{НАЧ}, t) \qquad (2.1)$$

Запись будем рассматривать как некоторую аналитическую, векторную, графическую, табличную или другую формы представления системы передаточных функций исправного объекта диагноза, отражающих зависимость реализуемых объектом выходных функций Z от его входных переменных X, начального значения $Y_{нач}$ внутренних переменных и от времени t. Система (2.1) является математической моделью исправного объекта.

Рассмотрим конечное множество возможных неисправностей объекта. Принято различать одиночные и кратные неисправности. Под одиночной понимается неисправность, принимаемая в качестве элементарной, т.е. такой, которая не может быть представлена (или не подлежит представлению) совокупностью нескольких других, более «мелких» неисправностей. Кратная неисправность является совокупностью одновременно существующих двух или большего числа одиночных неисправностей. Символом S будем обозначать множество всех рассматриваемых (не обязательно всех возможных) одиночных и кратных неисправностей объекта, а символом O - множество его одиночных неисправностей. Очевидно, O∈S. Будем говорить, что при наличии в объекте неисправности ,s_i∈S$i = 1,2,\dots,|S|$или ,o_i∈O$i = 1,2,\dots,|O|$он находится в i-неисправном состоянии или является i-неисправным. Объект диагноза, находящийся в i-неисправном состоянии, реализует систему передаточных функций представленных в той же форме, что и передаточные функции (1.1).

$$Z^i = \psi^i\ (X, Y^i_{НАЧ}, t) \qquad (2.2)$$

Заметим, что начальное значение $Y_{нач}$ внутренних переменных i-неисправного объекта может не совпадать с их начальным значением $Y_{нач}$ в исправном объекте. Система (2.2) для фиксированного i является математической моделью i-неисправного объекта.

Система (2.1) и совокупность систем (2.2) для всех образуют явную модель объекта диагноза. Будем такую модель обозначать записью$(\psi, \{\psi_i\})$.

Часто, как отмечалось выше, в явном виде задается только модель исправного объекта, т.е. зависимость (2.1), а поведение объекта в i-неисправных состояниях представляется косвенно через множество S возможных неисправностей. В этом случае неявную модель объекта диагноза образуют: зависимость (2.1), множество S возможных неисправностей объекта (представленных их математическими моделями) и, наконец, способ вычисления зависимостей (2.2) по зависимости (2.1) для любой неисправности s_i. Такую неявную модель объекта диагноза будем обозначать записью $(\psi, S, \psi \overset{s_i}{\rightarrow} \psi^i)$.

Если математические модели неисправностей известны для всех s_i∈S,то преобразованием $\psi \overset{s_i}{\rightarrow} \psi^i$ можно получить все зависимости (2.2) и тем самым от модели$(\psi, S, \psi \overset{s_i}{\rightarrow} \psi^i)$ перейти к явной модели$(\psi, \{\psi_i\})$. Если же математические модели некоторых или даже всех неисправностей из множества S неизвестны, то зависимости (2.2) могут быть получены в результате физического эксперимента непосредственно над объектом диагноза при наличии в нем соответствующих неисправностей.

Модификацией этого подхода является использование при эксперименте не самого объекта, а некоторой его физической модели.

Основным понятием, используемым при решении задач построения и реализации алгоритмов диагноза, является элементарная проверка объекта. Рассмотрим вопросы задания моделей объектов диагноза в терминах элементарных проверок объекта и их результатов.

Обозначим символом П множество всех допустимых элементарных проверок π_j, j=1,2,…|П| объекта, т.е. таких его проверок, которые физически осуществимы в конкретных условиях проведения процесса диагноза. Каждая элементарная проверка, по определению, характеризуется значением воздействия, подаваемого (поступающего) на объект при реализации элементарной проверки, и ответом объекта на это воздействие. Значение iα воздействия в элементарной проверке $\pi_j \epsilon$ П определяется составом входных переменных и последовательностью во времени t их значений X_j, а также начальным значением $Y_{інач}$ внутренних переменных. Ответ объекта в элементарной проверке π_j характеризуется составом $\{y\}_j$ контрольных точек и значениемR_j^i (результатом элементарной проверки), зависящим от технического состояния объекта (отсутствие индекса i соответствует исправному объекту).

Таким образом, результат R_j^i элементарной проверки представляется в общем случае последовательностью$\left|\{y\}_j\right|$ - мерных векторов и является функцией значения $i\alpha$ воздействия:

$$R_j^i = \psi^i\left(\alpha_j, \{\gamma\}_j\right)$$

Вместо этой записи условимся применять более короткую формулу:

$$R_j = \psi\ (\pi_j) \text{для исправного объекта} \qquad (2.3)$$

$$R_j^i = \psi^*(\pi_j) \text{для i-неисправных объектов} \qquad (2.4)$$

Описанию фактического поведения объекта соответствует запись

$$R_j^* = \psi^*(\pi_j) \qquad (2.5)$$

Связь между моделями типа (2.1), (2.2) и типа (2.3), (2.4) заключается в том, что последние могут быть получены путем подстановки в правые части (2.1) и (2.2) значений X_j,, $Y_{нач\ ё}$, t (для каждой элементарной проверки $\pi_j \in П$) и последующего вычисления значений тех компонент векторов $\boldsymbol{Z}$ и $\boldsymbol{Z}^{\boldsymbol{i}}$, которые сопоставлены контрольным точкам из множеств$\{\gamma\}_j$.

Неявная модель объекта диагноза в данном случае предполагает заданными модель ψ исправного объекта, множество S неисправностей, а

также множество *П*допустимых элементарных проверок и поэтому представляется записью

$$(\psi, S, \Pi, \psi \xrightarrow{s_i,\Pi} \psi^i)$$

Явную модель объекта диагноза, когда зависимости (2.1 - 2.5) заданы для всех $s_i \in$ S, будем обозначать, как и прежде, записью(ψ, {ψ^i}).

2.2 Функциональные схемы систем тестового и функционального диагнозов

Рассмотрим теперь более детально, функциональные схемы систем тестового и функционального диагнозов.

Будем считать, что алгоритм диагноза, реализуемый в той или иной системе диагноза, задан и содержит множество *Пj*∈π элементарных проверок.

Функциональная схема системы тестового диагноза показана на рисунке 2.1. По командам блока управления (*БУ)*, хранящего алгоритм диагноза, источник воздействий (*ИВ)* вырабатывает воздействия *j*α элементарных проверок $\pi_j \in \Pi$ и в соответствии с алгоритмом диагноза в определенной последовательности подает их через устройство связи (*УС)* на объект диагноза (*ОД)*, а также, возможно, на физическую модель (*ФМ)* объекта. В общем случае устройство связи (*УС*) может коммутировать каналы связи по сигналам блока управления.

Если, например, система (рисунок 2.1) решает задачу проверки исправности объекта, то реализация физической модели сводится к представлению функции

$$R_j = \psi(\pi_j) \tag{2.6}$$

для всех $\pi_j \in \Pi$. Для этого случая на рисунок 2.3 рядом с выходом физической модели указано множество сигналов $\{R_j\}$.

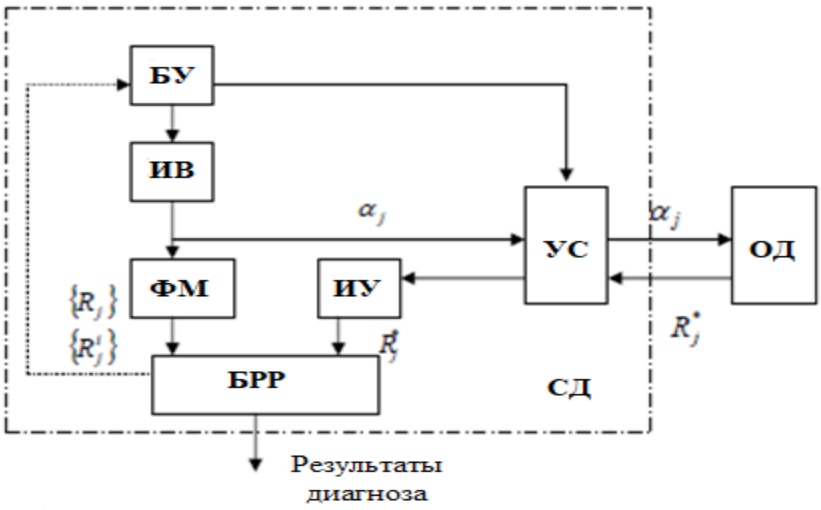


Рисунок 2.1- Функциональная схема системы тестового диагноза

При поиске неисправностей объекта возможны разные варианты организации процесса тестового диагноза. Если до реализации процесса неизвестно, исправен объект или неисправен, то в физической модели должны быть представлены как зависимость (1.6), так и зависимости:

$$R_j^i = \psi\,(\pi_j^i) \qquad (2.7)$$

для всех и всех $\pi_j \in \Pi$, т.е. множество выходных сигналов физической модели образуют множества $\{R_j\}$ и $\{R_j^i\}$.

Часто процесс тестового диагноза организуют в два этапа: сначала реализуют алгоритм проверки исправности объекта и только в случае получения результата проверки «объект неисправен» переходят к реализации алгоритма поиска неисправностей. При наличии предварительной информации о том, что объект неисправен, для решения задачи поиска неисправностей достаточно, чтобы физическая модель реализовала только зависимости (2.7), т.е. выдавала множество сигналов $\{R_j^i\}$.

Таким образом, физическая модель объекта выдает информацию о возможных технических состояниях объекта в виде возможных результатов R_j, R_j^*,элементарных проверок из множества *П.*Эта информация поступает в блок расшифровки результатов (*БРР).*

Ответами объекта диагноза на воздействия $j\alpha$ являются фактические результаты R_j^*элементарных проверок $\pi_j \in \Pi$. Эти результаты через устройство связи *(УС)* поступают на измерительное устройство (*ИУ)* и затем с выхода последнего (в некоторой, возможно, преобразованной форме) - на вход блока расшифровки результатов. Показанная на рисунке 3 пунктиром обратная связь между блоком расшифровки результатов *(БРР)* и блоком управления *(БУ)* выполняется тогда, когда реализуемый в системе алгоритм диагноза представляет собой условную последовательность элементарных проверок. В этом случае очередная элементарная проверка из множества *П* назначается в зависимости от фактических результатов R_j^* предшествующих ей элементарных проверок.

В блоке расшифровки результатов производится сопоставление возможных $\{R_j\}$ и $\{R_j^i\}$ и фактических R_j^* результатов элементарных проверок, назначаются очередные элементарные проверки и формируются результаты диагноза.

Функциональная схема системы функционального диагноза показана на рисунке 2.2.

Характерной особенностью таких систем, как уже отмечалось, является отсутствие в средствах диагноза источника (тестовых) воздействий. Напомним, что теперь объект в процессе диагноза применяется по своему назначению или находится в режиме имитации такого применения: воздействия α_j являются рабочими и поступают на основные входы объекта.

Как и в системах тестового диагноза, блок расшифровки результатов (БРР) производит сопоставление фактических результатов R_j^* элементарных проверок с возможными результатами $\{R_j\}$и $\{R_j^i\}$, выдаваемыми физической моделью. Когда система решает задачу проверки правильности функционирования объекта, достаточно, чтобы физическая модель хранила и выдавала только множество $\{R_j\}$ результатов. При поиске неисправностей необходимо знание также результатов $\{R_j^i\}$.

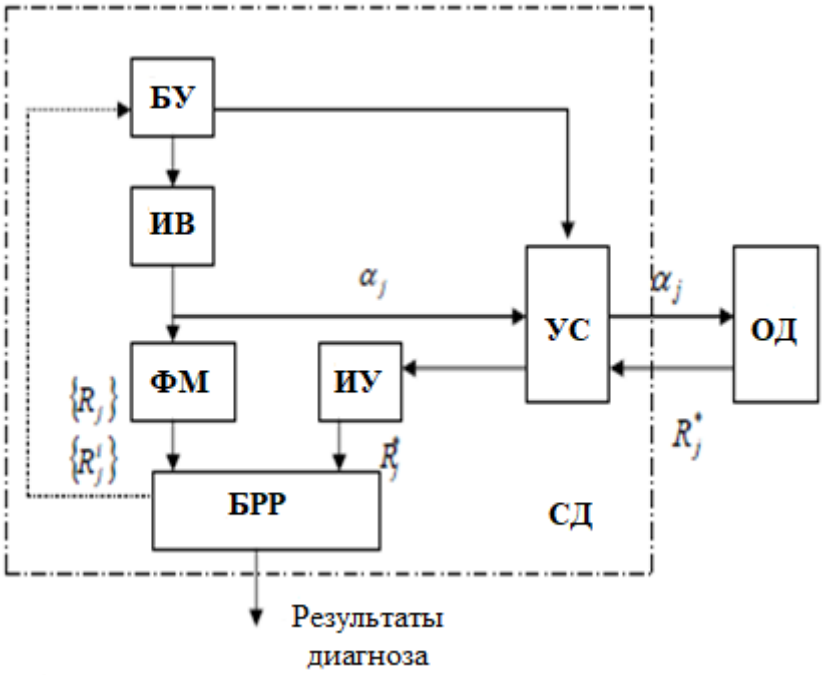


Рисунок 2.2- Функциональная схема системы функционального диагноза

С объекта снимаются, во-первых, сигналы управления (на рисунке 2.2 они обозначены символом y_i) средствами диагноза и, во-вторых, сигналы R_j^*ответов объекта на воздействияα_j. Сигналы y_i- нужны тогда, когда имеется необходимость управления физической моделью (ФМ) и блоком управления (БУ) в зависимости от режима работы объекта. Блок управления по сигналамy_i

Примером систем функционального диагноза являются широко распространенные системы централизованного контроля, в которых о техническом состоянии объекта судят по результатам сравнения фактических значений параметров объекта с их верхними и нижними допустимыми значениями. В этом случае физической моделью объекта диагноза является аппаратура хранения и выдачи указанных допустимых значений контролируемых параметров.

В заключение отметим, что здесь были рассмотрены в определенном смысле общие условия проведения процессов диагноза. Не всегда в практике

требуется или возможно проведение диагноза с глубиной до каждой одной неисправности $s_i \in S$ объекта (например, часто нет необходимости различать неисправности одной и той же сменной компоненты объекта). Иногда полезно обеспечить возможность формировать результаты тестового диагноза по ходу процесса и тем самым прекращать его, не дожидаясь реализации всех элементарных проверок из множества П.

В системах функционального диагноза не всегда можно конструктивно четко отделить аппаратуру, принадлежащую объекту диагноза, от аппаратуры средств диагноза. Более того, встроенные средства функционального диагноза могут использоваться для целей тестового диагноза, а структура функционирующего объекта диагноза может отличаться от его структуры при тестовом диагнозе.

Рекомендованная литература: [1,4,6,8]

Контрольные вопросы

1.Что называется математической моделью объекта диагноза?

2.Дайте объяснение функциональным схемам систем тестового и функционального диагноза.

3.Дайте объяснение термину «состояние объекта».

4. На какие классы делятся объекты диагноза?

5.Какие объекты называются комбинационными?

6. Какие объекты называются последовательностными?

3 АЛГОРИТМЫ ДИАГНОЗА И СРЕДСТВА ДИАГНОЗА

3 Алгоритмы диагноза и средства диагноза
3.1 Таблица функций неисправностей
3.2 Прямые и обратные задачи диагноза
3.3 Классификация средств диагноза

Под средствами диагностирования понимается совокупность технических устройств, предназначенных для съема, преобразования, хранения и представления (документирования, индикации) диагностической информации о контролируемых объектах.

В общем случае средства диагностирования позволяет решать следующие задачи технической эксплуатации:

- оценивать техническое состояние оборудования на различных этапах эксплуатации;
- определять место и причину отказа;
- контролировать правильность функционирования оборудования;
- накапливать и анализировать информацию о надежности с целью разработки и реализации мероприятий, направленных на поддержание надежности на заданном уровне, а также - с целью прогнозирования технического состояния.

3.1 Таблица функций неисправностей

Совокупность функций $(\psi, \{\psi^i\})$можно представить в табличной форме. Обозначим множество технических состояний объекта символом *E*. Пусть *e* ∈ E обозначает его исправное состояние, а *ei*∈ *E*- его *i* - неисправное состояние. Каждому *i*-му неисправному состоянию соответствует неисправность s_iиз множества *S*, и наоборот.

Построим прямоугольную таблицу 3.1, в строках которой поставим элементарные проверки π_i из множества *П*, а в столбцах – технические состояния *e* из множества *E*, или что тоже , функции $(\psi, \{\psi^i\})$, *i*= 1, 2,….., $|S|$ реализуемые объектом, находящимся в исправном e_0 или *i*-неисправном e_iсостоянии. Значение индекса *i=0* относится к столбцу исправного состояния $\boldsymbol{e}$. На пресечении столбцовe_iи строк π_i таблицы проставим результатR_j^i элементарной проверкиπ_i объекта, находящегося в техническом состоянииe_i. Множество всех результатовR_j^i, *i*= 1, 2,….., |П|; *i*= 1, 2,….., $|S|$обозначим символом *R*. Очевидно, $|R| = |П| \cdot (|S| + 1)$. Построенную таблицу 3.1 будем называть таблицей функций неисправностей объекта диагноза.

Таблица 3.1

Таблица функции неисправностей объекта диагноза

R		**E**				
		e_0	…	e_i	…	$e_{\|s\|}$
П	π_1	R_1		R_l^i		$R_l^{\|s\|}$
	…					
	π_j	R_j		R_j^i		…
	…					
	$\pi_{\|\Pi\|}$	$R_{\|\Pi\|}$		$R_{\|\Pi\|}^i$		$R_{\|\Pi\|}^{\|s\|}$

Непосредственное использование данной таблицы часто бывает затрудненно, по причине высокой размерности таблицы. Однако как универсальная математическая модель объекта диагноза она очень наглядна и удобна для процедур построения и реализации алгоритмов диагноза.

Можно заметить, что задание таблицы эквивалентно заданию системы функций (3.3) и (3.4). В столбце e_0 задает поведение исправного объекта, т.е. функцию (3.3), а остальные ее столбцы – поведения неисправного объекта, т.е. функцию (3.4) 0*e.*

Для определенности примем, что множество Π обладает свойством обнаружения неисправностей из множества S, т.е. для любой неисправности$s_i \in$Sнайдется хотя бы одна элементарная проверка $\pi_j \in \Pi$, - такая, что $R_j \neq R_j^i$, а также свойством различения всех неисправностей из множества S, т.е. для каждой пары неисправностей $s_i, s_k \in S, i = k$найдется хотя бы одна элементарная проверка $\pi_j \in \Pi$, такая, что $R_j^i \neq R_j^k$

Как всякая математическая модель объекта диагноза таблица функций неисправностей нужна для построения алгоритмов диагноза и для построения физической модели объекта.

Изложим основные операции процесса построения алгоритма диагноза по таблице функций неисправностей.

Задание на построение алгоритма диагноза должно содержать сведения о требуемой глубине диагноза. Требуемую глубину диагноза можно задавать через фиксированное разбиение множества E на λ непересекающихся подмножеств E_v, где $v=1,2, \ldots, \lambda$.

Тогда при проверке исправности, работоспособности или правильности функционирования соответствует минимальная глубина диагноза, при которой $\lambda=2.$, причем $E_1=\{e_0\}$и $E_2 = \{e_1\}$, $i=1,2, \ldots, |S|$. При поиске неисправности с максимальной глубиной диагноза (т.е. с точностью до каждого одного технического состояния) $\lambda=|S|+1$; $E_1=\{e_0\}, E_2 = \{e_1\}, i=1,2,\ldots,|S|$; $v=i+1$.Промежуточные значения глубины диагноза характеризуются условием $2<\lambda<|S|+1$.

Способ разбиения множества E технических состояний объекта на подмножества E_v является достаточно универсальным. Но он неудобен тогда, когда отсутствует соответствие такого разбиения разбиению объекта на конструктивные составные части. Значительно удобнее требуемую глубину диагноза задавать через разбиение множества конструктивных компонент объекта на непересекающиеся подмножества. Например, широко известно требование проведения диагноза с глубиной до сменного блока. Этот случай соответствует рассмотрению одиночных неисправностей объекта. Поэтому получаем

$$\lambda=N+1,\ E_1=\{e_0\},\ E_v=E_l, \tag{3.1}$$

где E_l – подмножество технических состояний неисправностей каждого отдельного блока; N – количество сменных блоков, если в качестве последних принять неисправности каждого сменного блока. Иначе обстоит дело тогда, когда нельзя исключить возможность существования неисправности в нескольких блоках. В этом случае получаем 2^N-1 подмножеств технических состояний, т.е. (с учетом исправного состояния e) $\lambda=2^N$.

Основу любого алгоритма диагноза составляет совокупность (множество) П входящих в него элементарных проверок. Для того чтобы обеспечить требуемую глубину диагноза, эта совокупность должна различать каждую пару технических состояний, принадлежащих разным подмножествам E_ν и E_μ $\nu\notin\mu$, хотя может не различать любую пару технических состояний, принадлежащих одному и тому же подмножеству E_ν. Первое условие означает, что для каждой пары технических состояний e_i, e_k^*, принадлежащих разным подмножествам E_ν и E_μ, среди элементарных проверок совокупности П найдется хотя бы одна элементарная проверка π_j, результаты R_k^i и R_k^jкоторой различны $R_k^i \neq R_k^j$. Совокупность П элементарных проверок алгоритма диагноза будем называть полной, если она обеспечивает проведение диагноза либо с заданной глубиной, либо с глубиной обеспечиваемой множеством П всех допустимых элементарных проверок. Совокупность П называется не избыточной, если удаление из нее одной элементарной проверки ведет к уменьшению глубины диагноза.

Построение по таблице функций неисправностей всех полных не избыточных совокупностей элементарных проверок $П$ можно осуществить, выполнив 2 операции.

1. Просмотром всех возможных неупорядоченных пар столбцов таблицы выделить пары$e_i\ e_k^*$ технических состояний, принадлежащих разным подмножествам E_v и E_μ и для каждой такой пары просмотром (перебором)

всех строк таблицы определить подмножестваπ_{Π} элементарных проверок π_j результаты R_j^iиR_j^k которых для технических состояний e_i, e_k^*различны.

2. Перебором всех подмножеств π_j, полученных в результате выполнения операции 1, найти все такие совокупности $П$ элементарных проверок, чтобы в каждой из них для каждого подмножества $\pi_{|\Pi|}$ нашлась хотя бы одна элементарная проверка π_j, принадлежащая этому подмножеству $\pi_{|\Pi|}$.

Остановимся теперь на применении таблицы функций неисправностей при построении физической модели объекта в СД. Определение совокупностиπ_j элементарных проверок, входящих в алгоритм диагноза, соответствует выделению определенной совокупности строк таблицы функций неисправности. Под таблицу, образованную совокупностью π_j строк, будем называть *П*-таблицей функций неисправностей. Нетрудно видеть, что *П*-таблица является заданием функций (3.6), (3.7), определяющих физическую модель объекта в средствах диагноза. При представлении физической модели объекта *П*-таблицей процесс расшифровки фактических результатов R_j^*элементарных проверок можно представить следующим образом. Каждая проверка выделяет строку *П*-таблицы, а ее фактический результат R_j^*делит множество столбцов таблицы на два подмножества. Те столбцы $e_i, i = 1,2, \dots, |S|$, для которых и $R_j^i \neq R_j^*$, вычеркиваются из таблицы. Оставшиеся столбцы, для которых $R_j^i = R_j^*$, представляют подмножество возможных технических состояний объекта. Завершению процесса диагноза соответствует момент, когда в таблице останется единственный не вычеркнутый столбец. Вычеркивание столбца означает, что объект диагноза неисправен.

Чем меньше число строк таблицы, тем проще процесс диагноза.

Сокращение размерности результатов элементарных проверок дает следующий прием. В каждой строке таблицы все результаты элементарной проверки,π_j, удовлетворяющие условию $R_j^i = R_j$, *i=1,2,…|S|,* принимаются равными 1, остальные результаты этой проверки, для которых имеет место неравенство , принимаются равными 0, независимо от того, различны они или одинаковы. При этом результат любой элементарной проверки может трактоваться только как положительный R_j^i =1 или как отрицательный R_j^i =0. Упрощенную таблицу будем называть двоичной математической моделью объекта диагноза. Заметим, что в этой модели столбец e_o, соответствующий исправному состоянию объекта, содержит только положительные результаты элементарных проверок.

3.2 Прямые и обратные задачи диагноза

Назовем прямыми задачами диагноза задачи определения по заданной элементарной проверке π_j той или иной информации о технических

состояниях объекта диагноза. При построении алгоритмов диагноза такой информацией может быть, например, определение подмножеств технических состояний объекта, дающих одинаковые результаты элементарной проверки π_j. А при реализации алгоритма диагноза интересующей нас информацией может быть определение по известному результатуR_j^* элементарной проверки π_jподмножества тех технических состояний, в одном из которых фактически находится объект. Указанная информация может представляться не в терминах технических состояний объекта, а в терминах его неисправностей.

Для решения прямых задач диагностирования необходимо предварительно построить математическую модель исправного объекта и произвести необходимое множество допустимых элементарных проверок предполагаемых неисправностей.

Пусть заданы: математическая модель Ψ исправного объекта диагноза, множество S возможных неисправностей и множество Πдопустимых элементарных проверок. Модель исправного состояния объекта позволяет ввести в нее любую неисправность$s_i \in$ S и вычислить результаты любой элементарной проверки$\pi_j \in$ П по известному значению α_j ее воздействия.

Вычисление строки таблицы функции неисправностей производится путем многократного решения прямой задачи анализа модели Ψ, состоящего в том, что на модель Ψ подается входное воздействие α_j элементарной проверкиπ_j и производится вычисление результатов либо R_j^i, либоR_j. В первом случае в модель предварительно вводится неисправность $s_i \in$ S (рисунок 3.1). В результате будут получены $|S|+1$ результатов элементарной проверкиπ_j для всех $i=0,1,2, \ldots, |S|$.

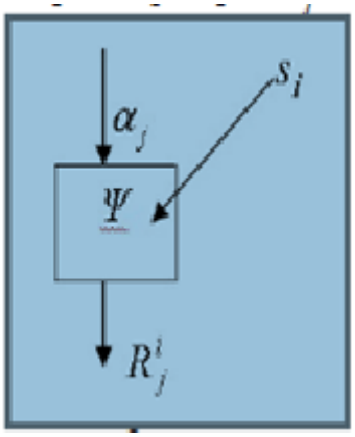


Рисунок 3.1- Представление модели объекта с ведением в нее неисправности

Под обратными задачами диагностирования понимается определение некоторой совокупности элементарных проверок, которые позволяют

определить заданное техническое состояние объекта, т.е. если в объекте предполагается какая-то неисправность.

Как и при рассмотрении прямых задач, заданными являются математическая модель исправного объекта, множество возможных неисправностей S и множество Π допустимых элементарных проверок. Примем, что модель Ψ позволяет вычислять не только результат R_j^i, но также для любой неисправностиs_i вычислять значение воздействияα_j некоторой элементарной проверки π_j известному ее результатуR_j^iт.е. решать обратную задачу анализа. Построение столбца таблицы функций неисправностей состоит в последовательном вычислении по модели $\boldsymbol{\Psi}$ с введенной в нее неисправностьюs_i результатов R_j^iкаждой элементарной проверки $\pi_j \in \Pi$. В итоге будут получены $|\Pi|$ результатовR_j^i элементарных проверок для всех $j=1,2,\ldots,|\Pi|$. Применение этого алгоритма для каждого $i=0,1,\ldots,|S|-1$ позволяет заполнить всю Π-таблицу функций неисправностей.

3.3 Классификация средств диагноза

Алгоритм диагноза задает совокупность элементарных проверок, последовательность их реализации и правила обработки результатов реализуемых элементарных проверок.

Пример дерева дан на рисунок 3.2, где вершины первого типа представлены зачерненными кружками, а вершины второго типа – светлыми. В дереве имеется единственная вершина первого типа, в которую не заходит ни одна дуга. Эта вершина называется начальной, или корнем дерева (t_0, E).

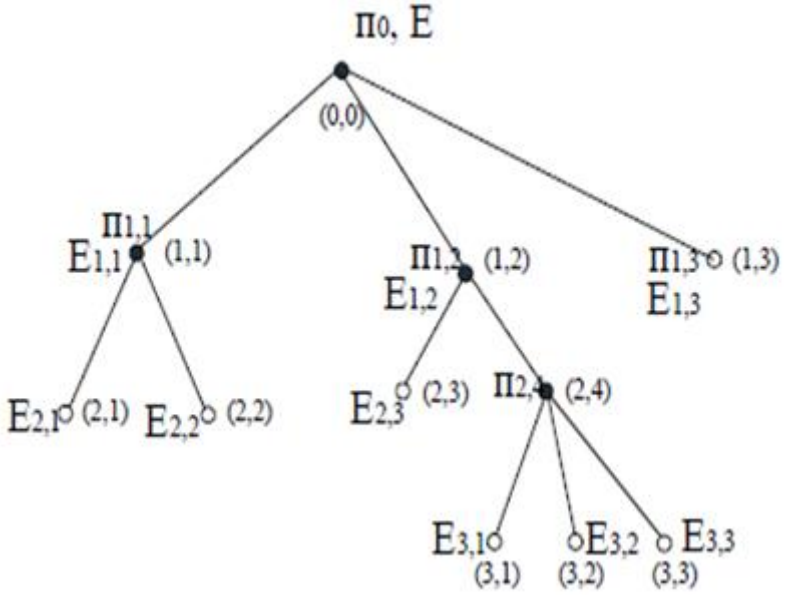


Рисунок 3.2- Дерево алгоритма диагноза

Результаты любой элементарной проверки могут быть использованы как признаки разбиения множества E технических состояний объекта или подмножеств этого множества на классы. Любой алгоритм диагноза можно

представить некоторым ориентированным графом. Ограничимся случаем, когда граф, представляющий алгоритм диагноза является деревом.

Дерево имеет вершины двух типов: вершины, из которых исходит хотя бы одна дуга, и вершины, из которых не отходит ни одной дуги.

Вершины, из которых не исходит ни одной дуги, называются конечными, или висячими. Остальные вершины дерева называются внутренними. В каждую вершину дерева, кроме его корня, заходит только одна дуга. В дереве нет контуров.

Рангом вершины дерева называется число дуг пути, начинающегося в начальной вершине и заканчивающегося в рассматриваемой вершине. Минимальным рангомρ_0 дерева является ранг, для которого существует хотя бы одна висящая вершина и не существует ни одной висящей вершины ранга меньше ρ_0.

Максимальным рангом$\rho_м$ дерева является ранг, для которого существует хотя бы одна вершина ранга $\rho_м$ и не существует ни одной вершины ранга больше $\rho_м$.

Будем внутренние и висящие вершины дерева нумеровать парой чисел в скобках *(ρ, σ)*, где ρ – есть ранг вершины, а σ – ее порядковый номер среди всех вершин одного и того же ранга (например, слева направо). Начальную вершину будем обозначать парой *(0,0)*. Начальной и внутренней вершине сопоставим элементарные проверки множества *П*. Дугам дерева, исходящей из некоторой его вершины, сопоставим возможные результаты проверки, представляемой этой вершиной. Начальной вершине поставим в соответствие множество *E* возможных технических состояний объекта, а внутренним и висящим вершинам – подмножества технических состояний, получаемые как классы разбиений по результатам соответствующих элементарных проверок. Элементарную проверку и подмножество технических состояний, сопоставляемые вершине *(ρ,σ)* дерева будем обозначать символами $t_{p,\sigma}$и $E_{p,\sigma}$соответственно. Множество элементарных проверок$\pi_{p,\sigma}$, обозначим символом $П_{д}$. Из правил построения дерева следует, что объединение множества технических состояний есть множество *E* возможных технических состояний. Каждому пути соответствует последовательность элементарных проверок.

Рассмотрим, как дерево представляет алгоритм диагноза. Начальной вершине соответствует элементарная проверка π_0 множество *E* всех возможных технических состояний. Элементарная проверка имеет три возможные результата, и тем самым разбивает множество *E* на три подмножества $E_{1,1}$, $E_{1,2}$, $E_{1,3}$ не различаемых этой проверкой технических состояний. Первые два из этих подмножеств соответствуют внутренним вершинам (1,1) и (1,2) и подлежат дальнейшим разбиениям элементарными проверками $\pi_{1,1}$ и $\pi_{1,2}$. Третье подмножество соответствует висящей вершине, и поэтому разбиение его на подмножества алгоритмом не предусмотрено. Аналогично можно рассмотреть любую другую вершину

дерева. Как только в процессе элементарных проверок будет достигнута висящая вершина, алгоритм диагноза прекращается. Фактическое техническое состояние объекта принадлежит подмножеству, соответствующему достигнутой висящей вершине. Каждой конкретной реализации алгоритма диагноза соответствует единственный путь. Например, если фактическое техническое состояние принадлежит подмножеству $E_{3,2}$, то последовательность реализации элементарных проверок будет π_0, $\pi_{1,2}$,$\pi_{2,4}$.

Различают аппаратурные, программные и программно-аппаратурные средства диагноза (рисунок 3.3).

Рисунок 3.3- Классификация средств диагноза

Рассмотрим некоторый ненулевой ранг дерева. В общем случае дерево может иметь несколько внутренних вершин. Это значит, что возможны две разные последовательности реализации элементарных проверок. Обе эти проверки могут являться как одной и той же элементарной проверкой π_jмножества *П*, так и разными элементарными проверками последнего. Если для каждого ранга дерева выполняется условие, состоящее том, что всем внутренним вершинам этого ранга сопоставлена одна и та же элементарная проверка из множества *П*, то алгоритм диагноза называется *безусловным*. Это соответствует заданию одной фиксированной последовательности реализации элементарных проверок из множества *П*, не зависящей от фактического технического состояния объекта. Т.е. выбор или назначение очередной элементарной проверки в последовательности их реализации не зависит от результатов предыдущих уже реализованных элементарных

проверок. Если же в дереве найдется хотя бы один ранг с несколькими внутренними вершинами, которым сопоставимы разные элементарные проверки из множества *П,* то алгоритм диагноза называется *условным.* В условных алгоритмах выбор или назначение некоторых или всех (кроме π_0)элементарных проверок производится с учетом результатов предыдущей уже реализованной элементарной проверки.

Достоинства безусловных алгоритмов: простота проверок, требуется хранить лишь состав элементарных проверок и единственную последовательность их реализации. Для условных требуется хранить кроме состава элементарных проверок все признаки безусловных и условных переходов от данной элементарной проверки к следующей, т.е. хранить не одну, а несколько последовательностей реализации элементарных проверок.

Во многих случаях фактическое техническое состояние объекта может быть определенно с требуемой глубиной диагноза прежде, чем будут реализованы все элементарные проверки алгоритма диагноза. Безусловные алгоритмы, у которых предусмотрена возможность выдачи результатов диагноза после реализации каждой элементарной проверки, называются алгоритмами с условной остановкой. В системах функционального диагноза применяются алгоритмы с условной остановкой в связи с необходимостью немедленного определения неисправного состояния объекта.

Рекомендованная литература: [1,4,6,8]

Контрольные вопросы

1. Как составляется таблица функций неисправностей?
2. Назовите основные операции процесса построения алгоритма диагноза по таблице функций неисправностей.
3. Что называется совокупностью «П» ?
4. Назовите прямые и обратные задачи диагноза.
5. Какую совокупность задает алгоритм диагноза ?
6. Назовите достоинства безусловных алгоритмов.
7. Как можно классифицировать безусловные алгоритмы диагноза?
8. Как определить фактическое техническое состояние объекта?
9. Классификация средств диагноза?
10. Что понимается под средствами диагностирования?
11. Какие задачи решаются средствами диагностирования для технической эксплуатации?

4 СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИЗНАКОВ

4.1. Метод Байеса
4.1.1. Основы метода
4.1.2. Диагностическая матрица
4.1.3. Решающее правило
4.2. Модели на основе методов статистических решений
4.2.1. Методы минимального риска, минимального числа ошибочных решений, наибольшего правдоподобия
4.3. Метод минимакса
4.4. Метод Неймана-Пирсона
4.5. Метод последовательного анализа

При наличии неопределенности принятия решения применяют специальные методы, учитывающие вероятностную природу событий. Они позволяют назначать границу поля допуска параметра или необходимое число опытов для принятия решения о диагностировании. Большая часть методов основана на том, что имеется некоторая доопытная вероятность в постановках диагностирования.

Так, большинство методов предполагают априорно известными вероятности диагностирования для однотипных объектов, находящихся в одинаковых условиях. Часто выбор того или иного решающего правила проводится на основе оптимизации по некоторым критериям. Статистические методы позволяют одновременно учитывать диагностические сигналы различной физической природы, так как они работают лишь с их вероятностными характеристиками.

Следует учитывать, что рассматриваемые методы принятия решений являются лишь инструментом, а окончательное решение, как и ответственность за его последствия, лежит на конкретном человеке.

4.1 Метод Байеса

Среди методов технической диагностики метод, основанный на обобщенной формуле Байеса, занимает особое место благодаря простоте и эффективности.

Имеет он и недостатки: большой объем предварительной информации, угнетение редко встречающихся диагнозов. Однако в случаях, когда объем статистических данных, позволяет применить метод Байеса, его целесообразно использовать как один из наиболее эффективных и надежных методов.

4.1.1 Основы метода

Метод основан на простой формуле Байеса. Если имеется диагноз D_i и простой признак k_j, встречающийся при этом диагнозе, то вероятность совместного появления событий (наличие у объекта состояния D_i и признака k_j)

$$P\left(D_i, k_j\right) = P(D_i)P\left(k_j/D_i\right) = P(k_i)P\left(D_i/k_j\right) \quad (4.1)$$

Из этого равенства вытекает формула Байеса

$$P\left(D_i, k_j\right) = P(D_i)\frac{P(k_j/D_i)}{P(k_j)} \quad (1.2)$$

Очень важно определить точный смысл всех входящих в эту формулу величин. P(D_i) - вероятность диагноза D_vопределяемая по статистическим данным (априорная вероятность диагноза). Так, если предварительно обследовано N объектов и у N_i объектов имелось состояние D_i, то

$$P(D_i) = N_i/N \quad (4.3)$$

где$P(k_j/D_i)$вероятность появления признака k_j у объектов с состоянием D_i.

Если среди N_i объектов, имеющих диагноз D_i у N_{ij}, проявился признак k_j, то

$$P\left(k_j/D_i\right) = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (4.4)$$

где $P(k_j)$- вероятность появления признака k_j во всех объектах независимо от состояния (диагноза) объекта. Пусть из общего числа N объектов признак k_j был обнаружен у N_j объектов, тогда

$$P\left(k_j\right) = \frac{N_j}{N} \quad (4.5)$$

Для установления диагноза специальное вычисление P(k_j) не требуется. Как будет ясно из дальнейшего, значения

$P(D_i), P\left(k_j/D_i\right)$известные для всех возможных состояний, определяют величину P(k_j) .

В равенстве (1.2)P($D_i k_j$) - вероятность диагноза после того, как стало известно наличие у рассматриваемого объекта признака k_j (апостериорная вероятность диагноза).

Обобщенная формула Байеса. Эта формула относится к случаю, когда обследование проводится по комплексу признаков *K*, включающему признаки k_1, k_2, ...k_v. Каждый из признаков k_j имеет m_j разрядов (k_{j1}, k_{j2}, ...k_{js}, ...,k_{jmj}). В результате обследования становится известной реализация признака $k_j^* = k_{js}$и всего комплекса признаковK^* Индекс * означает конкретное значение (реализацию признака). Формула Байеса имеет вид

$$P(D_i,/K^*) = P(D_i)P(K^*/D_i)/P(K^*), i = 1,2,\dots,n \qquad (4.6)$$

где$P(D_i,/K^*)$- вероятность диагноза D_i после того, как стали известны результаты обследования по комплексу признаков *K*; $P(D_i)$- предварительная вероятность диагноза D_i(по предшествующей статистике).

Формула 4.6 относится к любому из n возможных состояний (диагнозов) системы. Предполагается, что система находится только в одном из указанных состояний и потому

$$\sum_{s=1}^{n} P\,(D_s) = 1 \qquad (4.7)$$

В практике нередко существуют несколько состояний A_1, ...A_r, причем некоторые могут встретиться в комбинации друг с другом. Тогда в качестве различных диагнозов D_i следует рассматривать отдельные состояния D_1=A_1,...D_r=A_r и их комбинации D_{r+1}=A_1^A_2, … и т.п.

Если комплекс признаков состоит из ν признаков, то

$$P\left(K^*/D_i\right) = P\left(k_1^*/D_i\right)P\left(k_2^*/k_1^* D_i\right)\dots P\left(\frac{k_v^*}{k_1^*}\dots k_{v-1}^* D_i\right) \qquad (4.8)$$

где$k_j^* = k_{js}$ - разряд признака, выявившийся в результате обследования.

Для диагностически независимых признаков

$$P(\frac{K^*}{D_i} = \; P\left(\frac{k_1^*}{D_i}\right)P\left(\frac{k_2^*}{D_i}\right)\dots\; P\left(\frac{k_v^*}{D_i}\right) \qquad (4.9)$$

Вероятность появления комплекса признаков *K*

$$P(K^*) = \sum_{s=1}^{n} P(D_s)\, P\left(\frac{K^*}{D_s}\right) \quad (4.10)$$

Обобщенная формула Байеса может быть записана

$$P(D_i,/K^*) = \frac{P(D_i)P(K^*/D_i)}{\sum_{s=1}^{n} P(\frac{D_{s)}}{P\left(\frac{K^*}{D_s}\right)}} \quad (4.11)$$

где $P(K^*/D_i)$определяется равенством 4.8 и 4.9.

Из соотношения 4.11 вытекает$\sum_{s=1}^{n} P(D_i/K^*) = 1$что, разумеется, и должно быть, так как один из диагнозов обязательно реализуется, а реализация двух диагнозов невозможна.

4.1.2 Диагностическая матрица

Для определения вероятности диагнозов по методу Байеса необходимо составить диагностическую матрицу, которая формируется на основе предварительного статистического материала. В таблице1.1 содержатся вероятности разрядов признаков при различных диагнозах. Если признаки двухразрядные (да - нет), то в таблице достаточно указать вероятность появления признака$P(K_j/D_i)$. Вероятность отсутствия признака $P\left(\frac{\overrightarrow{k_J}}{D_i}\right) = 1 - P(k_j/D_i)$.

В диагностическую матрицу включены априорные вероятности диагнозов.

Таблица 4.1

Вероятности разрядов признаков при различных диагнозах

Диагноз D_i	Признаки k_j						P(D_i)
	k_1		k_2		k_3		
	$P(K_{11}/D_i).$	$P(K_{12}/D_i).$	$P(K_{21}/D_i).$	$P(K_{22}/D_i).$	$P(K_{31}/D_i).$	$P(K_{32}/D_i).$	
D_1	0.8	0.2	0.1	0.1	0.2	0.8	0.3
D_2	0.1	0.7	0	0	0.1	0.9	0.1
…	…	…	…	…	…	…	…

Поясним метод Байеса. Например, при наблюдении за трансформатором проверяются два признака: k_1 - повышение температуры обмоток трансформатора и k_2 - уровень шума, создаваемый трансформатором. Предположим, что появление этих признаков связано с неисправностью трансформатора. При нормальном состоянии

трансформатора (состояние D_3) признак k_1 не наблюдается, а признак k_2 наблюдается в 5% случаев. На основании статистических данных известно, что 80% трансформаторов вырабатывает ресурс в нормальном состоянии, 5% имеют состояние D_1 и 15% - состояние D_2. известно также, что признак k_1 встречается при состоянии D_1 в 20%, а при состоянии D_2 в 40% случаев; признак k_2 при состоянии D_1 встречается в 30%, а при D_2 в 50% случаев. Сведем данные в диагностическую таблицу 4.2.

Таблица 4.2

Диагностическая таблица параметров

D_i	$P(k_1/D_i)$	$P(k_2/D_i)$	$P(D_i)$
D_1	0.2	0.3	0.05
D_2	0.4	0.5	0.15
D_3	0.0	0.05	0.80

Вероятность состояния, когда обнаружены оба признака определяем по формуле (4.11),

$$P\left(\frac{D_1}{k_1k_2}\right) = \frac{0.05 \cdot 0.2 \cdot 0.3}{0.05 \cdot 0.2 \cdot 0.3 + 0.15 \cdot 0.4 \cdot 0.5 + 0.8 \cdot 0 \cdot 0.05} = 0.09$$

$$P(D_2/k_1k_2) = 0.91, \qquad P(D_3/k_1k_2) = 0$$

Признак k_1 отсутствует, присутствует признак k_2. Отсутствие признака k_1 есть признак наличия $\overline{k_1}$(противоположное событие), причем$P\left(\frac{\overline{k_1}}{D_i}\right) = 1 - P(k_1/D_i)$.

Для расчета также применяют формулу (4.11), но $P(k_1/D_i)$заменяют на$P\left(\frac{\overline{k_1}}{D_i}\right)$.

Тогда$P\left(\frac{D_1}{\overline{k_1}k_2}\right) = \frac{0.05 \cdot 0.8 \cdot 0.3}{0.05 \cdot 0.8 \cdot 0.3 + 0.15 \cdot 0.6 \cdot 0.5 + 0.8 \cdot 0.1 \cdot 0.05} = 0.12$

$$P(D_2/\overline{k_1}k_2) = 0.46 P(D_3/\overline{k_1}k_2) = 0.41$$

Когда отсутствуют оба признака,

$$P\left(\frac{D_1}{\overline{k_1}\,\overline{k_2}}\right) = \frac{0.05 \cdot 0.8 \cdot 0.7}{0.05 \cdot 0.8 \cdot 0.7 + 0.15 \cdot 0.6 \cdot 0.5 + 0.8 \cdot 0.1 \cdot 0.15} = 0.03$$

$$P(D_2/\overline{k_1}\overline{k_2}) = 0.05 P(D_3/\overline{k_1}\overline{k_2}) = 0.92$$

Из проведенных расчетов можно установить, что при наличии двух признаков в трансформаторе с вероятностью 0.91 имеется состояние D_2, т.е. увеличение шума. При отсутствии обоих признаков наиболее вероятно нормальное состояние (вероятность 0.92).Во втором случае, так как вероятности примерно одинаковы, необходимо дополнительное исследование для уточнения состояния трансформатора.

4.1.3 Решающее правило

Правило, в соответствии с которым принимается решение о диагнозе. В методе Байеса объект с комплексом признаков K^* относится к диагнозу с наибольшей (апостериорной) вероятностью.

$$K^* \in D_i, \text{если } P(D_i/K^*) > P(D_j/K^*), (i = 1,2, \dots, n; \quad i \neq j)$$

Условие указывает, что объект, обладающий данной реализацией комплекса признаков K^*, принадлежит диагнозу (состоянию) D_i. Данное правило уточняется введением порогового значения для вероятности диагноза:

$$P\left(\frac{D_i}{K^*}\right) \geq P_i$$

где P_iзаранее выбранный уровень распознавания для диагноза D_i.

При этом вероятность ближайшего конкурирующего диагноза не выше *1-*P_i. Обычно принимается $P_i \geq 9$. При условии решение$P\left(\frac{D_i}{K^*}\right) \geq P_i$ о диагнозене принимается (отказ от распознавания) и требуется поступление дополнительной информации.

4.2 Модели на основе методов статистических решений

Один из подходов к диагностированию заключается в использовании так называемых статистических решений. При этом решающее правило выбирается исходя из некоторых условий оптимальности, например, из условия минимального риска. Рассмотрим технологию распознавания при наличии одного диагностического параметра.

Пусть производится диагностирование трансформатора по выделению газа из масла (параметр k). Задача состоит в выборе значения k_0 параметра k таким образом, что при $k > k_0$ следует принимать решение о прекращении эксплуатации трансформатора, а при $k < k_0$ - допускать дальнейшую

эксплуатацию. Разделение производится на два класса: D_1 - исправное состояние; D_2 - наличие дефекта. Тогда указанное решающее правило означает:

$$\text{при } k < k_0; k \in D_1; \text{при } k > k_0; \quad k \in D_2$$

Выделение газа неоднозначно характеризует состояние масляного трансформатора (масло имеет собственный запах, содержание газов не превышает допустимых пределов и т.д.). Плотность распределения k для дефектных и исправных трансформаторов показана на рисунке 4.1.

Области исправного (D_1) и дефектного (D_2) состояний пересекаются и поэтому принципиально невозможно выбрать значение k_0, при котором не было бы ошибочных решений. Задача состоит в том, чтобы выбор $\boldsymbol{k_0}$ был в некотором смысле оптимальным, например, давал бы наименьшее число ошибочных решений.

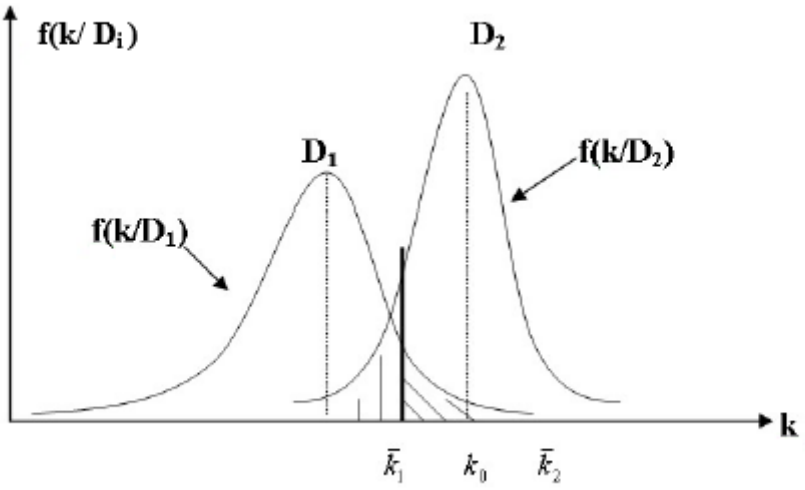


Рисунок 4.1- Распределение плотности диагностического параметра k для исправного D_1 и дефектного D_2 состояний

Возможными ошибками при принятии решений являются: ложная тревога (ошибка первого рода), когда исправный объект признается дефектным (вместо D_1 считают, что имеет место D_2), и пропуска дефекта (ошибка второго рода), когда объект, имеющий дефект признается исправным (вместо D_2 признается D_1).

Обозначим через H_{ij} $(ij = 1, 2)$ возможные ошибки, где i - соответствует индексу принятого диагноза, а j - индексу действительного состояния. Тогда H_{12} - это пропуск дефекта, а H_{21} - ложная тревога.

Вероятность ложной тревоги равна вероятности произведения двух событий: наличия исправного состояния и значения $k > k_0$ для исправного состояния:

$$P(H_{21}) = P(D_1) \cdot P(k > k_0/D_1) = P_1 \cdot \int_{x_0}^{\infty} f(k/D_1)dk$$

где $P_1 = P(D_1)$- априорная вероятность диагноза D_1 (считается известной на основе предварительных статистических данных).

Вероятность пропуска дефекта определяется аналогично:

$$P(H_{12}) = P(D_2) \cdot P(k > k_0/D_2) = P_2 \cdot \int_{x_0}^{\infty} f(k/D_2)dk$$

Ошибочное решение слагается из вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска дефекта. Если приписать цены этим ошибкам (C_{21} - стоимость ложной тревоги, а C_{12} - стоимость пропуска дефекта), то получим искомое общее выражение для вычисления среднего риска:

$$R = C_{21} \cdot P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(k/D_1)dk + C_{12} \cdot P_2 \int_{x_0}^{\infty} f(k/D_2)dk \qquad (4.12)$$

4.2.1. Методы минимального риска, минимального числа ошибочных решений, наибольшего правдоподобия

Граничное условие k_0 находится из условия минимального среднего риска. Дифференцируя (1.12) по k_0 и приравнивая производную нулю, получим условие экстремума

$$dR/dk_0 = C_{12} \cdot P_2 \cdot f(k_0/D_2) - C_{21} \cdot P_1 \cdot f(k_0/D_1) = 0, \qquad (4.13)$$

тогда отношение правдоподобия будет иметь вид:

$$\frac{\left[f\left(\frac{k_0}{D_1}\right)\right]}{\left[f\left(\frac{k_0}{D_2}\right)\right]} = \frac{C_{12} \cdot P_2}{C_{21} \cdot P_1}. \qquad (4.14)$$

Это условие часто определяет два значения k_0, из которых одно соответствует минимуму, а второе - максимуму риска. Для существования

минимума R в точке $k = k_0$ вторая производная должна быть положительной, то есть

$$\frac{[f`(k_0)/D_1]}{[f`(k_0)/D_2]} < \frac{(C_{12}\cdot P_2)}{(C_{21}\cdot P_1)} \qquad (4.15)$$

Для одномодальных распределений (содержащих не более одного максимума) при $\overline{k_1} < k_0 < \overline{k_2}$ условие (4.15) выполняется.

В соответствии с (4.14) правило решения по методу минимального риска имеет вид:

$$k \in D_1 \text{при} \frac{f(k/D_1)}{f(k/D_2)} > \frac{C_{12}\cdot P_2}{(C_{21}\cdot P_1}$$

$$k \in D_2 \text{при} \frac{f(k/D_1)}{f(k/D_2)} < \frac{C_{12}\cdot P_2}{(C_{21}\cdot P_1}$$

Рассмотрим случай, когда параметр $\boldsymbol{k}$ имеет нормальное распределение при исправном $\boldsymbol{D_1}$ и неисправном $\boldsymbol{D_2}$ состояниях и $\boldsymbol{\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma}$. При этом плотности распределений будут иметь следующий стандартный вид:

$$f(k/D_1) = \frac{1}{\sigma\cdot\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-[\frac{(k-k_1)^2}{2\sigma^2}]},$$

$$f(k/D_2) = \frac{1}{\sigma\cdot\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-[\frac{(k-k_2)^2}{2\sigma^2}]},$$

Подставив эти соотношения в (1.14), прологарифмировав и упростив, получим:

$$\ln\frac{f(k_0/D_1)}{f(k_0/D_2)} = \ln\frac{C_{12}\cdot P_2}{C_{21}\cdot P_1}$$

Откуда получаем выражение для расчета $\boldsymbol{k_0}$:

$$k_0 = 0.5\cdot(\overline{k_1} - \overline{k_2}) - \frac{\sigma^2}{k_2 - k_1}\cdot\left(\ln\frac{P_2}{P_1} + \ln\frac{C_{12}}{C_{21}}\right).$$

При $\boldsymbol{k < k_0}$, принимается решение $k \in D_1$. При $\boldsymbol{k > k_0}$, принимается решение $k \in D_2$.

Частным случаем рассмотренного метода является метод минимального числа ошибочных решений. Эти методы эквивалентны, если

стоимости решений одинаковы. При данном методе для одномодальных распределений решение $k \in D_1$ принимается при условии, что

$$\frac{f(k/D_1)}{f(k/D_2)} > \frac{P_2}{P_1}$$

а решение принимается при условии, что $k \in D_2$

$$\frac{f(k/D_1)}{f(k/D_2)} < \frac{P_2}{P_1}$$

Метод наибольшего правдоподобия также является частным случаем метода минимального риска. Правило решения имеет следующий вид:

Принимается $k \in D_1$, если $\frac{f(k/D_1)}{f(k/D_2)} > 1$,

где *k*- значение диагностического параметра.

Граничное значение находится из условия

$$f(k/D_1) = f(k/D_2)$$

Сопоставляя уравнения (1.14) и (1.15) видно, что они совпадают, если допустить, что

$$\frac{(C_{12} - C_{22}) \cdot P_2}{(C_{21} - C_{11}) \cdot P_1} = 1$$

Примечание. При $C_{22} = C_{11} = 0$ допущение упрощается:

$$\frac{C_{12} \cdot P_2}{C_{21} \cdot P_1} = 1$$

Сопоставляя данные равенства равны 1.

4.3 Метод минимакса

Этот метод предназначен для ситуации, когда отсутствуют предварительные статистические сведения о вероятности диагнозов D_1 и D_2. Рассматривается «наихудший случай», то есть наименее благоприятные значения P_1 и P_2, приводящие к наибольшему значению (максимуму) риска.

Величина риска зависит от k_0 и P_1 (вероятность второго диагноза $P_2 = 1 - P_1$), в частности

$$R(k_0P_1) = C_{11} \cdot P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(k_0/D_1) \cdot dk + C_{21} \cdot P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(k/D_1) \cdot dk + C_{12} \cdot (1 - P_1) \cdot \int_{-\infty}^{x_0} f\left(\frac{k_0}{D_2}\right) \cdot dk + C_{22}(1 - P_1) \cdot \int_{x_0}^{\infty} f(k/D_2) \cdot dk. \quad (1.16)$$

здесь C_{11} и C_{22} - стоимости правильных решений.

Для нахождения экстремума уравнение (4.16) преобразуют (приравнивают частные производные по k_0 и P_1 к нулю). Условие $dR/dk_0 = 0$ дает

$$\frac{f(k_0/D_1)}{f(k_0/D_2)} = \frac{(C_{12}-C_{22})\cdot(1-P_1)}{(C_{21}-C_{11})(1-P_2)} \quad (4.17)$$

Условие $dR/dP_1 = 0$ дает

$$C_{21} \int f(k/D_1)dk + C_{11} \int f(k/D_1)\, dk = C_{12} \int f(k/D_2)\, dk + C_{22} \int f(k/D_2)\, dk \quad (1.18)$$

Значения k_0 и P_1, являющиеся корнями уравнений (4.17) и (4.18), определяют экстремальную точку $R(k_0, P_1)$. Для одномодальных распределений величина риска становится минимальной (то есть минимальной среди максимальных значений, вызванных «неблагоприятной» величиной P_1). По методу минимакса выбирают величину k_0 таким образом, чтобы при наименее благоприятных значениях P_1 потери, связанные с ошибочным решением, были минимальными.

Опуская процедуры точного решения уравнений (4.17) и (4.18) (например, с помощью метода Ньютона) представим приближенные решения. Так, в первом приближении можно принять, что $k_0 = \overline{k_1} - \frac{\overline{k_2}}{2}$. Тогда из (4.17) находим наименее благоприятное значение вероятности исправного P_1 и неисправного P_2 состояний:

$$P_1^* = \frac{C_{12} - C_{22}}{\left[(C_{12} - C_{21}) + (C_{21} - C_{11})\right] \cdot F(k_0/D_2)},$$

$$P_2^* = 1 - P_1^*$$

Величину риска определяем из равенства (4.16) при значениях $k = k_0$, $P_1 = P_1$. Вероятность ложной тревоги и пропуска дефекта может быть найдена из соотношения

$$\frac{P_{\text{ЛТ}}}{P_{\text{ПД}}} = 1 - \frac{F(k_0/D_1)}{F(k_0/D_2)} = \frac{C_{12}}{C_{21}},$$

где$F(k_0/D_1) = \int_{-\infty}^{x_0} f(k/D_1)dk$ - функция распределенияD_1 (в общем виде);
$F(k_0/D_2) = \int_{-\infty}^{x_0} f(k/D_2)dk$- функция распределения$D_2$ (в общем виде).

4.4 Метод Неймана-Пирсона

В случае если неизвестны оценки стоимости ошибок, решается задача минимизации одной ошибки при определенном (допустимом) уровне другой. По методу Неймана-Пирсона минимизируется вероятность пропуска дефекта при заданном допустимом уровне вероятности ложной тревоги.

Вероятность ложной тревоги

$$P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(k/D_1)dk \leq A,$$

где A - заданный допустимый уровень ложной тревоги; P_1 - вероятность исправного состояния.

На рисунке 4.1 видно, что увеличение ошибки ложной тревоги (сечение $\boldsymbol{k_0}$ перемешается влево) приводит к уменьшению величины ошибки пропуска дефекта. Ее наименьшее значение достигается при

$$P_1 \int_{x_0}^{\infty} f\left(\frac{k}{D_1}\right) dk = A, \qquad (4.19)$$

В практических задачах можно принимать $A = r \cdot P_2$, где r - коэффициент избыточности, зависящий от разрешающей способности диагностических средств, опасности дефекта, экономических затрат и других соображений.

При дефектах с ограниченными последствиями можно принять $r = 1...3$. При опасных дефектах $r = 3...10$. Для редко встречающихся ($P_2 < 0.01$),но крайне опасных дефектов, коэффициент избыточности r может достигать и больших значений.

В задачах диагностики можно использовать и другой подход: определить значение k_0 исходя из выбранной вероятности пропуска дефекта. В этом случае

$$P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(k/D_1)dk = B \quad . \qquad (4.20)$$

где B- заданное значение вероятности пропуска дефекта, которое выбирается с учетом указанных соображений.

Если дефект крайне нежелателен даже на единичном объекте, то можно принять

$$B < {}^{1}/_{r \cdot N},$$

где N - общее число объектов, находящихся в эксплуатации; r - коэффициент избыточности $(1 \le r \le 10)$.

Во всех случаях для реализации принципа невозможности маловероятных событий величина B должна быть малой $(B \le 0.01)$. В методе Неймана-Пирсона граничное значение k_0 определяется из уравнения (4.19) или (4.20). При практическом решении таких уравнений целесообразно использовать метод Ньютона.

4.5 Метод последовательного анализа

Метод последовательного анализа был предложен Вальдом. В отличие от метода Байеса число обследований заранее не устанавливается, их проводится столько, сколько необходимо для принятия решения с определенной степенью риска.

При использовании метода Байеса для распознавания состояний D_1 и D_2 следует составить отношение (для независимых признаков):

$$\frac{P(D_2/K^*)}{P(D_1/K^*)} = \frac{P(D_2)}{P(D_1)} \cdot \frac{P(k_1^*/D_2) \dots P(k_v^*/D_2)}{P(k_1^*/D_1) \dots P(k_v^*/D_1)}$$

если

$$\frac{P(D_2/K^*)}{P(D_1/K^*)} > 1, \text{или } \frac{P(k_1^*/D_2) \dots P(k_v^*/D_2)}{P(k_1^*/D_1) \dots P(k_v^*/D_1)} > \frac{P(D_1)}{P(D_2)},$$

то принимается решение $K^* \in D_2$.

В методе последовательного анализа отношения вероятностей (отношения правдоподобия) составляются последовательно.

Допустим, что объект K^* имеет признак K_1, причем он при диагнозе D_2 встречается чаще, чем при диагнозе D_1. При этом, если

$$\frac{P(K_1/D_2)}{P(K_1/D_1)} > A, \text{то } K^* \in D_2.$$

где A– верхняя граница принятия решения.

В противном случае, когда признак K_1 значительно чаще встречается при диагнозе D_1, принимается решение

$$\frac{P(K_1/D_2)}{P(K_1/D_1)} < B, \text{то } K^* \in D_1$$

где B– нижняя граница принятия решения.

Отношение вероятностей $B < \frac{P(K_1/D_2)}{P(K_1/D_1)} < A$ называют отношением правдоподобия.

Если в результате первой проверки данное условие выполняется, то необходима следующая проверка, тогда отношение правдоподобия:

$$B < \frac{P(K_1/D_2)}{P(K_1/D_1)} \cdot \frac{P(K_2/D_2)}{P(K_2/D_1)} < A.$$

расчеты повторяются до тех пор, пока значение отношения не выйдет за одну из указанных границ (A или B). Границы рассчитывают, исходя из вероятностей ошибок первого α и второго β рода, которые считаются заданными:

$$\frac{1-\beta}{\alpha} \geq A, \;\; B \geq \frac{\beta}{1-\alpha}.$$

В практических расчетах можно принимать $\alpha=\beta=0.05...0.1$.

Рекомендованная литература: [1,2,6]

Контрольные вопросы

1.Перечислите статистические методы распознавания признаков.
2. Что является основой метода Байеса?
3. Как определить вероятности диагнозов по методу Байеса?
4. Поясните метод Байеса.
5. Что такое решающее правило?
6.Дайте определения методу минимального риска, минимального числа ошибочных решений, наибольшего правдоподобия?
7. Для чего предназначен метод минимакса?
8. Что является основой метода Неймана-Пирсона?
9.Что является основой метода последовательного анализа?

5 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

5 Методы оценки информативности диагностических параметров
5.1. Определение состояний объекта
5.2. Определение контролируемых параметров
5.3. Оценка информативности контролируемых параметров

Если для контроля технического состояния использовать все контролируемые параметры (без какого-либо их отсева), то получаемые системы контроля будут перегружены датчиками, а программы диагностирования весьма громоздки. В этой связи очевидна необходимость уметь выбирать из выделенных признаков такое их минимальное количество, которое было бы необходимо и достаточно для распознавания каждого состояния объекта. В этом случае и объект контроля, и средства контроля будут наиболее простыми и эффективными.

5.1 Определение состояний объекта

При диагностировании объектов обычно рассматриваются и учитываются только два характерных состояния:

- объект функционирует;
- объект не функционирует.

Однако с учетом комплектующих объекта (блоков, агрегатов, деталей) фактическое число состояний может быть существенно больше, например:

- первый блок объекта функционирует;
- второй блок объекта не функционирует;
- третий блок объекта функционирует и т.д.

В этой связи задача определения числа состояний объекта по существу сводится к задаче определения числа таких блоков или агрегатов, отказ которых приводит к отказу всего объекта в целом.

В общем случае, когда объект состоит из N комплектующих, возможное число состояний может быть определено по формуле

$$S = 2^{N}. \tag{5.1}$$

Число состояний, когда объект не функционирует (объект отказал), равно

$$S_{o} = S - 1. \tag{5.2}$$

Например, пусть рассматриваемый объект состоит из двух последовательно соединенных комплектующих (агрегатов) так, как это показано на рисунке 5.1.

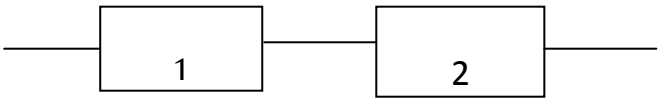


Рисунок 5.1- Схема объекта из двух агрегатов

Тогда можно выделить четыре возможных состояния объекта:
- отказал первый агрегат;
- отказал второй агрегат;
- отказали первый и второй агрегаты;
- объект функционирует (не отказали ни первый, ни второй агрегаты).

Из общего числа состояний S число неработоспособных состояний S_N может быть определено по формуле

$$S_N = 2^N - 1. \quad (5.3)$$

Очевидно, что при последовательном соединении элементов в рассматриваемом примере состояния 1,2,3 свидетельствуют о неработоспособности всей системы. Число состояний, соответствующих отказу всего объекта, 4 - 1= 3.

При контроле реальных технических систем, состоящих из большого числа элементов, даже при учете для каждого элемента только двух состояний общее количество возможных состояний оказывается чрезвычайно большим. Например, у объекта, состоящего из 200 деталей, общее число возможных состояний $S = 2^{200}$, а число состояний неправильного функционирования $S_N = 2^{200} - 1$

Для уменьшения числа учитываемых состояний объекта принимают следующие допущения:

1. Вероятность одновременного возникновения в системе отказов двух и более элементов пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью отказа только одного элемента. Фактически это означает, что число неработоспособных состояний системы может быть определена по формуле

$$S_N = N,$$

где N - количество элементов в системе (в объекте контроля).

2.Можно исключить из рассмотрения отказы тех элементов, вероятность отказа которых мала, или их отказы не имеют опасных последствий. В этой связи число возможных состояний, практически приводящих к отказу всего объекта, равна

$$S_N < N. \quad (1.4)$$

Перечисленные допущения позволяют существенно (на несколько порядков) снизить размерность числа рассматриваемых состояний у контролируемых объектов.

Последовательность выбора контролируемых состояний и их признаков рассмотрим на примере упрощенной схемы системы, которая представлена на рисунке 5.2.

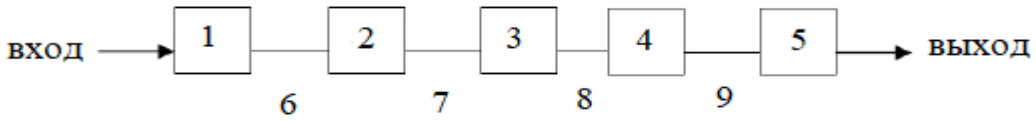


Рисунок 5.2- Упрощенная схема системы

Из рисунка следует, что рассматриваемая система состоит из девяти элементов. При этом общее количество ее возможных неработоспособных состояний $S_N = 2^9 - 1 = 511$.

5.2 Определение контролируемых параметров

Если допустить, что одновременно может отказать только один блок, то число неработоспособных состояний составит $S_N = N = 9$. Отбросив маловероятные отказы (блоки 6, 7, 8, 9), получим, что наиболее вероятное количество неработоспособных состояний системы S_N равно всего лишь 5.

Такими состояниями являются:

S_1 - отказ блока №1;

S_2 - отказ блока №2;

S_3 - отказ блока №3;

S_4 - отказ блока №4;

S_5 - отказ блока №5.

В качестве признаков перечисленных состояний будем использовать отклонение от установленной нормы значений тех или иных параметров. В рассматриваемом примере такими признаками могут быть: 1 - повышение уровня шума, 2 - повышение давления, 3 - повышение температуры, 4 - величина напряжения, 5 - величина силы тока, 6 – величина сопротивления обмоток, 7 – величина сопротивления контакта, 8 – величина сопротивления изоляции.

В общем случае между состояниями S_i и их признаками X_j могут встречаться виды взаимосвязи, представленные на рисунке 5.3.

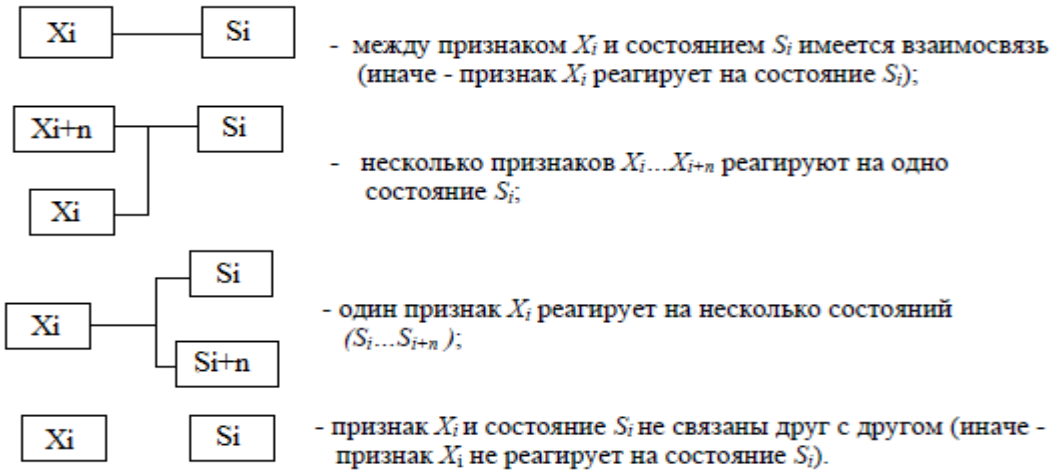


Рисунок 5.3- Виды взаимосвязи состояний и признаков

Для определения типа взаимосвязи (или отсутствия взаимосвязи) между выбранными состояниями и предварительно выбранными признаками состояний (параметрами) обычно используют или логический анализ, или натурный эксперимент. Применительно к рассматриваемому примеру на рисунке 5.4 представлена схема причинно-следственных связей между S_i и X_i.

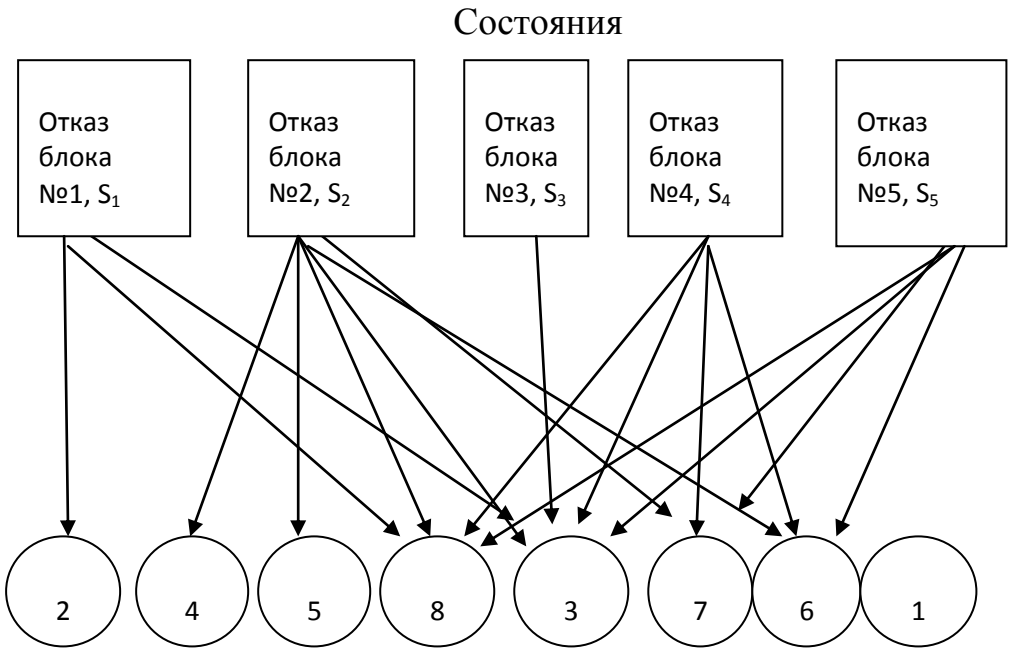


Рисунок 5.4- Схема взимосвязи состояний и признаков

Построенная на рисунок 5.4 схема причинно-следственных связей в принципе позволяет выбрать минимально необходимое количество признаков, необходимых для контроля и выявления всех пяти неработоспособных состояний (ибо ясно, что восемь предварительно

отобранных признаков явно избыточно). Однако для облегчения отбора минимально необходимого количества признаков схему причинно-следственных связей представляют не в графической, а в табличной (матричной) форме (таблица 5.1). Табличная форма строится на основе графической схемы.

Таблица 5.1

Табличная форма графической схемы.

Признаки		Состояния				
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
X_1	2	1	0	0	0	0
X_2	4	0	1	0	0	0
X_3	5	0	1	0	0	0
X_4	8	1	1	0	1	1
X_5	3	1	1	1	1	1
X_6	7	0	1	0	1	1
X_7	6	0	1	0	1	1
X_8	1	0	0	0	1	0

В таблице 5.1 строки образованы признаками состояний, столбцы - состояниями, а элементами матрицы являются нули или единицы. Нуль проставляется на пересечении строки и столбца в том случае, если соответствующий признак не реагирует на соответствующее состояние. Единица проставляется в противном случае.

Анализ таблицы позволяет исключить полностью дублирующие друг друга признаки. Дублирующими (лишними) являются признаки, повторяющие комбинацию нулей и единиц. Из двух взаимо дублирующих признаков обычно удаляют тот, который труднее (дороже, долговременнее) контролировать. В нашем примере удаляются из дальнейшего рассмотрения признак X_2 (он дублирует признак X_3) и признак X_7 (он дублирует признак X_6).

В диагностике считают, что взаимо дублирующие признаки имеют одинаковую информацию.

5.3 Оценка информативности контролируемых параметров

Если для контроля технического состояния использовать все контролируемые параметры (без какого-либо их отсева), то получаемые системы контроля будут перегружены датчиками, а программы диагностирования весьма громоздки. В этой связи очевидна необходимость

уметь выбирать из выделенных признаков такое их минимальное количество, которое было бы необходимо и достаточно для распознавания каждого состояния объекта. В этом случае и объект контроля, и средства контроля будут наиболее простыми и эффективными.

Исходя из сказанного, становится очевидной необходимость отбора из первоначально выделенных признаков такого их минимального количества, которых было бы необходимо и достаточно для распознавания каждого состояния объекта. Именно в этом случае и объект контроля, и средства контроля будут наиболее простыми и эффективными.

Выбор минимального количества признаков состояний обычно проводится на основе элементов теории информации, и в частности, на основе метода И.М. Синдеева. Необходимо отметить, что данный метод может быть использован не только для решения задачи минимизации количества контролируемых параметров (признаков состояний), но и для решения задачи определения места отказа системы.

Информационную неопределенность системы, могущей находиться в *N* состояниях, количественно можно оценить энтропией *H(S)*, которая определяется по формуле

$$H(S) = \sum_{i=1}^{N} P_i \cdot \log_2 P_i, \qquad (5.5)$$

где *Pi*- вероятность того, что объект контроля находится в *i*-м состоянии; log_2 - логарифм с основанием 2.

За единицу энтропии принимается неопределенность состояния простейшей системы, состоящей из двух равновероятных состояний. То есть при $N = 2$, $P_1 = P_2 = 0.5$ по формуле получим

$$H(S) = -(0.5 \cdot \log_2 0.5 + 0.5 \cdot \log_2 0.5) = 1\text{бит}.$$

Определенная таким образом единица энтропии называется двоичной единицей и обозначается "бит".

При контроле технического состояния часто принимается допущение о равновероятности отказа ее элементов, то есть о равной вероятности состояний. Для случая *N* равновероятных состояний $(P_1 = P_2 = \ldots P_N = 1/N)$ величина энтропии системы *H(S)* будет равна

$$H(S) = -\sum_{i=1}^{N} P_i \cdot \log_2 P_i = -\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{N} \log_2 \frac{1}{N} = \log_2 N. \qquad (5.6)$$

Используя предыдущую зависимость, можно сказать, что энтропия системы *H(S)*, например при $N = 8$, будет равна

$$H(S) = \log_2 8 = 3$$

Очевидно, что по мере проверки наличия тех или иных признаков (то есть по мере проверки численных значений контролируемых параметров) информационная неопределенность системы будет уменьшаться. Так, если перед проверкой неопределенность системы оценивается энтропией *H(S)*, то после проверки признака X_i уменьшившаяся энтропия$H(S/x_i)$будет равна

$$H(S/x_i) = P_{X_i} H_{X_i}(S) + P'_{X_i} H'_{X_i}(S),$$

гдеP_{X_i} - вероятность того, что система находится в тех состояниях, в которых признак критичен, то есть $x_i = 1$.

Очевидно, что величина P_{X_i}может быть определена по формуле

$$P_{X_i} = \frac{m}{N}, \tag{5.7}$$

P'_{X_i}- вероятность того, что система находится в тех состояниях, к которым признак x_j некритичен, то есть $x_i = 0$.

Очевидно, что величина P'_{X_i} может быть определена по формуле

$$P'_{X_i} = \frac{n}{N}. \tag{5.8}$$

$H_{X_i}(S)$- энтропия тех m состояний системы, к которым признак x_j критичен, то есть $x_i=1$. Величина $H_{X_i}(S)$по аналогии равна

$$H_{X_i}(S) = \log_2 m. \tag{5.9}$$

$H'_{X_i}(S)$- энтропия тех n состояний системы, к которым признак x_j некритичен, то есть $x_i=0$. Величина $H'_{X_i}(S)$по аналогии равна

$$H'_{X_i}(S) = \log_2 n, \tag{5.10}$$

где m - число единиц в строке данного признака x_j; n - число нулей в строке данного признака x_j.

Тогда величину информации Ix_i, которую несет проверка признака (параметра) x_i, можно количественно оценить как разность энтропии системы перед проверкой признака *H(S)* и энтропией системы после проверки этого признака $H(S/x_i)$. То есть с учетом предыдущих формул, а также, учитывая, что m + n = N, можно записать

$$I_{X_i} = H(S) - H(S/x_i) = \log_2 N - \left(\frac{m}{N} \cdot \log_2 m + \frac{n}{N} \cdot \log_2 n\right). \tag{5.11}$$

Подставив вместо$\log_2 N$ равнозначное выражение

$$\log_2 N = \frac{m}{N} \cdot \log_2 N + \frac{n}{N} \cdot \log_2 N,$$

и выполнив преобразования, окончательно получим формулу для расчетаI_{X_j}

$$I_{X_j} = -\left(\frac{m}{N} \cdot \log_2 \frac{m}{N} + \frac{n}{N} \cdot \log_2 \frac{n}{N}\right). \quad (5.12)$$

Информативность того или иного признака (параметра) помимо величиныI_{X_i} можно оценить и другими показателями, например, показателемZ_{X_i}. В отличие I_{X_i}, измеряется в битах, величина Z_{X_i} является безразмерной, но пропорциональной I_{X_i}. Количественно величинаZ_{X_i} рассчитывается по формуле

$$Z_{X_i} = m_i \cdot n_i \quad (5.13)$$

где m_i, n_i - соответственно количество единиц и нулей в j-й строке, соответствующей признаку (параметру) x_i в таблице.

Рекомендованная литература: [6,8,9]

Контрольные вопросы

1. Какие два характерных состояния рассматриваются для диагностировании объектов?
2. Назовите методы оценки информативности диагностических параметров.
3. Как определить число состояний объекта?
4. Как происходит определение контролируемых параметров?
5. Как определяются типа взаимосвязи?
6. Дайте оценку информативности контролируемых параметров.

6 МЕТОДЫ И ПРОГРАММЫ ПОИСКА МЕСТА ОТКАЗА

6. Программы поиска места отказа
6.1. Общие понятия и классификация программ
6.2. Жестко-последовательные программы
6.2.1. Программы по функциональной схеме
6.2.2. Программы “вероятность время”
6.3. Гибко-последовательные программы
6.3.1. Программы половинного разбиения
6.3.2. Программы по максимуму информации

6 Программы поиска места отказа

Если контроль работоспособности объекта дает отрицательный результат, то возникает задача определения места отказа с заданной подробностью (точностью) до съемного блока, съемной платы в блоке, отдельного элемента в схеме. Как правило, процесс поиска места отказа имеет большую длительность и трудоемкость, требует специальных средств диагностирования. Они зависят от того, насколько хорошо построен сам этот процесс, каким выбран алгоритм диагностирования.

Алгоритмом диагностирования называется совокупность предписаний о порядке проведения диагностирования (ГОСТ 20911-75). Он задает совокупность элементарных проверок, их последовательность, правила их реализации и правила обработки результатов контроля.

6.1 Общие понятия и классификация программ

Если при эксплуатации оборудования сетей железных дорог или при проверке их работоспособности установлен факт неработоспособности, то чаще всего возникает необходимость в поиске места отказа и выявлении последствий отказа. Опыт эксплуатации свидетельствует, что из перечисленных мероприятий наиболее трудоемким и интеллектоемким является поиск места отказа. Так, на поиск места отказа в среднем затрачивается до 90 % времени, связанного с проведением всего комплекса мероприятий по отказу. В этой связи особое значение приобретает формирование у специалистов по системам обеспечения движения поездов знаний и навыков по научно обоснованным методам программирования процессов поиска мест отказов.

Под программой поиска места отказа понимают заранее составленную и документально оформленную последовательность элементарных проверок (замеров контролируемых параметров) и последовательность анализа результатов элементарных проверок, выполняемых с целью установления причины отказа и отказавших агрегатов (узлов, систем, элементов и т.д. в зависимости от степени детальности поиска мест отказа).

Из всех возможных вариантов программ всегда имеется такой, который является оптимальным с точки зрения используемого критерия. В качестве критерия оптимальности программы поиска места отказа могут быть использованы:

- суммарное время выполнения необходимых проверок;
- суммарное количество необходимых проверок;
- суммарная стоимость проверок (например, в денежном выражении);
- суммарная стоимость (или суммарная масса) контрольно-поверочной аппаратуры, задействованной для выполнения необходимых проверок.

Необходимо отметить, что в практике специалистов АТС и ЭНС наибольшее распространение получил такой критерий оптимальности программ поиска места отказа, как суммарное время выполнения необходимых проверок t_{Σ}. В соответствии с этим критерием программа строится таким образом, чтобы обеспечить минимальное суммарное время на выявление места отказа, то есть

$$t_{\sum} = \min(\sum_{i=1}^{K} t_i), \qquad (6.1)$$

где t_i - время выполнения i-ой элементарной проверки; K - максимальное число элементарных проверок для выявления места отказа в объекте.

Понятно, что при наличии нескольких вариантов программ поиска места отказа выбирается тот, который обеспечивает меньшую величину критерию t_{Σ}. Если же и таких вариантов несколько, то предпочтение отдается такой программе, которая обеспечивает лучшие значения другим критериям (например, суммарному количеству необходимых элементарных проверок).

В связи с разнообразием видов оборудования железных дорог, располагаемых контрольно-проверочных средств, а также эксплуатационных условий, в практике АТС и ЭНС применяются несколько разновидностей программ поиска места отказа.

В жестких программах последовательность элементарных проверок определяется заранее, и в ходе поиска места отказа не изменяется. Кроме того, заранее должен быть определен и перечень параметров, контролируемых в каждой элементарной проверке.

Жесткие программы получили наибольшее распространение в автоматических и в автоматизированных системах контроля.

В гибких программах последовательность элементарных проверок определяется в ходе поиска места отказа на основе определенных правил. Кроме того, перечень параметров, контролируемых в каждой элементарной проверке, формируется только после анализа результатов предыдущей элементарной проверки. Таким образом, программа (алгоритм) формируется "гибко", максимально приспосабливаясь к специфике каждого конкретного отказа АТ.

Классификация программ. Один из возможных вариантов классификации программ поиска места отказа представлен на рисунке 6.1. В соответствии с рисунком все типы программ по способу выбора контролируемых параметров и последовательности элементарных проверок условно разграничиваются на две группы: *жесткие* программы и *гибкие* программы.

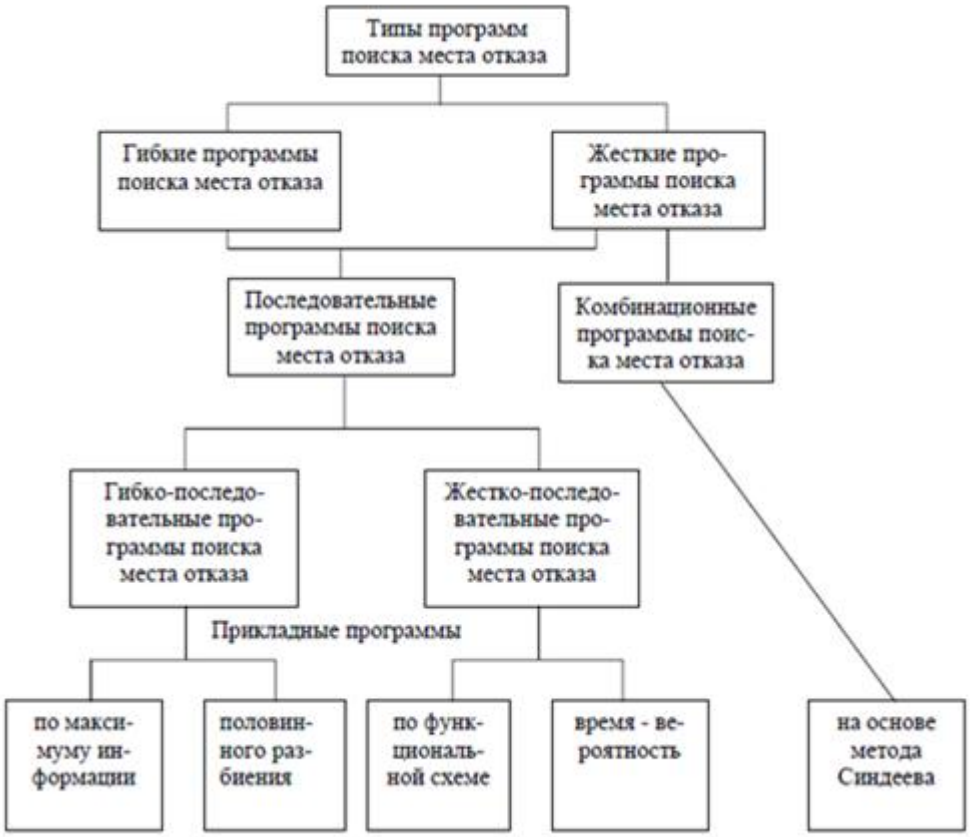


Рисунок 6.1- Классификация программ поиска места отказа

Гибкие программы наибольшее распространение получили при поиске места отказа способом технического осмотра (т.е. визуально-инструментально, группой специалистов АТС и ЭНС).

Все типы программ по частоте анализа результатов элементарных проверок условно разграничивают на две группы: последовательные программы и комбинационные программы.

В последовательных программах анализ результатов проводится после каждой элементарной проверки. В комбинационных программах - только после завершения всех элементарных проверок, когда проводится единственный обобщающий анализ. Необходимо отметить, что в практике АТС и ЭНС наибольшее распространение получили последовательные программы. Что касается комбинационных программ, то они представлены одним типом прикладной программы - "программой на основе метода Синдеева", рассмотренного ранее, где она использовалась не как инструмент

для поиска места отказа, а как инструмент выбора минимально необходимого набора контролируемых параметров.

Наиболее распространенные программы поиска места отказа условно разграничивают на две группы:

-гибко-последовательные (к ним относят: "программу по максимуму информации" и "программу половинного разбиения");

-жестко-последовательные(к ним относят: "программу по функциональной схеме" и "программу время-вероятность").

6.2 Жестко-последовательные программы

6.2.1 Программы по функциональной схеме

Программа по функциональной схеме основана на поиске места отказа путем выполнения в "жестком" порядке (строго по функциональной схеме отказавшей системы, например, в порядке передачи от элемента к элементу механической нагрузки или в направлении движения жидкости) последовательных элементарных проверок. Результаты каждой элементарной проверки сразу же анализируются.

Элементарной проверке подлежит диагностический параметр (параметры) каждого отдельного элемента системы. Поиск места отказа прекращается, как только при анализе результатов очередной элементарной проверки окажется найденным отказавший элемент системы. Очевидно, что в самом неблагоприятном случае (когда отказал последний из проверяемых элемент системы) число элементарных проверок будет максимальным и равным числу элементов в системе.

Достоинствами рассмотренной программы являются:

- возможность использования для новой техники, когда не накоплен опыт ее эксплуатации, и тем более - когда не накоплены статистические данные по поиску мест ее отказов;

- простота, доступность для широкого круга специалистов АТС и ЭНС.

К недостаткам программы следует отнести:

- необходимость выполнения большого количества элементарных проверок, что требует больших затрат времени и материальных ресурсов;

- необходимость использования при поиске мест отказов помимо специалистов и КПА еще и эксплуатационной документации (технического описания, инструкции по технической эксплуатации, альбома формулярных схем и т.д.).

Несмотря на отмеченные недостатки, "программа по функциональной схеме" нашла у специалистов ЭНС и АТС, пожалуй, самое широкое распространение прежде всего из-за своей простоты, доступности широкому кругу специалистов (независимо от их опыта эксплуатации, в определенной степени, - от их квалификации).

6.2.2 Программы “вероятность-время”

Программа “вероятность - время” может быть использована лишь тогда, когда по отказам данного типа оборудования уже накоплен и систематизирован достаточно большой опыт ее эксплуатации, и, в частности, опыт поиска места отказа. Прежде всего, по каждому элементу системы должны быть известны:

- вероятность отказа i-го элемента q_i;

- время, необходимое для элементарной проверки i-го элемента τ_i.

Программа время-вероятность основана на поиске места отказа путем выполнения в "жестком" порядке (строго в порядке убывания численных значений отношения qi/τ_i) последовательных элементарных проверок элементов. Элементарной проверке подлежит диагностический параметр (параметры) каждого отдельного элемента системы. Результаты каждой элементарной проверки сразу же анализируются. Поиск места отказа прекращается, как только при анализе результатов очередной элементарной проверки окажется найденным отказавший элемент системы.

Очевидно, что такая программа позволяет в первую очередь проверять те элементы отказавшей системы, вероятность отказа которых наибольшая, а время на элементарную проверку - наименьшее. В результате этого общее время на выявление места отказа системы оказывается существенно меньше, чем при использовании ранее рассмотренной программы по функциональной схеме.

Покажем это на примере системы, изображенной на рисунке 6.2, и содержащей N последовательно соединенных элементов. Один из элементов отказал, что привело к отказу всей системы.

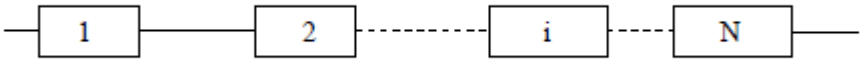


Рисунок 6.2- Схема системы из последовательно соединенных элементов

Пусть по каждому i-му элементу системы известны численные значения вероятности его отказа q_i и времени на его элементарную проверку τ_i. Для начала назначим произвольную программу поиска места отказа, (то есть произвольный порядок выполнения элементарных проверок), например, в соответствии с нумерацией элементов на рисунке.

В этом случае математическое ожидание времени поиска места отказа составит

$$M(t_{\sum}\ )_I = q_1 \cdot \tau_1 + q_2 \cdot (\tau_1 + \tau_2) + \cdots + q_N \cdot (\tau_1 + \tau_2 + \cdots + \tau_N). \quad (6.2)$$

Теперь назначим второй вариант программы поиска места отказа, отличающийся от первого варианта тем, что вначале проверяется второй элемент, затем первый, а последующие элементарные проверки выполняются в такой же последовательности, как и в первом варианте (в порядке нумерации).

Для второго варианта программы математическое ожидание времени поиска места отказа составит

$$M(t_{\sum}\ )_{\text{П}} = q_2 \cdot \tau_2 + q_1 \cdot (\tau_2 + \tau_1) + \cdots + q_N \cdot (\tau_1 + \tau_2 + \cdots + \tau_N). \quad (6.3)$$

Если вычесть из $M(t_{\Sigma})_I$ величину $M(t_{\Sigma})_{II}$, то после выполнения арифметических действий получим

$$M(t_{\sum}\ )_I - M(t_{\sum}\ )_{\text{П}} = q_2 \cdot \tau_1 - q_1 \cdot \tau_2 \quad (6.4)$$

Из анализа полученной разности следует, что первый вариант программы будет эффективнее (исходя из затрат времени на поиск места отказа) второго варианта лишь в том случае, когда

$$q_2 \cdot \tau_1 - q_1 \cdot \tau_2 < 0, \text{то есть } q_2 \cdot \tau_1 > q_1 \cdot \tau_2, \text{или иначе } \frac{q_1}{\tau_1} > \frac{q_2}{\tau_2} \quad (6.5)$$

Таким образом, упорядочив элементарные проверки элементов в соответствии с выражением

$$\frac{q_1}{\tau_1} > \frac{q_2}{\tau_2} > \cdots \frac{q_i}{\tau_i} > \cdots \frac{q_N}{\tau_N}, \quad (6.6)$$

мы получим оптимальную программу поиска места отказа, обеспечивающую минимальную величину математического ожидания времени поиска места отказа. Правило (1.5) положено в основу программ "время-вероятность".

Рассмотрим пример практического составления и использования программы "время-вероятность". Пусть требуется составить программу поиска места отказа в системе, состоящей из пяти элементов (рисунок 1.3). То есть требуется указать оптимальный порядок проведения элементарных проверок элементов, занести в таблицу 6.1.

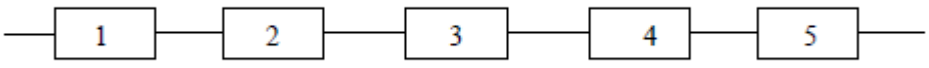


Рисунок 6.3- Пример пятиэлементной системы

Таблица 6.1

Оптимальный порядок проведения элементарных проверок элементов

Наименование исходного данного или рассчитываемой величины	Числовые значения				
Порядковый номер элемента в соответствии с рисунком	1	2	3	4	5
Число применений системы	23	23	23	23	23
Число отказов элемента системы n_i	2	4	7	1	9
Среднее время выполнения элементарной проверки элемента τ_i, мин.	15	5	8	50	6
Вероятность отказа элемента$q_i = n_{i/N}$	0,09	0,17	0,3	0,05	0,39
Величина $q_{i/}\tau_i$	0,006	0,034	0,038	0,001	0,065
Оптимальная очередность выполнения элементарных проверок	4	3	2	5	1

Из опыта эксплуатации известно, что за 23 случая применения данной системы происходили отказы элементов, указанные в таблице 6.1.

Решение задачи начинается с расчета для каждого элемента величины q_i (она определяется как отношение числа отказов элемента n_i к числу применения системы). Затем для каждого элемента рассчитывается величина $q_{i/}\tau_i$.

По численным значениям $q_{i/}\tau_i$ проводим новую нумерацию элементов системы (в порядке убывания значений $q_{i/}\tau_i$). Эта новая нумерация указана в последней строке таблицы, и она определяет искомый порядок выполнения элементарных проверок элементов в рассматриваемой системе.

Достоинствами программы "время-вероятность" являются:

- высокая вероятность обнаружения места отказа при выполнении первых элементарных проверок, что позволяет существенно уменьшить как время поиска места отказа, так и затраты материальных средств;
- достаточная простота реализации для исполнителей, когда известны необходимые статистические данные.

К недостаткам данной программы следует отнести необходимость владения информацией о статистических данных по отказам и времени их проведения из опыта предыдущей эксплуатации. Данное обстоятельство ограничивает возможность широкого использования данной программы в практике ИАС, особенно при эксплуатации новой АТ.

6.3 Гибко-последовательные программы

6.3.1 Программы половинного разбиения

Программа половинного разбиения является упрощенным аналогом программы по максимуму информации. Если принять допущение о равновероятности отказа каждого элемента системы (то есть $q_1=q_2=...=q_i=...=q_N$), то максимально информативной первой элементарной проверкой будет проверка *N/2* (половины) элементов. Во второй элементарной проверке должно быть проверено *N/4* элементов, в третьей - *N/8* элементов, в четвертой - *N/16* элементов и т.д. Таким образом, при каждой очередной элементарной проверке проверяется половина смежных элементов от того количества, которое проверялось в предыдущей элементарной проверке.

После каждой элементарной проверки проводится анализ полученных результатов. По результатам такого анализа принимается решение о месте проведения второй и последующих элементарных проверок. Поиск места отказа прекращается, как только при анализе результатов очередной элементарной проверки окажется найденным отказавший элемент.

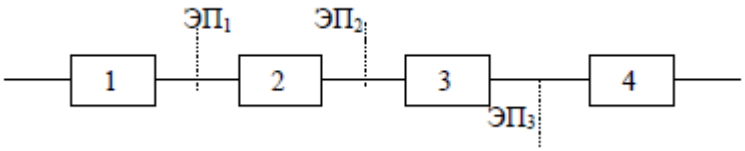


Рисунок 6.4 -Программа половинного разбиения

Пример практического применения программы половинного разбиения применительно к четырехэлементной системе из равно надёжных элементов представлен на рисунке 6.4.

На данном рисунке 6.4 вертикальные линии, обозначающие элементарные проверки, расставлены над и под схемой. Это необходимо для разграничения элементарных проверок, выполняемых непосредственно после проверок с соответственно положительным и отрицательным исходом (элементарной проверкой, давшей положительный исход, условно будем считать такую, если при ней обнаружен отказ, а отрицательной - если отказ не обнаружен).

В заключение необходимо отметить, что все рассмотренные программы поиска места отказа обеспечивают проведение системного упорядоченного поиска места отказа. Это позволяет на один-два порядка сократить общее время поиска по сравнению с бессистемными, неупорядоченными методами (методами "тыка").

6.3.2 Программы по максимуму информации

Программа по максимуму информации может быть использована лишь тогда, когда по отказам оборудования АТС и ЭНС данного типа уже накоплен и систематизирован определенный опыт ее эксплуатации, в частности, когда для каждого элемента системы известны величина вероятности его отказа q_i.

Программа по максимуму информации основана на поиске места отказа путем выполнения в "гибком" порядке последовательных элементарных проверок групп элементов. В ряде случаев в группе может быть и один элемент. В первой элементарной проверке проверяется такая группа смежных элементов, сумма вероятностей отказов которых равна примерно 0.5, 0.25 - для второй, 0.125 - для третьей, 0.0625 - для четвертой и т.д.

Гибкость программы заключается в том, что решение о месте проведения второй и последующих элементарных проверок не известно заранее, а принимается с использованием правила: "в проверяемой группе должен быть отказавший элемент".

Поиск места отказа прекращается, как только при анализе результатов очередной элементарной проверки окажется найденным отказавший элемент. Такая программа позволяет выполнять максимально информативные элементарные проверки, в результате существенно уменьшается как число элементарных проверок, так и общее время поиска места отказа.

Для иллюстрации сказанного рассмотрим пример использования и оформления программы.

Пусть объект диагностирования состоит из N последовательно соединенных элементов. Схема объекта и числовые исходные данные представлены на рисунок 6.5.

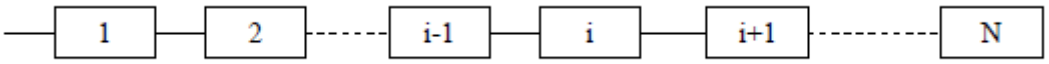


Рисунок 6.5- Схема элементарных проверок

Требуется сформировать такую программу поиска места отказа, для обеспечения и получение максимума информации при выполнении каждой элементарной проверки. Решение поставленной задачи будем выполнять на основе некоторых положений теории информации.

Информационную неопределенность системы, состоящей из N элементов, один из которых отказал, можно количественно определить величиной энтропии $H(S)$ по известной формуле:

$$H(S) = -\sum_{i=1}^{N} q_i \cdot \log_2 \cdot q_i, \quad (6.7)$$

где q_i - вероятность отказа *i*-го элемента; log_2 - логарифм с основанием 2.

Если при *i*-ой элементарной проверке проверяется не *N*, а *m* элементов, то информационную неопределенность подсистемы из m элементов перед *j*-ой проверкой можно оценить энтропией *H(S)* по формуле

$$H(S)_j = -\sum_{i=1}^{m} q_i \cdot \log_2 \cdot q_i, \quad (6.8)$$

а после *j*-ой проверки - величиной энтропии $H(S)_j'$, определяемой по формуле

$$H(S)_j^{'} = -\sum_{i=1}^{m}(1 - q_i) \cdot \log_2(1 - q_i) \quad (6.9)$$

Очевидно, что количество информации, которую несет *j*-я элементарная проверка I_j, можно определить как разность $H(S)_j$ *и* $H(S)_j'$, то есть

$$I_j = H(S) - H(S)^{'} = -\sum_{i=1}^{m} q_i \cdot \log_2 \cdot q_i - [-\sum_{i=1}^{m}(1 - q_i) \cdot \log_2(1 - q_i)] \quad (6.10)$$

Используя последнее уравнение, можно определить, в каком же случае, то есть при какой величине

$$Q_i = \sum_{i=1}^{m} q_i. \quad (6.11)$$

j-я проверка будет максимально информативной. Иными словами, можно определить положение экстремума функции $I_j(Q_j)$.

Исходя из норм дифференциального исчисления, становится очевидным, что экстремум функции $I_j(Q_j)$ находится в точке, обеспечивающей равенство

$$\frac{dI_j}{dG_j} = 0.$$

С учетом сказанного выше, выполнив подстановку Q_j в конечное выражение I_j и продифференцировав полученное уравнение по Q_j, приравняв дифференциальное уравнение нулю и решив его относительно Q_j, получим, что максимум информации при *j*-й элементарной проверке можно получить только тогда, когда Q_j (по существу это Q_1) будет равно 0,5.

Аналогичным образом можно получить, что в интересах максимизации информативности элементарных проверок $Q_2 = 0.25$, $Q_3 = 0.125$ и т.д.

Представим возможную схему элементарных проверок в соответствии с рассмотренной программой по максимуму информации (рисунок 6.6).

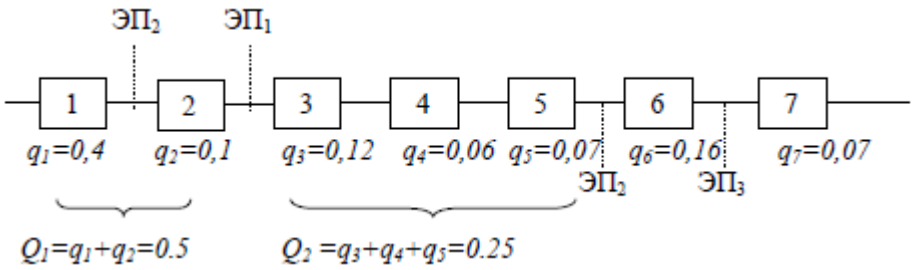


Рисунок 6.6- Схема проверок объекта

На рисунке 6.6 линия (обозначающая элементарную проверку) изображена над схемой элементов в том случае, если предыдущая элементарная проверка дала положительный результат. Стрелка изображена под схемой, если предшествующая элементарная проверка дала отрицательный результат (элементарной проверкой, давшей положительный результат, условно будем считать такую, если при ней обнаружен отказ, а отрицательной - если отказ не обнаружен).

На практике программы поиска места отказа часто изображают графически (в виде ветвящегося "дерева"). Применительно к только что рассматриваемому примеру на рисунке 1.6 представлена такая графическая форма программы (рисунок 1.7).

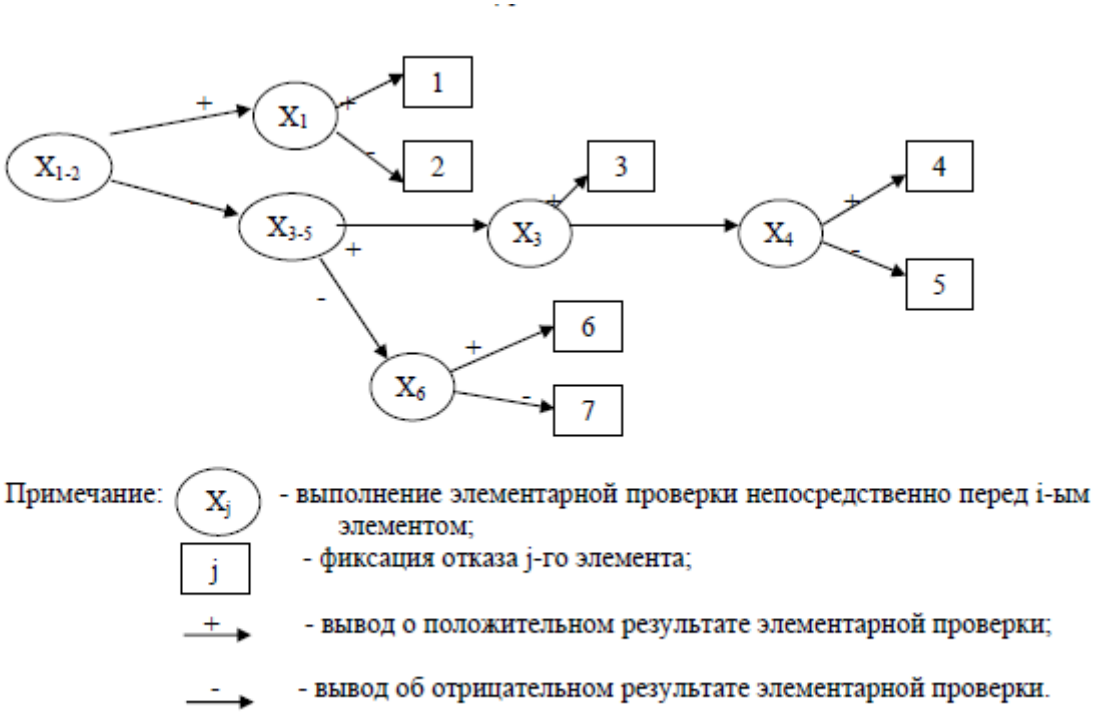


Рис. 22. Графическая форма программы

Рисунок 6.7- Графическая форма программы

Из рассмотренного примера следует, что лишь первая и вторая элементарные проверки проведены в строгом соответствии с правилами программы по максимуму информации (когда $Q_1 = 0{,}5$, а $Q_2 = 0{,}25$). Остальные проверки выполнены, исходя из единственно возможной в данной системе логики.

Существенным достоинством программы по максимуму информации является ее оптимальность с точки зрения времени поиска места отказа и минимальности потребного количества элементарных проверок.

В то же время такая программа требует наличия количественных исходных данных (численных значений вероятности отказа каждого элемента), что не всегда можно обеспечить при реальной эксплуатации АТ.

Рекомендованная литература: [4,6,8,9].

Контрольные вопросы

1. Что называется алгоритмом диагностирования?
2. Перечислите программы поиска места отказа.
3. Что используют в качестве критерия оптимальности программы поиска места отказа?
4. Как используется программа “вероятность - время”?
5. Как используется программа половинного разбиения?
6. Как используется программа по максимуму информации?
7. Представьте графическую форму программы.

7 МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

7 Методы контроля в технической диагностике
7.1. Вихретоковые методы контроля
7.2 Методы капиллярного неразрушающего контроля
7.3. Оптический неразрушающий контроль
7.4. Магнитный вид неразрушающего контроля

Физические методы могут применяться для контроля: изменения геометрической формы элементов; нарушения структурной целостности (трещины, усталостные повреждения); потери прочности.

Перечислим наиболее распространенные физические методы контроля:

- визуальный контроль с использованием различных оптических средств (бинокли, линзы, эндоскопы, волоконно-оптические устройства), например, осмотр деталей ЛЭП;

- магнитная дефектоскопия – на ОД воздействуют магнитным полем, например, на поверхность намагниченной детали наносят магнитный порошок (или его суспензию в масле), который осаждается вокруг трещины и других дефектов поверхностей деталей;

- люминесцентный метод, основанный на использовании проникающих жидкостей, светящихся в ультрафиолетовых лучах. Это позволяет обнаружить невидимые глазом трещины и другие дефекты поверхностей деталей;

- ультразвуковой метод, использующий способность ультразвуковых волн легко проходить сквозь плотные вещества и отражаться от внутренних дефектов. Для практической реализации метода необходимо обеспечить контакт объекта контроля с датчиками и излучателями, как правило, через жидкую среду;

- вихретоковый метод, основанный на использовании эффекта наведения вихревых токов в проводниках. Может применяться для контроля геометрических параметров, обнаружения внутренних отслоений, трещин, раковин и т. д.;

- акустическая эмиссия - выделение упругих волн при внешнем механическом воздействии на материал. Параметры волн определяются изменениями структуры материала;

- рентгеноскопия - может применяться в стационарных условиях для обнаружения скрытых трещин и раковин. Наличие скрытых дефектов может определяться по пикам интенсивности отраженного от детали излучения;

- спектральный и химический анализы - позволяют обнаружить изменение содержания примесей;

- инфракрасные видеокамеры и датчики - позволяют контролировать температурные режимы оборудования;

- радиоизотопный метод, заключающийся в активации поверхностей деталей радиоактивными изотопами с небольшими периодами полураспада и последующим контролем интенсивности излучения.

7.1 Вихретоковые методы контроля

Вихретоковые методы основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля. Плотность вихревых токов в объекте зависит от геометрических и электромагнитных параметров объекта, а также от взаимного расположения измерительного вихревого преобразователя (ВТП) и объекта. В качестве преобразователя используют обычно индуктивные катушки (одну или несколько). Синусоидальный (или импульсный) ток, действующий в катушках ВТП, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки преобразователя, наводя в них ЭДС или изменяя их полное электрическое сопротивление. Регистрируя напряжение на зажимах катушки или их сопротивление, получают информацию о свойствах объекта и о положении преобразователя относительно него.

ЭДС (или сопротивление) преобразователя зависит от многих параметров объекта контроля, т.е. информация, даваемая преобразователем, многопараметровая. Это определяет как преимущество, так и трудности реализации вихретоковых методов (ВТМ). С одной стороны, ВТМ позволяют осуществить многопараметровый контроль; с другой стороны, требуются специальные приемы для разделения информации об отдельных параметрах объекта. При контроле одного из параметров влияние остальных на сигнал преобразователя становится мешающим, поэтому это влияние необходимо уменьшать.

Особенность вихретокового контроля в том, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта. Их взаимодействие происходит обычно на расстояниях, достаточных для свободного движения преобразователя относительно объекта (от долей миллиметра до нескольких миллиметров). Поэтому этими методами можно получать хорошие результаты контроля даже при высоких скоростях движения объектов.

Получение первичной информации в виде электрических сигналов, бесконтактность и высокая производительность определяют широкие возможности автоматизации вихретокового контроля.

Одна из особенностей ВТМ состоит в том, что на сигналы преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта контроля непроводящими веществами.

Простота конструкции преобразователя - еще одно преимущество ВТМ. В большинстве случаев катушки помещают в предохранительный

корпус и заливают компаундами. Благодаря этому они устойчивы к механическим и атмосферным воздействиям, могут работать в агрессивных средах в широком интервале температур и давлений.

ВТМ основаны на возбуждении вихревых токов, а поэтому применяются в основном для контроля качества электропроводящих объектов: металлов, сплавов, графита, полупроводников. Им свойственна малая глубина зоны контроля, определяемая глубиной проникновения электромагнитного поля в контролируемую среду.

Несмотря на указанные ограничения, ВТМ широко применяют для дефектоскопии, определения размеров и структуроскопии материалов и изделий.

В дефектоскопии с помощью ВТМ обнаруживают дефекты типа несплошностей, выходящих на поверхность или залегающих на небольшой глубине (в электропроводящих листах, прутках, трубах, проволоке, железнодорожных рельсах, мелких деталях и т.д.), а также разнообразные трещины, расслоения, закаты, плены, раковины, неметаллические включения и т.д. При благоприятных условиях контроля и малом влиянии мешающих факторов удается выявить трещины глубиной 0,1-0,2 мм, протяженностью 1-2 мм (при использовании накладного преобразователя) или протяженностью около 1 мм и глубиной 1-5% от диаметра контролируемой проволоки или прутка (при использовании проходного преобразователя).

ВТМ позволяют успешно решать задачи контроля размеров изделий. Этими методами измеряют диаметр проводов контактной сети, прутков и труб, толщину металлических листов и стенок труб при одностороннем доступе к объекту, толщину электропроводящих (например, гальванических) и диэлектрических (например, лакокрасочных) покрытий на электропроводящих основаниях, толщину слоев многослойных структур, содержащих электропроводящие слои. Измеряемые толщины могут изменяться в пределах от микрометров до десятков миллиметров. Для большинства приборов погрешность измерения 2-5%. Минимальная площадь зоны контроля может быть доведена до 1 мм^2, что позволяет измерить толщину покрытия на малых объектах сложной конфигурации.

7.2 Методы капиллярного неразрушающего контроля

Капиллярные методы неразрушающего контроля основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объектов контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя.

Капиллярный НК предназначен для обнаружения невидимых или слабовидимых невооруженным глазом поверхностных и сквозных дефектов в объектах контроля, определения их расположения, протяженности (для дефектов типа трещин) и ориентации по поверхности. Этот вид контроля

позволяет диагностировать объекты любых размеров и форм, изготовленных из черных и цветных металлов и сплавов, пластмасс, стекла, керамики, а также других твердых неферромагнитных материалов.

Капиллярный контроль применяют также для объектов, изготовленных из ферромагнитных материалов, если их магнитные свойства, форма, вид и месторасположение дефектов не позволяют достичь требуемой чувствительности магнитопорошковым методом или магнитопорошковый метод контроля не допускается применять по условиям эксплуатации объекта.

Капилляр, выходящий на поверхность объекта контроля только с одной стороны, называют поверхностной не сплошностью, а соединяющий противоположные стенки объекта контроля - сквозной. Если поверхностная и сквозная не сплошности являются дефектами, то допускается применять вместо них термины "поверхностный дефект" и "сквозной дефект".

Изображение, образованное пенетрантом в месте расположения не сплошности и подобное форме сечения у выхода на поверхность объекта контроля, называют индикаторным рисунком (след). Применительно к не сплошности типа единичной трещины вместо термина "индикаторный рисунок" допускается применение термина "индикаторный след".

Глубина не сплошности - размер не сплошности в направлении внутрь объекта контроля от его поверхности. Длина несплошности - продольный размер несплошности на поверхности объекта. Раскрытие несплошности - поперечный размер несплошности у ее выхода на поверхность объекта контроля.

Необходимым условием выявления дефектов капиллярным контролем является относительная их не загрязненность посторонними веществами.

Следует различать максимальную, минимальную и среднюю глубину, длину и раскрытие несплошности. Если не требуется заранее оговаривать, какое из указанных значений размеров имеется в виду, то для исключения недоразумений следует принять термин "преимущественный размер". Для несплошностей типа округлых пор раскрытие равно диаметру несплошности на поверхности объекта.

Все методы капиллярного неразрушающего контроля по характеру взаимодействия проникающих пенетрантов с объектом контроля рассматриваются как молекулярные.

Капиллярные методы подразделяют на основные, использующие капиллярные явления, и комбинированные.

Основные капиллярные методы контроля подразделяют в зависимости от типа проникающего вещества на следующие:

1. Метод проникающих растворов - жидкостный метод капиллярного неразрушающего контроля, основанный на использовании в качестве проникающего вещества жидкого индикаторного раствора.

2. Метод фильтрующихся суспензий - жидкостный метод капиллярного неразрушающего контроля, основанный на использовании в качестве

жидкого проникающего вещества индикаторной суспензии, которая образует индикаторный рисунок из отфильтрованных частиц дисперсной фазы.

Капиллярные методы в зависимости от способа выявления индикаторного рисунка подразделяют на:

-люминесцентный, основанный на регистрации контраста люминесцирующего в длинноволновом ультрафиолетовом излучении видимого индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля,

-цветной, основанный на регистрации контраста цветного в видимом излучении индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля;

-люминесцентно-цветной, основанный на регистрации контраста цветного или люминесцирующего индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля в видимом или длинноволновом ультрафиолетовом излучении;

-яркостный, основанный на регистрации контраста в видимом излучении ахроматического рисунка на фоне поверхности объекта контроля. Комбинированные методы капиллярного неразрушающего контроля сочетают два или более различных по физической сущности методов неразрушающего контроля, один из которых обязательно жидкостный.

Комбинированные капиллярные методы контроля подразделяют в зависимости от характера физических полей (излучений) и особенностей их взаимодействия с контролируемым объектом.

Капиллярно-электростатический метод основан на обнаружении индикаторного рисунка, образованного скоплением электрически заряженных частиц у поверхностной или сквозной несплошности неэлектропроводящего объекта, заполненного ионогеннымпенетрантом.

Капиллярно-электроиндуктивный метод основан на электроиндуктивном обнаружении электропроводящего индикаторного пенетрантав поверхностных и сквозных несплошностях неэлектропроводящего объекта.

Капиллярно-магнитопорошковый метод основан на обнаружении комплексного индикаторного рисунка, образованного пенетрантом и ферромагнитным порошком, при контроле намагниченного объекта.

Жидкостный капиллярно-радиационный метод излучения основан на регистрации ионизирующего излучения соответствующего пенетрантав поверхностных и сквозных несплошностях объекта контроля.

7.3 Оптический неразрушающий контроль

Оптический неразрушающий контроль (ОНК) основан на анализе взаимодействия оптического излучения (ОИ) с объектом контроля (ОК).

Оптическое излучение или свет - электромагнитное излучение с длиной волны 10^{-3} - 10^{3} мкм, в котором принято выделять ультрафиолетовую (УФ), видимую и инфракрасную (ИК) области спектра с длинами волн соответственно 10^{-3} ... 0,38; 0,38 ... 0,78 и 0,78 ... 10^{3} мкм.

Возникновение ОИ связано с движением электрически заряженных частиц (электроны, атомы, ионы, молекулы). Дискретные спонтанные или индуцированные переходы носителей зарядов с более высоких на более низкие уровни энергии сопровождаются испусканием световых квантов (фотонов) с энергией, равной разности энергий этих уровней. Энергия фотона E=hv, где h = 6,626 · 10^{-34} Дж · с- постоянная Планка; v - частота излучения, Гц.

Скорость распространения ОИ в вакууме $c_0 = 299792,5$ *км/с*. В реальных средах ОИ распространяется со скоростью $V = C_Q/n = \lambda_0$, $v/n = \lambda v$, где $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$- показатель преломления среды; ε и μ - относительные диэлектрические проницаемости среды; λ_0 и λ, - длина волны света в вакууме и среде соответственно.

Информационными параметрами ОИ являются пространственно-временные распределения его амплитуды, частоты, фазы, поляризации и степени когерентности. Для получения дефектоскопической информации используют изменение этих параметров при взаимодействии ОИ с ОК в соответствии с явлениями интерференции, дифракции, поляризации, преломления, отражения, поглощения, рассеяния, дисперсии света, а также изменение характеристик самого ОК под действием света в результате эффектов фотопроводимости, фотохромизма, люминесценции, электрооптических, механооптических (фотоупругость), магнитооптических, акустооптических и других явлений.

Основными информационными параметрами объектов оптического контроля являются их спектральные и интегральные фотометрические характеристики, которые в общем случае зависят от строения вещества, его температуры, физического (агрегатного) состояния, микрорельефа, угла падения излучения, степени его поляризации, длины волны.

К числу дефектов, обнаруживаемых неразрушающими оптическими методами, относятся пустоты (нарушения сплошности), расслоения, поры, трещины, включения инородных тел, внутренние напряжения, изменение структуры материалов и их физико-химических свойств, отклонения от заданной геометрической формы и т.д.

С помощью оптических методов внутренние дефекты выявляются только в изделиях из материалов, прозрачных в оптической области спектра.

Использование оптического излучения как носителя информации перспективно. Электромагнитное поле по природе многомерно, что позволяет вести многоканальную (многомерную) обработку информации одним устройством с большой скоростью, определяемой скоростью света в данной среде.

Особенно перспективно использование резонансных эффектов взаимодействия ОИ с ОК, в том числе нелинейных, основанных на использовании сверхмощного лазерного излучения.

Основной характеристикой ОИ является поток излучения (мощность светового потока)

$$\Phi = dQ/dt, \qquad (7.1)$$

где Q — энергия, Дж; t — время, с.

Пространственные характеристики ОИ описываются силой излучения $I = d\Phi/d\omega$(Вт/ср) (лучистый поток в единице телесного угла $d\omega$) и лучистостью $L = dI/dS\cos\alpha$ (Вт/ср · м^2) (отношение силы излучения в направлении α к проекции излучающей поверхности dS на плоскость, нормальную этому направлению) и формой индикатрисе этих величин. Важной характеристикой является плотность лучистого потока по облучаемой поверхности $E = d\Phi/dS$(Вт/м^2), где dS — площадь облучаемого элемента.

В видимой области спектра применяют систему световых единиц, соответствующую зрительному ощущению лучистых потоков с учетом спектральной чувствительности глаза. Единицей светового потока является люмен (*1 лм = 1/683 Вт* для *λ - 0,55 мкм*), сила света измеряется в канделах (кд), освещенность *Е*- в люксах (лк), яркость - *кд/м^2 (1кд = лм/ ср, 1лк = 1лм/м^2)*.

Эффективность применения ОНК существенно зависит от правильности выбора геометрических, спектральных, светотехнических и временных характеристик условий освещения и наблюдения ОК. Главное при этом - обеспечить максимальный контраст дефекта подбором углов освещения и наблюдения, спектра и интенсивности источника (непрерывного или стробоскопического), а также состояния поляризации и степени когерентности света. Необходимо учитывать различия оптических свойств дефекта и окружающей его области фона. Контраст определяют по формуле

$$k=(B_0 - B_ф)/(B_0 + Б_ф), \qquad (7.2)$$

где B_0 и $B_ф$ — яркости объекта в областях дефекта и фона.

Аналитический расчет контраста дефектов в зависимости от описанных выше факторов представляет сложную задачу, решение которой получено пока только для простейших случаев. Поэтому необходимы экспериментальные спектрогонио-фотометрические и поляризационные исследования оптических свойств ОК и его дефектов.

Основные области применения: контроль двупреломления и других характеристик полупроводниковых материалов, контроль геометрии полупроводниковых структур (эллипсометрия). Контроль качества печатных плат на телевизионных и оптических проекторах, контроль геометрии фотошаблонов и др.

7.4 Магнитный вид неразрушающего контроля

Магнитный вид неразрушающего контроля применяют в основном для контроля изделий из ферромагнитных материалов, т.е. из материалов, которые способны существенно изменять свои магнитные характеристики под воздействием внешнего (намагничивающего) магнитного поля. Операция намагничивания (помещения изделия в магнитное поле) при этом виде контроля является обязательной. Съем информации может быть осуществлен с полного сечения образца (изделия) либо с его поверхности.

В зависимости от конкретных задач неразрушающего контроля, марки контролируемого материала, требуемой производительности метода могут использоваться те или иные первичные информативные параметры. К числу наиболее распространенных относятся следующие информативные параметры: коэрцитивная сила, намагниченность, индукция (остаточная индукция), магнитная проницаемость, напряженность, эффект Баркгаузена.

По способу получения первичной информации различают следующие методы магнитного вида контроля:

-магнитопорошковый (МП),
-магнитографический (МГ),
-феррозондовый (ФЗ),
-эффекта Холла (ЭХ),
-индукционный (И),
-пондеромоторный (ПМ),
-магниторезисторный (МР).

Из перечисленных методов только магнитопорошковый требует обязательного участия в контрольных операциях человека; остальные методы позволяют получать первичную информацию в виде электрических сигналов, что делает возможным полную автоматизацию процессов контроля. Методы МП и МГ обнаружения несплошностей являются контактными, т.е. требуют соприкосновения преобразователя (магнитный порошок или магнитная лента) с поверхностью изделия; при остальных методах контроля съем информации осуществляется бесконтактно (хотя и на достаточно близких расстояниях от поверхности).

С их помощью можно осуществить контроль:

-сплошности (методами дефектоскопии) (МП, МГ, ФЗ, ЭХ, И); размеров (ФЗ, ЭХ, И, ПМ);

-структуры и механических свойств (ФЗ, ЭХ, И).

С помощью магнитных методов могут быть выявлены закалочные и шлифовочные трещины, волосовины, закаты, усталостные трещины и другие поверхностные дефекты шириной раскрытия несколько микрометров. Такие методы, как ФЗ, ЭХ, И, МГ можно использовать на грубых поверхностях, при этом минимальная глубина выявляемых дефектов составляет трехкратную высоту шероховатостей поверхности. В связи с необходимостью сканировать поверхность изделия методы ФЗ, ЭХ особенно

удобно применять для контроля цилиндрических изделий. Метод МГ успешно применяют для контроля сварных швов.

Из геометрических параметров с помощью магнитных методов наиболее часто определяют толщину немагнитных покрытий на магнитной основе, толщину стенок изделий из магнитных и немагнитных материалов.

Рекомендованная литература: [7]

Контрольные вопросы

1. Для чего и где применяются физические методы неразрушающего контроля?

2.Перечислите наиболее распространенные физические методы контроля?

3. На чем основан вихретокового метод контроля?

4.Принцип взаимного расположения измерительного вихревого преобразователя (ВТП) и объекта.

8 Физические методы контроля в технической диагностике

8 Методы контроля в технической диагностике
8.1 Акустические методы контроля
8.2 Радиоволновые методы неразрушающего контроля
8.3 Тепловой неразрушающий контроль
8.3.1 Средства контроля температуры
8.3.2 Бесконтактные методы термометрии

8 Методы контроля в технической диагностике

8.1 Акустические методы контроля

Для акустического метода НК применяют колебания ультразвукового и звукового диапазонов частотой от 50 Гц до 50 МГц. Интенсивность колебаний обычно невелика, не превышает 1 кВт/м^2. Такие колебания происходят в области упругих деформаций среды, где напряжения и деформации связаны пропорциональной зависимостью (область линейной акустики).

Амплитуда акустических волн в жидкостях и газах характеризуется одним из следующих параметров:

- акустическим давлением (Па) или изменением давления относительно среднего значения давления в среде:

$$p = \rho \cdot c \cdot |v|, \tag{8.1}$$

где *c*-скорость распространения акустических волн; ρ – плотность среды;

- смещением в (м) частиц среды из положения равновесия в процессе колебательного движения;

- скоростью (м/с) колебательного движения частиц среды

$$v = \frac{\partial u}{\partial t}, \tag{8.2}$$

где *t* – время.

Известно много акустических методов неразрушающего контроля, которые применяются в нескольких вариантах. Классификация акустических методов показана на рисунке 1.1. Их делят на две большие группы - активные и пассивные методы.

Активные методы основаны на излучении и приеме упругих волн, пассивные - только на приеме волн, источником которых служит сам контролируемый объект.

Активные методы делят на методы прохождения, отражения, комбинированные (использующие как прохождение, так и отражение), импедансные и методы собственных частот.

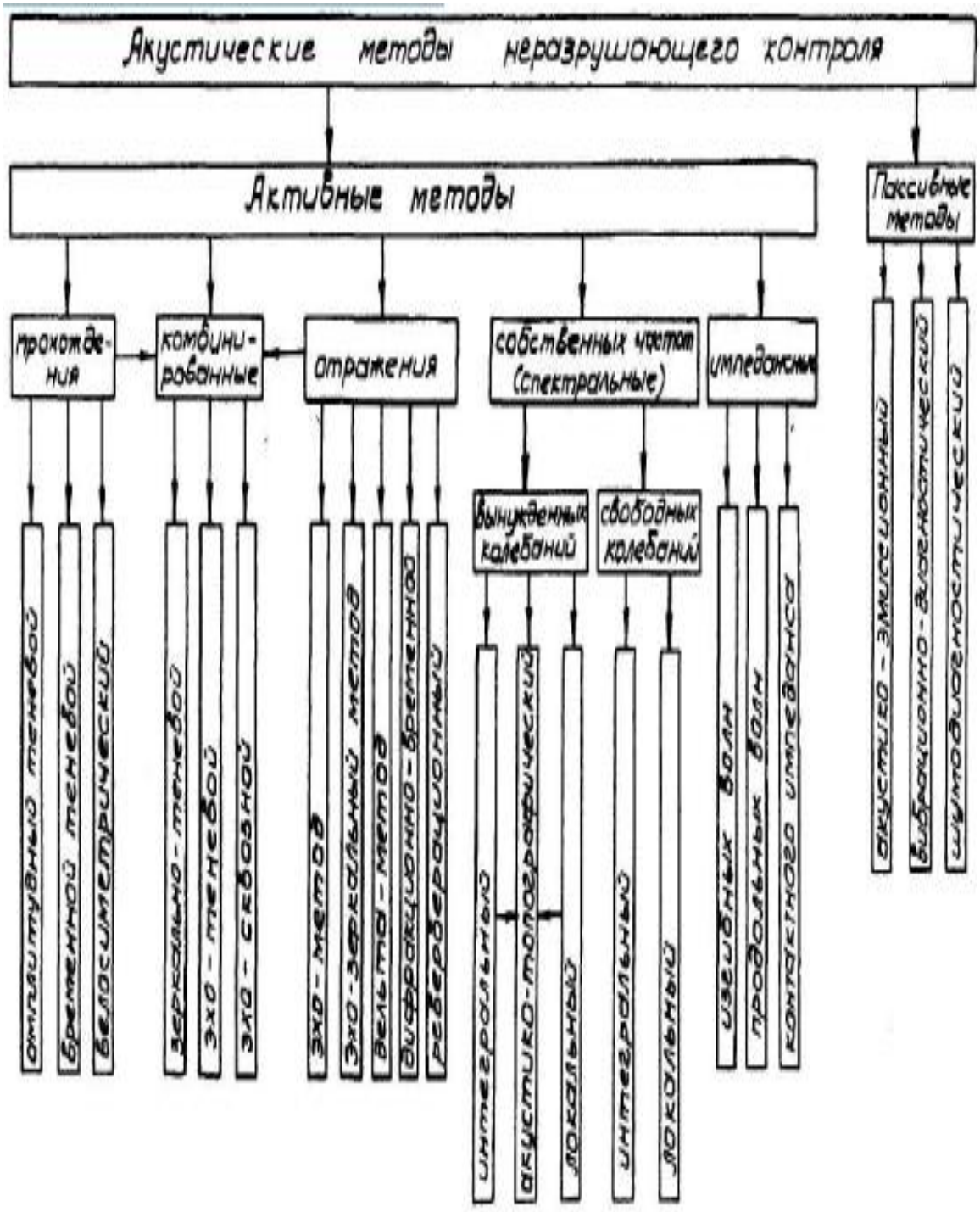


Рисунок 8.1 -Классификация акустических видов неразрушающего контроля

Методы прохождения используют излучающие и приемные преобразователи, расположенные по одну или разные стороны контролируемого изделия. Применяют импульсное или непрерывное (реже) излучение. Потом анализируют сигнал, прошедший через контролируемый объект.

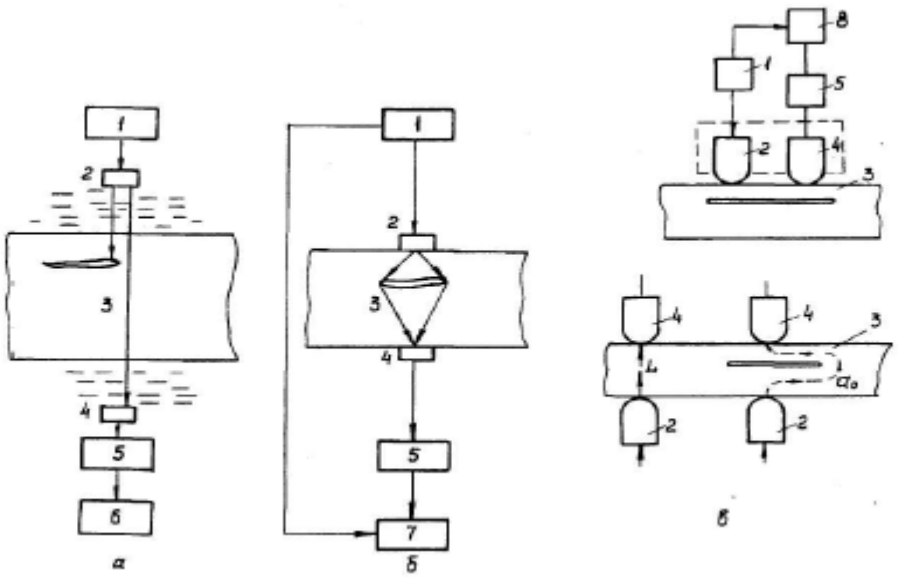


Рисунок 8.2- Методы прохождения

а- теневой; б – временной теневой; в – велосиметрический;

1 – генератор; 2 излучатель; 3 – объект контроля, 4 – приемник; 5 – усилитель, 6 – измеритель амплитуды; 7 – измеритель времени пробега; 8 – измеритель фазы

К методам прохождения относят:

амплитудный теневой метод, основанный на регистрации уменьшения амплитуды волны, прошедшей через контролируемый объект, вследствие наличия в нем дефекта (рисунок 8.2,а);

временной теневой метод, базирующийся на регистрации запаздывания импульса, вызванного увеличением его пути в изделии при огибании дефекта (рисунок 8.2, б). Тип волны при этом не меняется;

велосиметрический метод, основанный на регистрации изменения скорости распространения дисперсионных мод упругих волн в зоне дефекта и применяемый при одностороннем и двустороннем доступе к контролируемому объекту (рисунок 8.2, в). В этом методе обычно используют преобразователи с сухим точечным контактом. В варианте с односторонним доступом (рисунок 8.2, в вверху) скорость возбуждаемой излучателем антисимметричной волны нулевого порядка (a_0) в отделенном дефектом слое меньше, чем в бездефектной зоне. При двустороннем доступе (рисунок 8.2, в внизу) в бездефектной зоне энергия передается продольной волной *L,* в зоне дефекта - волнами a_0, которые проходят больший путь и распространяются с меньшими скоростями, чем продольная волна. Дефекты отмечаются по изменению фазы или увеличению времени прохождения (только в импульсном варианте) по контролируемому изделию.

В методах отражения применяют импульсное излучение. К этой подгруппе относят следующие методы дефектоскопии:

Эхо-метод (рисунок 8.3, а) основан на регистрации эхо-сигналов от дефекта. На экране индикатора обычно наблюдают посланный (зондирующий) импульс I, импульс III, отраженный от противоположной поверхности (дна) изделия (донный сигнал) и эхо-сигнал от дефекта II. Время прихода импульсов II и III пропорционально глубине залегания дефекта и толщине изделия. При совмещенной схеме контроля (рисунок 8.3,а) один и тот же преобразователь выполняет функции излучателя и приемника. Если эти функции выполняют разные преобразователи, то схему называют раздельной.

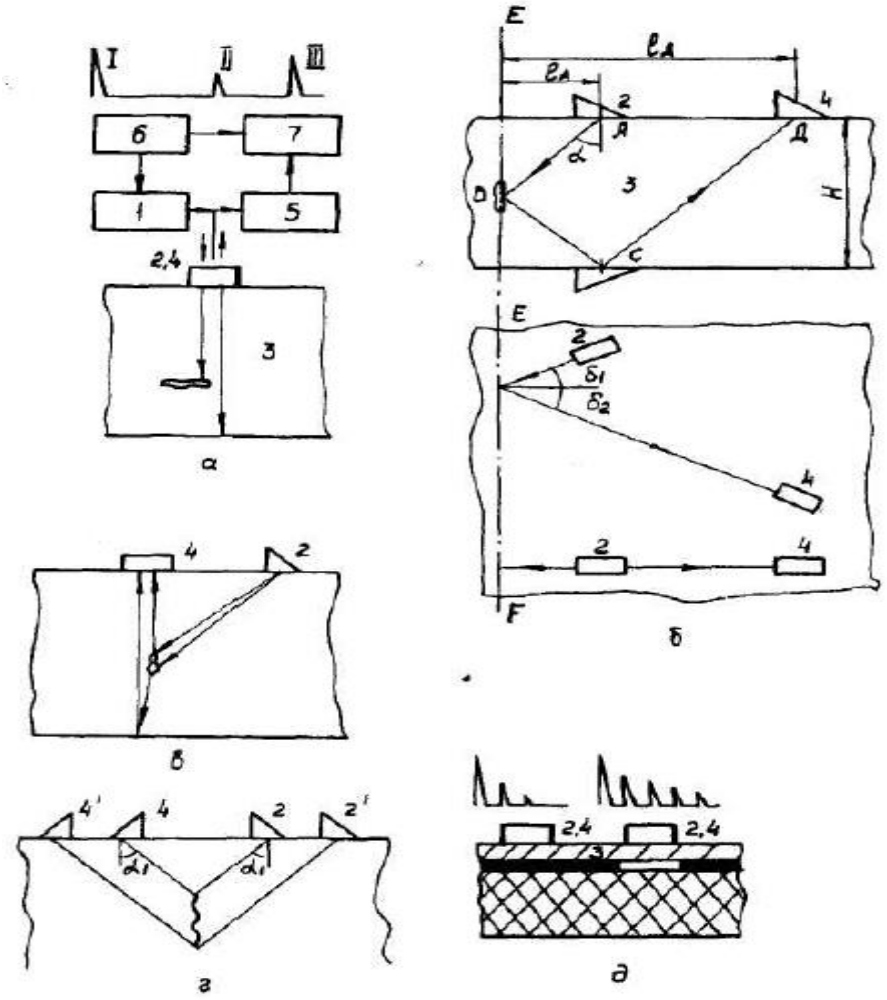


Рисунок 8.3- Методы отражения
а – эхо; б – эхо – зеркальный; в –дельта метод; г – дифракционно-временной; д – реверберационный;
1- генератор; 2 – излучатель; 3- объект контроля; 4- приемник; 5- усилитель; 6- синхронизатор; 7- индикатор.

Эхо-зеркальный метод основан на анализе сигналов, испытавших зеркальное отражение от донной поверхности изделия и дефекта, т.е. прошедших путь *АВСД* (рисунок 8.3, б). Вариант этого метода, рассчитанный на выявление вертикальных дефектов в плоскости EF, называют методом

тандем. Для его реализации при перемещении преобразователей *A* и *D* поддерживают постоянным значение $I_A + I_D = 2H\ tg\alpha$; для получения зеркального отражения от невертикальных дефектов, значение $I_A + I_D$ варьируют. Один из вариантов метода, называемый ***"косой тандем",*** предусматривает расположение излучателя и приемника не в одной плоскости (рисунок 8.3,б, вид в плане внизу), а в разных плоскостях, но таким образом, чтобы принимать зеркальное отражение от дефекта. Еще один вариант, называемый *К-метод,* предусматривает расположение преобразователей по разные стороны изделия, например, располагают приемник в точке С.

Дельта-метод (рисунок 8.3, в) основан на приеме преобразователем 4 расположенным над дефектом продольных волн, излученных преобразователем для поперечных волн 2, и рассеянных на дефекте.

Дифракционно - временной метод (рисунок 8.3,г), в котором излучатели 2 и 2′, приемники 4 и 4′ излучают и принимают либо продольные, либо поперечные волны, причем могут излучать и принимать разные типы волн. Преобразователи располагают так, чтобы получать максимумы эхо-сигналов волн, дифрагированных на концах дефекта. Измеряют амплитуды и время прихода сигналов от верхнего и нижнего концов дефекта.

Реверберационный метод (рисунок 8.3, д) использует влияние дефекта на время затухания многократно отраженных ультразвуковых импульсов в контролируемом объекте. Например, при контроле клееной конструкции с наружным металлическим слоем и внутренним полимерным слоем дефект соединения препятствует передаче энергии во внутренний слой, что увеличивает время затухания многократных эхо-сигналов во внешнем слое. Отражения импульсов в полимерном слое обычно отсутствуют вследствие большого затухания ультразвука в полимере.

В комбинированных методах используют принципы как прохождения, так и отражения акустических волн.

Зеркально-теневой метод основан на измерении амплитуды донного сигнала. В этом случае отраженный луч условно смещен в сторону (рисунок 8.4, а). По технике выполнения (фиксирует эхо-сигнал) его относят к методам отражения, а по физической сущности контроля (измеряют ослабление сигнала дважды прошедшего изделие в зоне дефекта) он близок к теневому методу.

Эхо-теневой метод основан на анализе как прошедших, так и отраженных волн (рисунок 8.4, б).

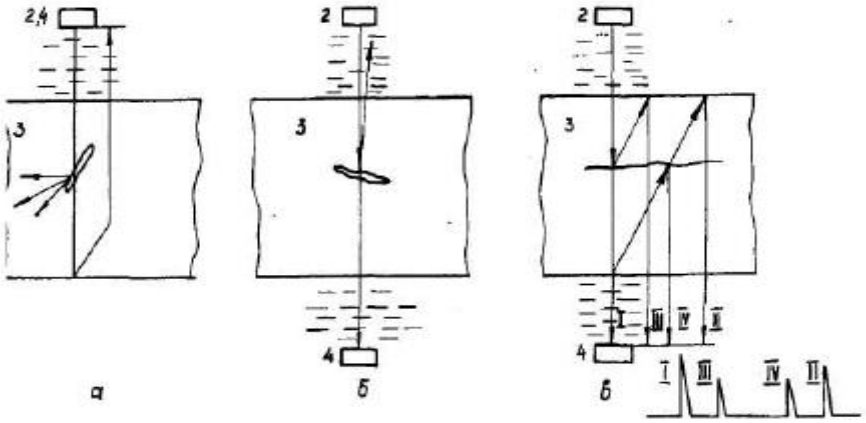


Рисунок 8.4- Комбинированные методы, использующие прохождение и отражение: а – зеркально-теневой; б – эхо-теневой; в – эхо- сквозной; 2 – излучатель; 4 – приемник; 3 – объект-контроля

В эхо-сквозном методе (рисунок 8.4,в) фиксируют сквозной сигнал I, сигнал II, испытавший двукратное отражение в изделии. В случае появления полупрозрачного дефекта фиксируют сигналы III и IV, соответствующие отражениям волн от дефекта и испытавших также отражение от верхней и нижней поверхностей изделия. Большой непрозрачный дефект обнаруживают по исчезновению или сильному уменьшению сигнала I, т.е. теневым методом, а также сигнала II. Полупрозрачные или небольшие дефекты обнаруживают по появлению сигналов III и IV, которые являются главными информационными сигналами.

Методы собственных частот основаны на измерении этих частот (или спектров) колебаний контролируемых объектов. Собственные частоты измеряют при возбуждении в изделиях как вынужденных, так и свободных колебаний. Свободные колебания обычно возбуждают механическим ударом, вынужденные - воздействием гармонической силы меняющейся частоты.

Различают *интегральные* и *локальные* методы. В интегральных методах анализируют собственные частоты изделия, колеблющегося как единое целое. В локальных методах колебания отдельных его участков.

В *методе собственных частот,* используют *вынужденные колебания. В интегральном методе* генератор 1 (рисунок 8.5,а) регулируемой частоты соединен с излучателем 2, возбуждающим упругие колебания (обычно продольные или изгибные) в контролируемом изделии 3. Приемник 4 преобразует принятые колебания в электрический сигнал, который усиливается усилителем 5 и поступает на индикатор резонанса 6. Регулируя частоту генератора 1, измеряют собственные частоты изделия 3. Диапазон применяемых частот до 500 кГц.

Локальный метод с использованием вынужденных колебаний известен как ультразвуковой резонансный метод. Его применяют в основном для измерения толщины. В стенке изделия 3 (рисунок 8.5,) с помощью преобразователей 2, 4 возбуждают упругие волны (обычно продольные)

непрерывно меняющейся частоты. Фиксируют частоты, на которых отмечаются резонансы системы преобразователь - изделие. По резонансным частотам определяют толщину стенки изделия и наличие в нем дефектов. Дефекты, параллельные поверхности, меняют измеряемую толщину, а расположенные под углом к поверхности - приводят к исчезновению резонансов. Диапазон применяемых частот - до нескольких мегагерц.

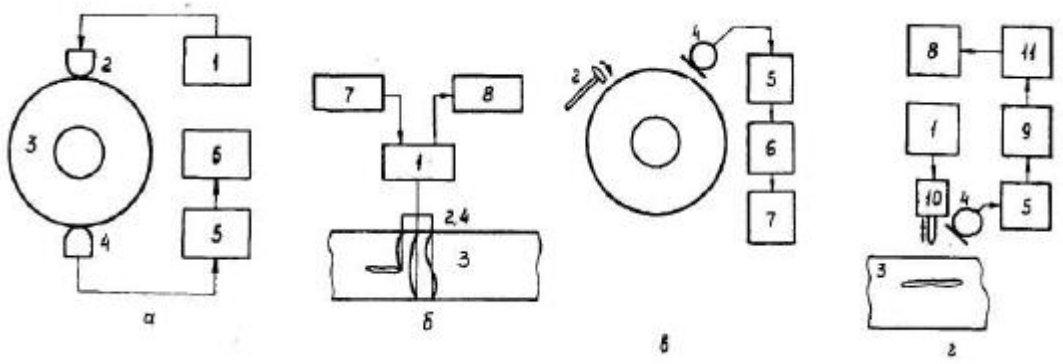


Рисунок 8.5- Методы собственных частот. Методы колебаний:
- вынужденных: а – интегральный; б – локальный;
- свободных: в – интегральный; г – локальный;
1- генератор непрерывных колебаний меняющийся частоты

В *интегральном методе* в изделии 3 (рисунок 8.5,в) ударом молотка 2 возбуждают свободно-затухающие колебания. Эти колебания принимают микрофоном 4, усиливают усилителем 5 и фильтруют полосовым фильтром 6, пропускающим только сигналы с частотами, соответствующими выбранной моде колебаний. Частоту измеряют частотомером 7. Признаком дефекта служит изменение (обычно снижение) частоты. Как правило, используют основные собственные частоты, не превышающие 15 кГц.

В локальном методе (рисунок 8.5, г) возбуждаемый генератором 1 вибратор 10 создает периодические удары по контролируемому изделию. Электрические сигналы с приемного микрофона 4 через усилитель 5 поступают на спектроанализатор 9. Выделенный последним спектр принятого сигнала обрабатывается решающим устройством 11, результат обработки появляется на индикаторе 8. Кроме микрофонов, применяют пьезоприемники. Дефекты регистрируют по изменению спектра принятого импульсного сигнала. В отличие от интегрального метода контроль выполняется путем сканирования изделий. Обычный диапазон рабочих частот от 0,3 до 20 кГц.

Акустико-топографический метод имеет признаки интегрального и локального методов. Он основан на возбуждении в изделии интенсивных изгибных колебаний непрерывно меняющейся частоты и регистрации распределения амплитуд колебаний с помощью наносимого на поверхность порошка. Упругие колебания возбуждают преобразователем, прижимаемым к сухому изделию. Преобразователь питают от мощного (порядка 0,4 кВт)

генератора непрерывно меняющейся частоты. Если собственная частота отделенной дефектом (расслоением, нарушением соединения) зоны попадает в диапазон возбуждаемых частот, колебания этой зоны усиливаются, покрывающий ее порошок смещается и концентрируется по границам дефектов, делая их видимыми. Диапазон используемых частот - от 40 до 150 кГц.

Импедансные методы используют зависимость импедансов изделий при их упругих колебаниях от параметров этих изделий и наличия в них дефектов. Обычно оценивают механический импеданс $Z = {}^{F}/_{v}$, где F и v - комплексные амплитуды возмущающей силы и колебательной скорости соответственно. В отличие от характеристического импеданса, являющегося параметром среды, механический импеданс характеризует конструкцию. В импедансных методах используют изгибные и продольные волны.

При использовании изгибных волн преобразователь стержневого типа (рисунок 8.6,а) содержит соединенный с генератором 1 излучающий 2 и приемный 4 пьезоэлементы. Через сухой точечный контакт преобразователь возбуждает в изделии 3 гармонические изгибные колебания. В зоне дефекта модуль Z механического импеданса $Z = |Z| \cdot e^{j\varphi}$ уменьшается и меняется его аргумент φ. Эти изменения регистрируются электронной аппаратурой. В импульсном варианте этого метода в системе преобразователь - изделие возбуждают импульсы свободно затухающих колебаний. Признаком дефекта служит уменьшение амплитуды и несущей частоты этих колебаний.

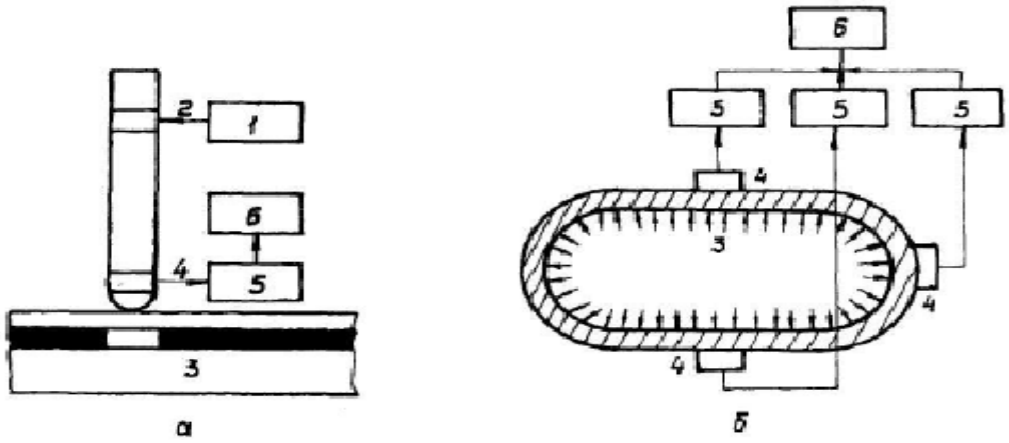


Рисунок 8.6-Методы контроля: а-импедансный; б- акустико-эмисионный;1-генератор; 2- излучатель; 3- объект контроля; 4- приемник; 5-усилитель; 6- блок обработки информации с индикатором

Кроме совмещенного преобразователя применяют раздельно-совмещенные преобразователи, имеющие в общем корпусе раздельные излучающий и приемный вибраторы. Эти преобразователи работают в импульсном режиме. При работе с совмещенными преобразователями

используют частоты до 8 кГц. Для раздельно-совмещенных используют импульсы с несущими частотами 15-35 кГц.

В другом варианте в контролируемой многослойной конструкции с помощью плоскогопьезо-преобразователя возбуждают продольные упругие волны фиксированной частоты. Дефекты регистрируют по изменению входного электрического импеданса $Z_э$ пьезо-преобразователя. Импеданс $Z_э$ определяется входным акустическим импедансом контролируемой конструкции, зависящим от наличия и глубины залегания дефектов в соединении между элементами. Изменения $Z_э$ представляют в виде точки на комплексной плоскости, положение которой зависит от характера дефекта. В отличие от методов, использующих изгибные волны, преобразователь контактирует с изделием через слой контактной смазки.

Метод контактного импеданса, применяемый для контроля твердости, основан на оценке механического импеданса зоны контакта алмазного индикатора стержневого преобразователя, прижимаемого к контролируемому объекту с постоянной силой. Уменьшение твердости увеличивает площадь контактной зоны, вызывая рост ее упругого механического импеданса, что отмечается по увеличению собственной частоты продольного колеблющегося преобразователя, однозначно связанной с измеряемой твердостью.

Пассивные акустические методы основаны на анализе упругих колебаний волн, возникающих в самом контролируемом объекте.

Наиболее характерным пассивным методом является акустико-эмиссионный метод (рисунок 8.6,6). Явление акустической эмиссии состоит в том, что упругие волны излучаются самим материалом в результате внутренней динамической локальной перестройки его структуры. Такие явления, как возникновение и развитие трещин под влиянием внешней нагрузки, аллотропические превращения при нагреве или охлаждении, движение скоплений дислокаций - наиболее характерные источники акустической эмиссии. Контактирующие с изделием пьезо-преобразователи принимают упругие волны и позволяют установить место их источника (дефекта).

Пассивными акустическими методами являются вибрационно-диагностическийи шумо-диагностический. При первом анализируют параметры вибраций какой-либо отдельной детали или узла с помощью приемников контактного типа. При втором - изучают спектр шумов работающего механизма, обычно с помощью микрофонных приемников.

По частотному признаку акустические методы делят на низкочастотные и высокочастотные. К первым относят колебания в звуковом и низкочастотном (до нескольких десятков кГц) ультразвуковом диапазонах частот. Ко вторым - колебания в высокочастотном ультразвуковом диапазоне частот: обычно от нескольких 100 кГц до 20 МГц. Высокочастотные методы обычно называют ультразвуковыми.

Области применения методов. Из рассмотренных акустических методов контроля наибольшее практическое применение находит эхо-метод. Около 90% объектов. Применяя различные типы волн, с его помощью решают задачи дефектоскопии поковок, отливок, сварных соединений, многих неметаллических материалов. Эхо-метод используют также для измерения размеров изделий. Измеряют время прихода донного сигнала и, зная скорость ультразвука в материале, определяют толщину изделия при одностороннем доступе. Если толщина изделия неизвестна, то по донному сигналу измеряют скорость, оценивают затухание ультразвука, а по ним определяют физико-механические свойства материалов.

Эхо-зеркальный метод применяют для выявления дефектов, ориентированных перпендикулярно поверхности ввода. При этом он обеспечивает более высокую чувствительность к таким дефектам, но требует, чтобы в зоне расположения дефектов был достаточно большой участок ровной поверхности. В рельсах, например, это требование не выполняется, поэтому там возможно применение только зеркально-теневого метода. Дефект может быть выявлен совмещенным наклонным преобразователем. Однако в этом случае зеркально-отраженная волна уходит в сторону и на преобразователь попадает лишь слабый рассеянный сигнал. Эхо-зеркальный метод используют для выявления вертикальных трещин и не проваров при контроле сварных соединений.

Дельта и дифракционно-временной методы также используют для получения дополнительной информации о дефектах при контроле сварных соединений.

Теневой метод применяют для контроля изделий с большим уровнем структурной реверберации, т.е. шумов, связанных с отражением ультразвука от неоднородностей, крупных зерен, дефектоскопии многослойных конструкций и изделий из слоистых пластиков, при исследовании физико-механических свойств материалов с большим затуханием и рассеянием акустических волн, например, при контроле прочности бетона по скорости ультразвука.

Локальный метод вынужденных колебаний применяют для измерения малых трещин при одностороннем доступе.

Интегральный метод свободных колебаний используют для проверки бандажей вагонных колес или стеклянной посуды "по чистоте звона" с субъективной оценкой результатов на слух. Метод с применением электронной аппаратуры и объективной количественной оценкой результатов применяют для контроля физико-механических свойств абразивных кругов, керамики и др. объектов.

Реверберационный, импедансный, велосимметрический, акустико-топографический методы и локальный метод свободных колебаний используют в основном для контроля многослойных конструкций. Реверберационным методом обнаруживают в основном нарушения соединений металлических слоев (обшивок) с металлическими или

неметаллическими силовыми элементами или наполнителями. Импедансным методом выявляют дефекты соединений в многослойных конструкциях из композиционных полимерных материалов и металлов, применяемых в различных сочетаниях. Велосимметрическим методом и локальным методом свободных колебаний контролируют в основном изделия из полимерных композиционных материалов. Акустико-топографический метод применяют для обнаружения дефектов преимущественно в металлических многослойных конструкциях (сотовые панели, биметаллы и т.п.).

Вибрационно-диагностический и шумо-диагностический методы служат для диагностики работающих механизмов. Метод акустической эмиссии применяют в качестве средства исследования материалов, конструкций, контроля изделий и диагностики во время эксплуатации. Его важными преимуществами перед другими методами контроля является то, что он реагирует только на развивающиеся, действительно опасные дефекты, а также возможность проверки больших участков или даже всего изделия без сканирования его преобразователем. Основной его недостаток как средства контроля - трудность выделения сигналов от развивающихся дефектов на фоне помех.

8.2 Радиоволновые методы неразрушающего контроля

При радиационном контроле используют, как минимум, три основных элемента (рисунок 8.7):

- источник ионизирующего излучения;
- контролируемый объект;
- детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию.

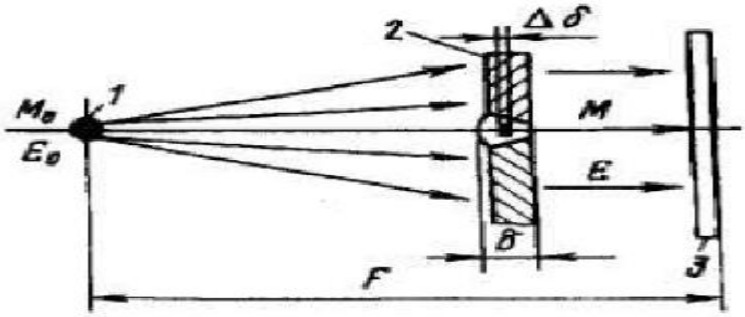


Рисунок 8.7- Схема просвечивания:
1- источник; 2 –изделие; 3- детектор

При прохождении через изделие ионизирующее излучение ослабляется - поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины δ и плотности ρ контролируемого объекта, а также от интенсивности M_0 и энергии E_0 излучения. При наличии в веществе внутренних дефектов размером $\Delta\delta$ изменяются интенсивность и энергия пучка излучения.

Методы радиационного контроля (рисунок 8.8) различаются способами детектирования дефектоскопической информации и соответственно делятся на радиографические, радиоскопические и радиометрические.

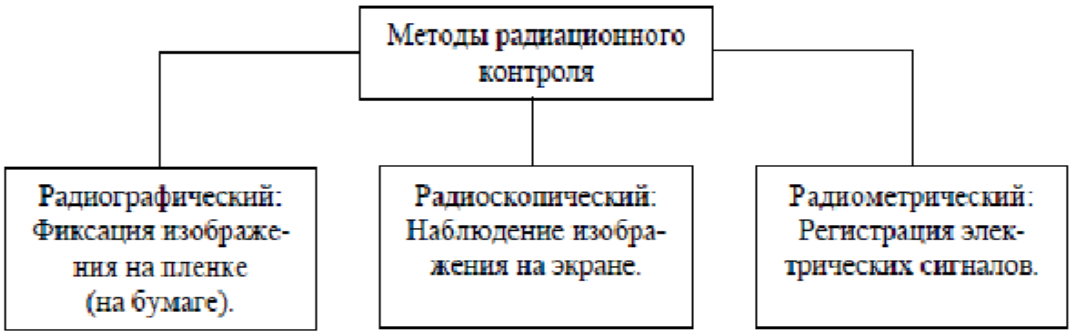


Рисунок 8.8- Методы радиационного контроля

Радиографические методы радиационного неразрушающего контроля основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и документным подтверждением получаемых результатов. В зависимости от используемых детекторов различают пленочную радиографию и ксерорадиографию (электрорадиографию). В первом случае детектором скрытого изображения и регистратором статического видимого изображения служит фоточувствительная пленка, во втором - полупроводниковая пластина, а в качестве регистратора используют обычную бумагу.

В зависимости от используемого излучения различают несколько разновидностей промышленной радиографии: рентгенографию, гаммаграфию, ускорительную и нейтронную радиографии. Каждый из перечисленных методов имеет свою сферу использования. Этими методами можно просвечивать стальные изделия толщиной от 1 до 700 мм.

Радиационная интроскопия - метод радиационного неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения проводится в процессе контроля.

Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются повышенная достоверность получаемых результатов благодаря возможности стетереоскопического видения дефектов и рассмотрения изделий под разными углами, "экспрессность" и непрерывность контроля.

Радиометрическая дефектоскопия - метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого

ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов (различной величины, длительности или количества).

Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи контроля и технологического процесса изготовления изделия. Преимуществом метода является возможность проведения непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высоким быстродействием применения аппаратуры. По чувствительности этот метод не уступает радиографии.

8.3 Тепловой неразрушающий контроль

В тепловых методах неразрушающего (ТНК) контроля в качестве пробной энергии используется тепловая энергия, распространяющаяся в объекте контроля. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые, в свою очередь, зависят от наличия внутренних или наружных дефектов. Под дефектом при этом понимается наличие скрытых раковин, полостей, трещин, непроваров, инородных включений и т.д., всевозможных отклонений физических свойств объекта от нормы, наличия мест локального перегрева (охлаждения) и т.п.

Различают пассивный и активный ТНК. При пассивном ТНК анализ тепловых полей изделий производят в процессе их естественного функционирования. Активный ТНК предполагает нагрев объекта внешним источником энергии.

Бесконтактные методы теплового контроля основаны на использовании инфракрасного излучения, испускаемого всеми нагретыми телами. Инфракрасное излучение занимает широкий диапазон длин волн от 0,76 до 1000 мкм. Спектр, мощность и пространственные характеристики этого излучения зависят от температуры тела и его излучательной способности, обусловленной в основном его материалом и микроструктурными характеристиками излучающей поверхности. Например, шероховатые поверхности излучают сильнее, чем зеркальные.

В зависимости от используемого излучения различают несколько разновидностей промышленной радиографии: рентгенографию, гаммаграфию, ускорительную и нейтронную радиографии. Каждый из перечисленных методов имеет свою сферу использования. Этими методами можно просвечивать стальные изделия толщиной от 1 до 700 мм.

Радиационная интроскопия - метод радиационного неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения проводится в процессе контроля.

Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются повышенная достоверность получаемых

результатов благодаря возможности стетереоскопического видения дефектов и рассмотрения изделий под разными углами, "экспрессность" и непрерывность контроля.

Радиометрическая дефектоскопия - метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов (различной величины, длительности или количества).

Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи контроля и технологического процесса изготовления изделия. Преимуществом метода является возможность проведения непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высоким быстродействием применения аппаратуры. По чувствительности этот метод не уступает радиографии.

При повышении температуры мощность излучения быстро растет, а ее максимум сдвигается в область более коротких длин волн. Спектр излучения может быть непрерывным или дискретным.

Характер спектра зависит в основном от агрегатного состояния вещества. Для твердых и жидких тел, как правило, характерны непрерывные спектры излучения, а для газообразных - линейчатые, которые при больших давлениях или большой толщине чаще переходят в непрерывные.

8.3.1 Средства контроля температуры

Волоконно-оптические термометры (ВОТ) - выполняются из кварцевого моноволокна диаметром 0,2 - 1 мм, длиной до 100 м, на торце которого, вводимого в контролируемый объем, располагается микрокапсула с веществом, изменяющим свои оптические свойства при нагреве (люминофор, жидкий кристалл, двупреломляющийся кристалл и т. д.). На другом конце располагаются источник света (обычно светодиод) и фотодиод для регистрации излучения, огражденного от капсулы термодатчика. Достоинство ВОТ - отсутствие гальванической связи с объектом, нечувствительность к электромагнитным помехам, нетоксичность, малые габариты, высокое быстродействие.

Действие термо-индикаторовосновано на изменении агрегатного состояния, яркости и цвета свечения некоторых веществ при нагреве. С их помощью можно быстро и экономично получить информацию о тепловом режиме объекта. Преимуществом термо-индикаторов является возможность запоминания распределения температур в процессе испытаний, простота и наглядность, экономичность. К недостаткам термо-индикаторов следует отнести инерционность, сравнительно невысокую точность, необходимость нанесения на изделие специальных покрытий, сложность изучения динамических температурных режимов. Включение их в системы терморегулирования представляет значительные трудности.

Термо-хромные термо-индикаторы с химическим взаимодействием компонентов (галоидные комплексные соли серебра, ртути, меди) могут вступать в реакцию с металлами, поэтому их наносят на ленты из ткани, бумаги, фольги и пр. Существуют обратимые (многократно меняющие цвет при нагреве) и необратимые термо-индикаторы.

Жидкокристаллические термо-индикаторы представляют собой органические соединения, одновременно обладающие свойствами жидкости (текучесть) и твердого кристаллического тела (анизотропия, двойное лучепреломление). При изменении температуры жидкий кристалл меняет свой цвет. Жидкие кристаллы эффективно используют при исследовании температур в электронных схемах для обнаружения дефектов типа нарушения сплошностей. Они выпускаются в виде пленок и жидких растворов.

Плавящиеся термо-индикаторы существуют двух типов: плавкие покрытия и термосвидетели. Покрытия выпускают в виде термокарандашей (мелков), термолаков, термотаблеток (термопорошков). Изготовляются на основе воска, стеарина, парафина или соединений серы, цинка, свинца (для высоких температур). На поверхности изделия термокарандашом наносят риску, которая плавится при достижении заданной температуры. Действие термолаков аналогично. Термосвидетели представляют собой нанизанные на тугоплавкую проволоку пластинки из металлов, плавящихся при различных температурах.

Действие люминофорных термо-индикаторов основано на температурной зависимости цвета или интенсивности люминесценции некоторых веществ, например, сульфидов цинка и кадмия. Недостатком люминофорных индикаторов является необходимость точной стабилизации возбуждающего люминесценцию излучения (обычно ультрафиолетового).

Принцип действия изооптических термо-индикаторов (ИОТ) основан на эффекте Христиансена, заключающегося в рассеянии света смесью двух прозрачных сред (например, порошок стекла в глицерине). При совпадении этих показателей для какой-либо частоты света наблюдается селективное усиление направленного пропускания смеси. Зависимость дисперсионной характеристики некоторых органических жидкостей от температуры приводит к изменению цвета смеси в проходящем свете при ее нагреве. ИОТ выпускаются в виде тонкостенных стеклянных капсул.

8.3.2 Бесконтактные методы термометрии

Действие пирометров излучения основано на фотоэлектрической, визуальной и фотографической регистрации интенсивности теплового излучения нагретых тел, пропорционального их температуре. Пирометры обычно имеют объектив для фокусировки излучения на фотодетектор, светофильтры и блок электронной обработки сигнала. При контроле температуры объектов в труднодоступных полостях применяют пирометры в сочетании с волоконно-оптическимисветоводами. Калибровка пирометров

проводится по эталонным источникам [абсолютно черное тело (АЧТ), пирометрические лампы и т.д.].

Яркостными пирометрами измеряют спектральную яркость объекта на определенной длине волны, которая сравнивается с яркостью АЧТ. В качестве АЧТ используется спираль специальной лампы накаливания. Яркостные пирометры применяют для измерения высоких температур (св. 600°С), при которых тела начинают излучать в видимой области, а интенсивность излучения достаточна для его регистрации в узком спектральном диапазоне визуально или с помощью фотоприемников типа ФЭУ, фотодиода.

Цветовыми пирометрами измеряют интенсивность излучения объекта в двух узких зонах спектра, отношение которых сравнивается с соответствующим отношением для АЧТ. Показания цветовых пирометров не зависят от коэффициента излучения объектов.

Радиационные пирометры, работающие в широком спектральном диапазоне, используют для измерения температуры слабонагретых тел.

Применяют объективы из материалов, прозрачных в соответствующей спектральной области. Стекло используют для измерения температур от 900°С. Кварц применяют для регистрации температур более 400 °С. Объективы из фтористого лития или фтористого бария позволяют фиксировать температуры в диапазоне 20—500 °С. Часто используют также зеркальную оптику.

Существенное влияние на показания радиационного пирометра оказывает состояние поверхности контролируемого объекта, поскольку оно связано с его излучательной способностью.

Современные модели пирометров снабжаются микропроцессором, реализующим запоминание максимальной, средней и минимальной температур за время измерения, коррекцию излучательной способности, автокалибровку прибора и другие функции.

Рекомендованная литература: [7]

Контрольные вопросы

1.Методы контроля в технической диагностике.

2. Что применяют для акустического метода НК?

3.Классификация акустических видов неразрушающего контроля.

4.Области применения эхо-метода.

5. Какие элементы входят в радиоволновой метод неразрушающего контроля?

6. Перечислите методы радиационного контроля.

7. Виды тепловых методов неразрушающего контроля (ТНК).

8. Перечислите средства контроля температуры их свойства и принципы действия.

9. Что можно отнести к бесконтактным методам термометрии?

МОДУЛЬ 3. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И СВОЙСТВА НАПОЛЬНЫХ И БОРТОВЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

9 СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

9 Средства диагностирования объектов
9.1. Диагностика устройств контактной сети
9.1.1. Устройства контактной сети, подлежащие диагностированию и их повреждения
9.1.2. Измерение параметров контактной подвески
9.1.3. Средства диагностики устройств контактной сети

9 Средства диагностирования объектов

9.1 Диагностика устройств контактной сети

В настоящее время считают целесообразным контролировать следующие параметры системы «контактная сеть - токоприемник»:

- износ контактных проводов;
- нагрев проводов и токоведущих зажимов;
- высота контактных проводов над уровнем головки рельса;
- зигзаги и выносы контактных проводов;
- отрывы токоприемников;
- подбои (удары);
- углы наклона фиксаторов;
- разница в высотах подхватываемых проводов на сопряжениях и стрелках;
- статистическое и динамическое нажатия полоза токоприемника;
- наличие местного отжига контактного провода;
- состояние изоляторов;
- состояние искровых промежутков и диодных заземлений.

Контактные провода испытывают нагрузки, возникающие в процессе токосъема. С одной стороны, они приводят к износу проводов, с другой - сопровождаются старением проводов из-за отжига.

9.1.1 Устройства контактной сети, подлежащие диагностированию, и их повреждения

Аварийные режимы при токосъеме нередко приводят к пережогам проводов. Нагрев и отжиг провода при токосъеме зависит от многих причин: параметров токоприемника, амплитуды снимаемого тока, переходного сопротивления «провод - токоприемник». Доля пережогов в общем числе повреждений контактной сети на участках постоянного тока составляет 50 %,

переменного - 25 %. После замены медных токосъемных пластин токоприемников на угольные и керамические на отдельных участках число пережогов контактных проводов выросло в 3 раза.

Специфическая особенность контактных проводов в том, что кроме прочностных параметров, они характеризуются и геометрическими параметрами подвески. Для обеспечения качественного токосъема необходимо соблюдать геометрические параметры подвеса контактных проводов в плане и по высоте.

Контактные провода подвешивают зигзагом вдоль оси пути, чтобы выравнивать износ вставок полозов токоприемников. Увеличение зигзагов выше допустимой нормы приводит к сходу токоприемника и его повреждению. Однажды установленный зигзаг не сохраняет своего положения во времени. Причины: разрегулировка подвески, наклон опоры, смещение и просадка пути. Последствия: проскальзывание зажимов, смещение конструкций КС, изменение натяжения проводов.

Уклон контактных проводов оказывает существенное влияние на качество токосъема особенно при больших скоростях движения. Уклон со временем меняет свою величину, причем изменяется и знак уклона.

9.1.2 Измерение параметров контактной подвески

При ручном измерении контролируют точки местных износов: места установки зажимов, фиксаторов и т. д. При автоматическом измерении износ контролируется с некоторым шагом вдоль провода. Если шаг выбран достаточно большой, то возникает опасность пропуска точки местного износа. Если шаг небольшой, то снижается скорость измерения. Как обоснованно выбрать продольную разрешающую способность?

Для этого необходимо знать продольный профиль местного износа. Как показали исследования для конкретного случая, продольный профиль можно описать эмпирическим уравнением:

$$S=S_A - (8.64+7.38\ S_M)\ l^2, \qquad (9.1)$$

где S_A – абсолютный максимум местного износа, мм^2; S_M – превышение амплитудного значения над средним в прилежащих областях износом, мм^2; l-координата относительно вершины износа, м. Указанные величины поясняются на рисунке 9.1.

Уклон контактных проводов находится по формуле:

$$i_K=(h_K - h_{K+1})/l, \qquad (9.2)$$

где h_K – высота подвеса под k-той опорой, м; h_{K+1} – высота подвеса под следующей $(k+1)$-й опорой, м; l – длина пролета, м.

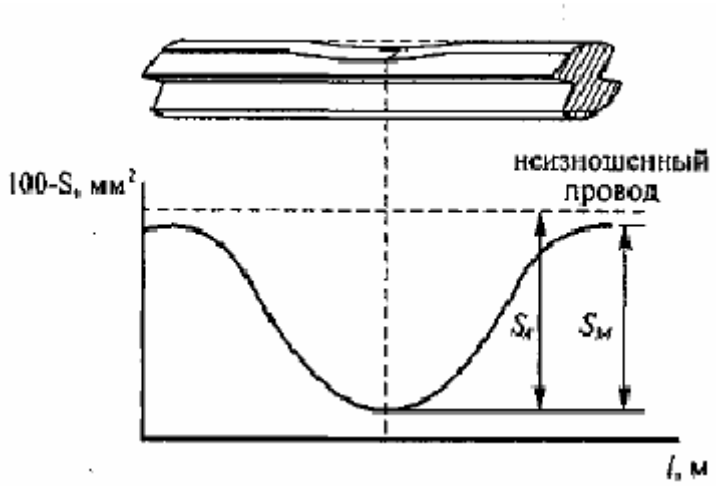


Рисунок 9.1- Продольный профиль местного износа контактного провода

Изменение температуры проводов подвесок приводит к непрерывному смещению проводов на стрелках. Особенно значительные перемещения наблюдают при сезонных колебаниях температуры. При взаимном перемещении проводов происходят защемления, особенно в крестовых ограничительных накладках, возникают перекосы струн, выворачивания зажимов и другие явления. Особую опасность представляет подъем одного из контактных проводов на стрелке. Перечисленные отклонения часто приводят к повреждениям токоприемников и контактной сети.

9.1.3 Средства диагностики устройств контактной сети

Часть указанных параметров контролируется аппаратурой вагона-лаборатории, другая - портативными устройствами диагностики.

Вагоны-лаборатории для испытаний контактной сети на отечественных дорогах начали широко применять с шестидесятых годов. Несмотря на непрерывное совершенствование, и сегодня они измеряют не все необходимые параметры. Наиболее распространен вагон-лаборатория образца ВИКС-76 и его модификации. Эти лаборатории контролируют:

- положение контактного провода относительно оси пути в плане (зигзаг и вынос) в пределах ±550 мм с интервалом 50 мм, точностью ±50 мм;
- высоту контактного провода, отжатого измерительным токоприемником, имеющим статической нажатие 140 Н, в пределах высоты 5500 ... 6800 мм с интервалом 50 мм и точностью ±50 мм;
- положение контактного провода отходящей ветви на воздушных стрелках ступенями 50, 100 и 150 мм ниже уровня рабочего провода.
- аппаратура вагона также фиксирует:
- уменьшение расстояния между контактным проводом и точкой крепления стержня фиксатора менее 80 мм;
- удары и подбои при прохождении токоприемника по жестким точкам;

- отрыв полоза токоприемника (только для контактной сети постоянного тока).

Аппаратура рассчитана на максимальную скорость движения вагона 160 км/ч. Номинальное напряжение питания аппаратуры - 50В постоянного тока и 220В переменного тока. Чтобы измерять напряжение контактной сети, установлен киловольтметр. Для связи с диспетчером и машинистом в вагоне установлена радиостанция ЖР-3М. На крыше вагона оборудована смотровая вышка для визуального наблюдения за состоянием контактной сети. В аппаратном зале вагона размещены камера высокого напряжения, пульт записи, шкафы аппаратуры, статистический преобразователь.

В камере высокого напряжения установлены блоки изолирующих реле (БИР). Гальваническая развязка осуществляется при помощи хлопчатобумажных нитей со специальной пропиткой. В перспективных проектах вагона предполагают использовать оптоволоконную оптику для гальванической развязки сигнальных цепей.

На крыше расположены два измерительных токоприемника, под вагоном - аккумуляторные батареи, генераторы, выпрямители, компрессор.

Положение контактных проводов в плане определяется при помощи электроконтактного датчика, показанного на рисунке 9.2.

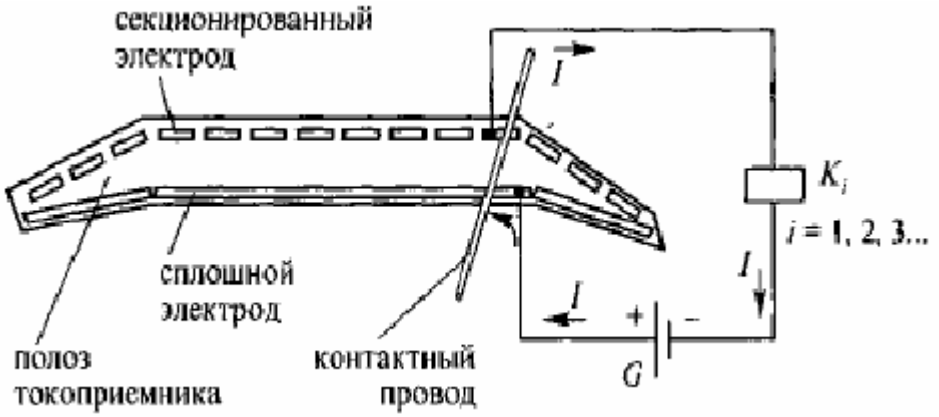


Рисунок 9.2- Электро-контактный датчик положения проводов в плане

На изолированной поверхности полоза токоприемника закреплены два электрода - один сплошной, другой - секционированный на участки (ламели). Шаг ламелей на горизонтальном участке полоза составляет 50 мм. Таким образом, все пространство возможных состояний (положений) контактного провода в горизонтальной плоскости разбито на 22 кванта (550 мм влево от оси полоза и 550 мм вправо). На боковых скосах полоза располагаются еще по три ламели, они предназначены для фиксирования случаев неудовлетворительного схода и подхвата отходящих ветвей подвески.

Датчик работает следующим образом. Контактный провод на полозе перекрывает и замыкает сплошной электрод с одной или несколькими ламелями. Тем самым создается цепь для протекания тока *I* от источника G через сплошной электрод, участок контактного провода, ламель к катушке

реле *Кі*. Реле срабатывает, чем и фиксируется положение провода в пространстве. Число реле равно числу ламелей.

Недостаток - нередкие случаи неудовлетворительной работы при сильных загрязнениях и дожде.

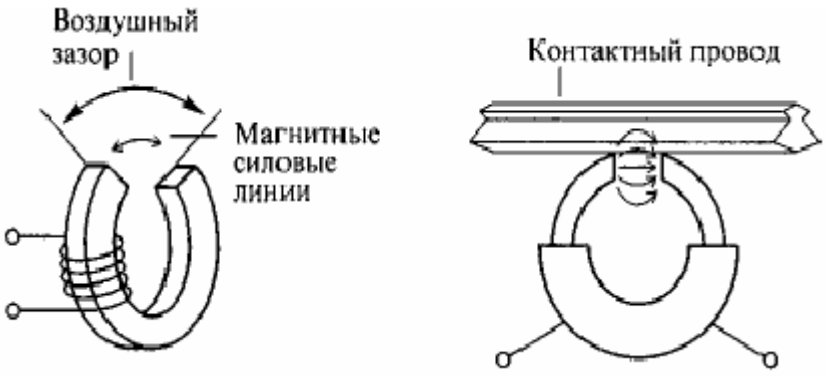


Рисунок 9.3- Индуктивный датчик положения проводов в плане

Существуют конструкции бесконтактных датчиков. Например, известно техническое решение с использованием индуктивных датчиков, размещаемых подполозом токоприемника. Каждый из них (рисунок 1.3) представляет собой катушку (или катушки) с незамкнутым магнитопроводом.

Катушка подсоединена к генератору тока заданной формы, амплитуды и частоты. Магнитные силовые линии в зазоре замыкаются через воздушный зазор. После появления над воздушным зазором контактного провода в нем возникают вихревые токи под воздействием магнитного поля катушки. Вихревые токи в проводе создают свое магнитное поле, которое искажает магнитное поле катушки датчика.

Вследствие этого изменяется комплексное сопротивление катушки, что может быть зафиксировано соответствующей аппаратурой. Число и размеры датчиков определяются шириной рабочей зоны полоза и требуемой разрешающей способностью.

Недостатки:

- первый заключается в температурной нестабильности всей аппаратуры и необходимости частой подстройки режимов при изменениях метеоусловий;

- второй состоит в трудностях борьбы с мощным электромагнитным полем контактной сети, которое вызывается тяговыми токами. Для подавления мешающего влияния применяют специальные фильтры и экранирование.

Кроме того, полоз с такими датчиками оказывается тяжелее и дороже обычного.

Оптические бесконтактные устройства. Их можно подразделить на две подгруппы. Датчики, принадлежащие к первой подгруппе, размещаются на

полозе токоприемника: это может быть линейка из фотоприемников с одним или несколькими осветителями (рисунок 9.4).

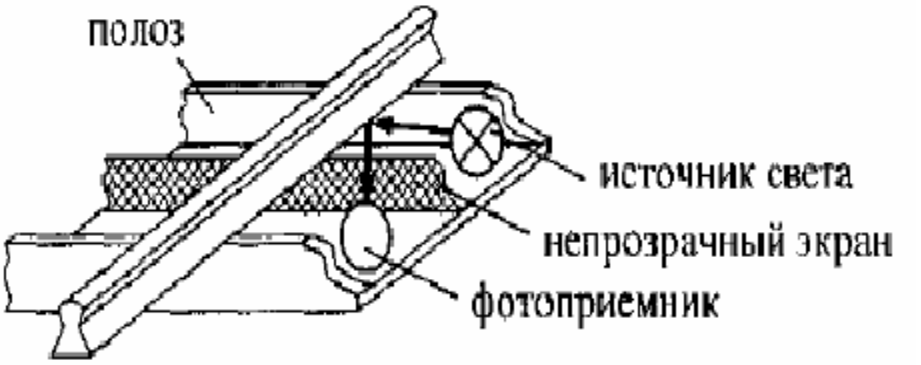


Рисунок 9.4- Оптический датчик положения проводов, размещаемый в полозе токоприемника

Свет от источника не может напрямую попасть на фотоприемник, этому препятствует непрозрачный экран. Только при наличии контактного провода свет отражается от него и попадает на соответствующий фотоприемник. Выходной сигнал фотоприемника меняет свое значение, что и фиксируется аппаратурой.

Недостатки: для того чтобы такой датчик работал в дневное время, приходится выбирать определенный диапазон длин волн излучателя и приемника, чаще всего инфракрасный, и остается проблема фонового излучения атмосферы и нагретых деталей самого полоза, датчик подвержен загрязнениям пылью и продуктами износа провода и накладок токоприемников.

Датчики, относящиеся ко второй группе, размещают на крыше вагона (рисунок 9.5).

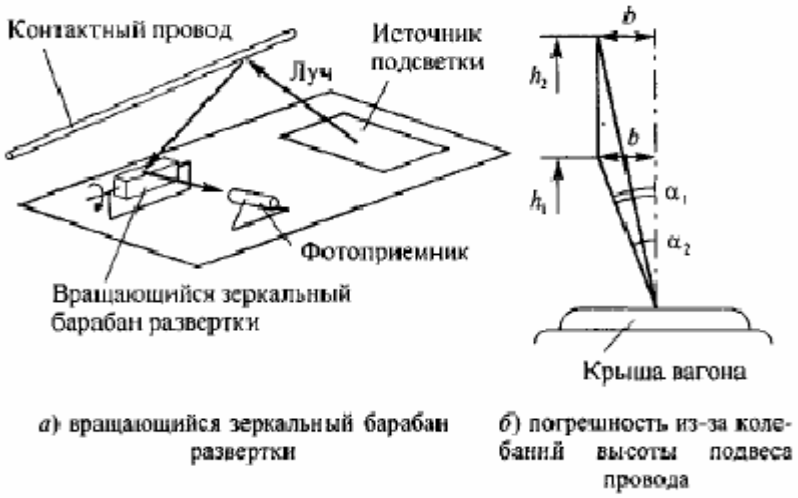
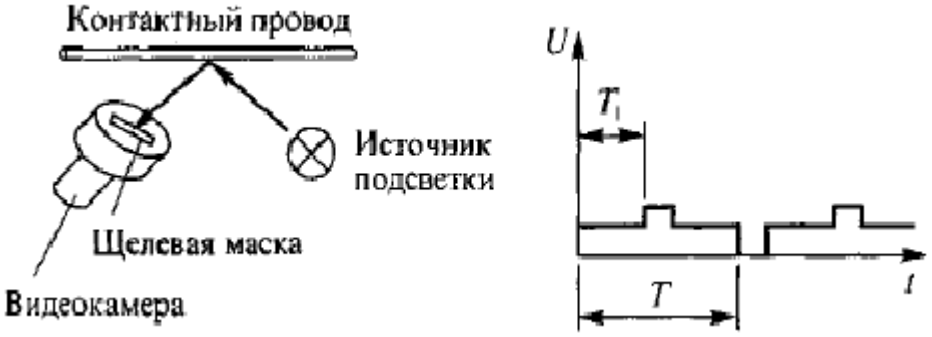


Рисунок 9.5- Оптический датчик положения проводов с зеркальной разверткой, размещенный на крыше вагона

От источника подсветки в сторону контактного провода направляется сплошной пучок лучей. Часть из них отражается от провода и попадает на вращающийся зеркальный барабан развертки. Благодаря вращению барабана в каждый конкретный момент времени на фотоприемник может попасть луч, отраженный от единственного, строго определенного пространственного местоположения провода. При повороте каждой гранью зеркальный барабан как бы пробегает или просматривает все возможное пространство состояний провода. Отраженный луч кратковременно попадает на фотоприемник тогда, когда угол поворота зеркала соответствует положению провода в пространстве. Следовательно, зная угол поворота зеркала в момент прихода отраженного луча, можно точно определить координату провода.

Еще один вариант предусматривает установку на крыше вагона приемной видеокамеры с щелевой маской с широкоугольным объективом (рисунок 9.6).



а) схема б) выходной сигнал

Рисунок 9.6- Видеокамера для контроля положения проводов

Благодаря электронной развертке значительно повышается надежность. Выходной сигнал после усиления имеет вид, показанный на рисунке 9.6,б: буквой Т обозначен период хода луча по всему приемному окну видеокамеры (по всему пространству состояний провода), буковой T_1 отмечено удаление в пространстве-времени отраженного сигнала от края окна видеокамеры. Импульс соответствует отраженному сигналу, далее луч доходит до края развертки Т и затем все повторяется. Измеряя величину промежутка времени T_1, зная скорость развертки и масштабные коэффициенты, можно достаточно точно определить положение провода в пространстве.

Для измерения высоты подвеса контактных проводов и их положения в плане можно использовать тепловизор в паре с источником инфракрасного излучения. В этом случае на экране тепловизора наблюдают «зайчик» инфракрасного излучения, отраженного от нижней поверхности провода. Зная все необходимые расстояния, можно путем геометрических вычислений рассчитать координаты положения проводов в пространстве.

Для определения положения контактного провода железнодорожного пути можно использовать ультразвуковой цифровой прибор "ДАЛЬ-2"(рисунок 9.7).

Рисунок 9.7- Ультразвуковой прибор «Даль-2»

Прибор позволяет с высокой точностью определить высоту контактного провода относительно плоскости головок рельсов и боковое смещение его относительно геометрической оси железнодорожного пути. Измерения проводятся без приближения к контактному проводу и без снятия напряжения.

Прибор имеет следующие характеристики:

- диапазон измерения, м – 3.5…12;
- погрешность измерения по высоте не более – 1%;
- погрешность измерения бокового смещения не более – 1%;
- габаритные размеры корпуса, мм – 200*90*70;
- масса, кг – 04;
- питание прибора – автономное, от четырех элементов R6-AA-UM3 (A316), В;
- температурный диапазон, ^{0}C - -10…+40.

Для измерения высоты h контактного провода прибор "Даль-2" следует положить на головку рельса рисунок 9.7. Чтобы определить боковое смещение (Δ) контактного провода, необходимо провести два измерения расстояния до контактного провода в точках, расположенных по одной линии на параллельно пролегающих рельсах. После этого прибор автоматически осуществляет расчёты и выводит значение бокового смещения контактного провода на дисплей.

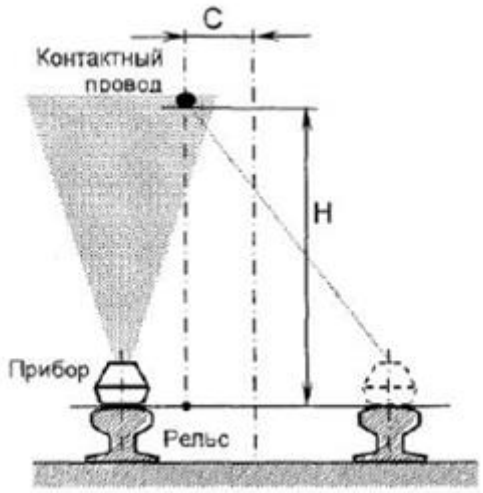
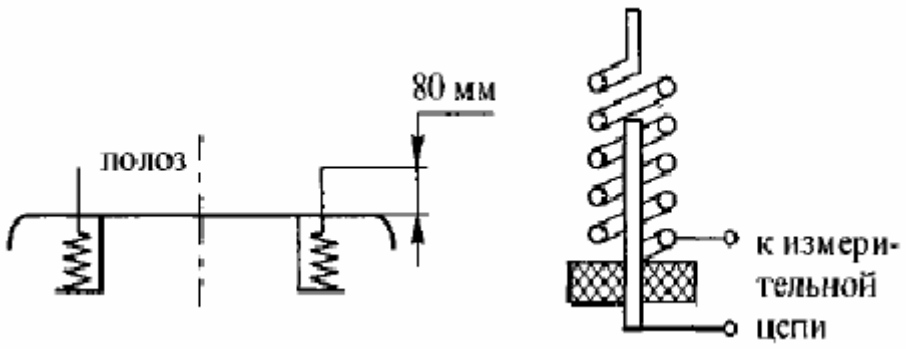


Рисунок 9.8- Схема измерения смещения контактного провода прибором «Даль -2»

Прибор "Даль-2" позволяет с высокой точностью определять параметры статического; расположения контактного провода не только у опоры, но и в любых точках железнодорожного пути.

В приборе "Даль-2" предусмотрены индикация температуры окружающего воздуха, напряжения источника питания, возможность повторного просмотра результатов измерений, автоматическое, отключение. Прибор "Даль-2" прост и удобен в эксплуатации, не требует настройки и позволяет за небольшой период времени обследовать значительные по протяженности участки железнодорожного пути.

Датчик фиксации мест подхвата отходящих ветвей подвески и негабаритных фиксаторов показан на рисунок 9.9. Высота части вертикального стержня пружины, выступающей над поверхностью полоза, составляет 80 мм.



а) размещение на полозе б) типовая конструкция

Рисунок 9.9-Датчик фиксации мест подхвата

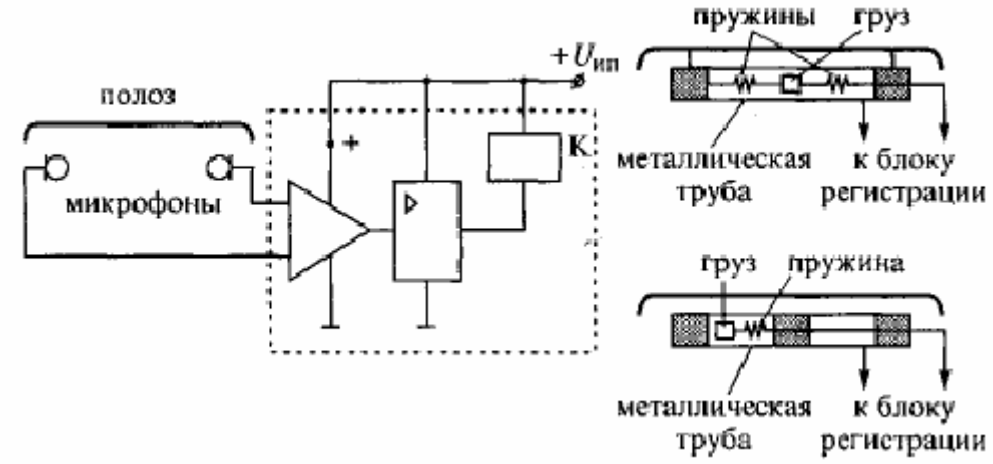
Если какой-либо элемент контактной сети оказывается в зоне нахождения датчика, то он задевает за стержень, изгибает пружину, которая

касается расположенного внутри нее стержня. Создается цепь тока, существующая в течение очень короткого промежутка времени.

Схема датчиков ударов показана на рисунке 9.10,а.

В типовом датчике под поверхностью полоза закреплены микрофоны, сигнал с которых поступает в блок регистрации. При ударе микрофоны преобразуют механическую энергию в электрическую, которая усиливается и сравнивается с заданным порогом. Если сигнал превышает пороговое значение, то реле К срабатывает и фиксирует удар. Сила удара зависит не только от степени дефектности подвески, но и от скорости движения вагона.

В схеме предусмотрено ступенчатое переключение порога чувствительности в зависимости от скорости движения вагона. Опыт эксплуатации выявил ненадежную работу устройства, и на некоторых вагонах для фиксации мест удара применяют упрощенные датчики. Груз, подвешенный на пружинах, при ударе смещается, касается стенок неизолированной трубы. Создается цепь тока, причем продолжительность импульса невелика. Для надежного срабатывания реле применяют схемы, аналогичные схемам фиксации датчиков подхвата.



а) типовая схема б) варианты модернизации

Рисунок 9.10- Датчик ударов

При неудовлетворительном токосъеме из-за уменьшения нажатия возможны отрывы токоприемника, для обнаружения мест отрывов на контактной сети постоянного тока применяют схему, показанную на рисунок 9.11. Принцип действия датчика отрывов основан на том, что катушка реле К обесточивается при отрыве полоза от провода. Резисторы R ... Rn служат для ограничения тока реле. К недостаткам устройства следует отнести низкое быстродействие и зависимость от напряжения в контактной сети.

Чтобы контролировать отрывы токоприемников и ухудшение контакта в процессе токосъема, используют датчики искрения. Устройство ДКИ состоит из двух блоков - приемного и измерителя рабочих высот контактного провода - оно размещается на крыше вагона-лаборатории, вцепленного непосредственно за локомотивом. Устройство позволяет регистрировать

искрение, возникающее в любое время суток (кроме случаев, когда солнце находится низко над горизонтом).

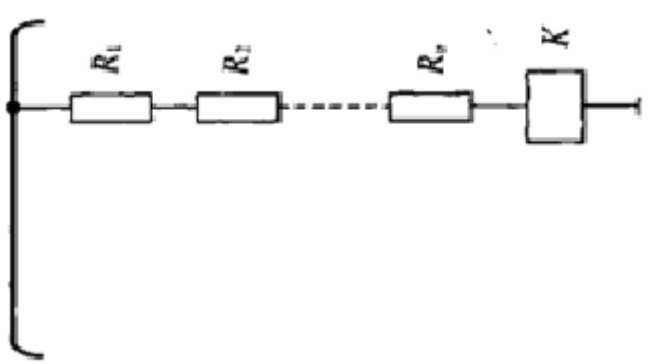


Рисунок 9.11- Датчик отрывов

Излучение дуги и искрения по световодам попадает на систему фотоприемников и усилителей, преобразуется в сигналы, отображаемые на цифровом индикаторе. Отстройка от фона происходит при помощи фильтров высокой частоты, которые пропускают только сигналы с частотой выше 1000 Гц. Чтобы обнаруживать устойчивые дефекты на контактной сети с вероятностью более 0,9, необходимо проанализировать результаты не менее четырех поездок по участку постоянного тока и не менее трех - по участку переменного тока.

Существует большое число датчиков нажатия, использующих тензометрические, индуктивные и другие преобразователи. Например, специалисты исследовательского института получили результаты измерений нажатия устройством, показанным на рисунке 9.12. Нужно отметить, что это устройство не учитывает влияние массы полоза на нажатие.

Рисунок 9.12- Схема измерения нажатия

Устройство для контроля износа должно быть устойчивыми к различным метеоусловиям, загрязнениям и нагрузкам.

Известные в настоящее время методы измерения износа могут быть объединены в две группы в зависимости от диагностируемого параметра:

- измерение по геометрическим размерам (рисунок 9.13, а, б, в);

- измерение по оставшейся массе металла (рисунок 9.13, г, д*)*.

По высоте оставшегося сечения износ измеряют микрометром, комплектом скоб, индикаторным прибором (рисунок 9.13, а). Точность измерений в большой степени зависит от правильности установки измерителя на провод. Нижняя поверхность площадки износа никогда не бывает ровной. Кроме наличия дефектов поверхностей, всегда имеется некоторый радиус кривизны, различный в разных точках. Возможно также наличие нескольких поверхностей износа, возникающих после поворота провода вокруг своей оси.

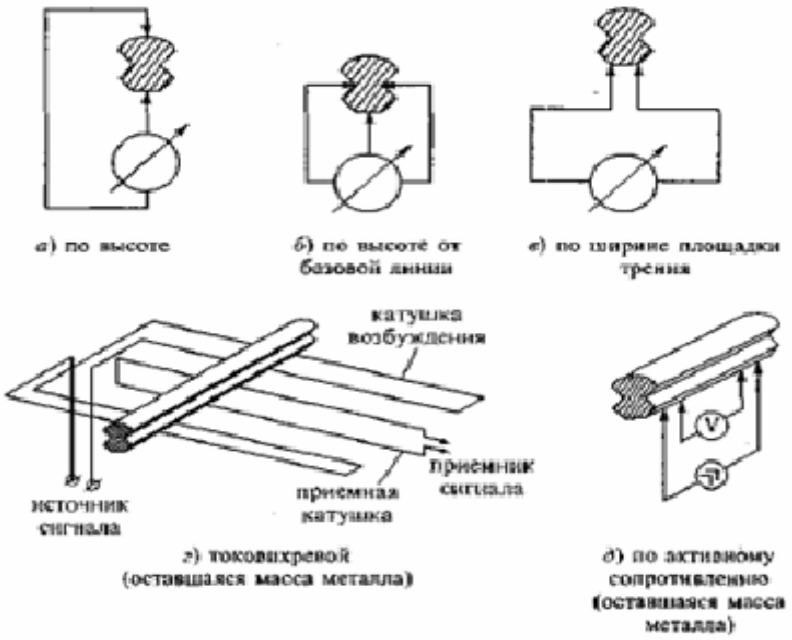


Рисунок 9.13- Методы измерения износа контактных проводов

Рисунок 9.14- Ультразвуковой толщиномер 37DLPIus

В настоящее время на железной дороге нашли применение следующие приборы, позволяющие определять толщину провода:

- ультразвуковой толщиномер 37DLPIus (рисунок 9.14);
- ультразвуковой толщиномер ТТ-300 (рисунок 9.15);
- ультразвуковой цифровой толщиномер ТТ-100 (рисунок 9.16).

Приборы предназначены для ручных измерений с изолированных вышек или площадок автодрезин. Принцип действия основан на измерении времени задержки эхо-импульса относительно момента излучения при прохождении его через провод (от нижней изношенной поверхности до верхней отражающей поверхности и обратно). Время задержки преобразуется в толщину.

Ультразвуковой толщиномер 37DLPIus позволяет измерять толщины от 0.08 до 635 мм при температурах воздуха от -10 до +50 ^{0}С. Время непрерывной работы в нормальном режиме без подсветки 25 часов. Вес 950 г. Позволяет вести статистическую обработку данных.

Рисунок 9.15- Ультразвуковой толщиномер ТТ-300

Рисунок 9.16- Ультразвуковой толщиномер ТТ-100

Толщиномер ТТ-300 имеет большой жидкокристаллический дисплей с регулируемой контрастностью и подсветкой. Он обладает высокой скоростью измерения с диапазоном от 0.75 до 300 мм. Рабочая температура от 0°С до +40°С. Вес, включая батареи - 370 г. Время работы прибора с одним комплектом батареек: без подсветки дисплея -200 часов или с подсветкой дисплея - 50 часов.

Ультразвуковой цифровой толщиномер ТТ-100 это полностью самокалибрующийся высокоточный прибор, измеряющий толщины изделий из металлов и их сплавов толщиной до 225 мм с шагом 0,1 мм. Прибор обладает жидкокристаллическим дисплеем, функцией памяти, возможностью

определения скорости звука в исследуемых материалах. Рабочий температурный диапазон до + 60°С.

Схема измерений *по высоте от базовой линии* представлена на рисунке 9.3,б. Устройство позволяющее проводить измерения по этому способу состоит из двух пар роликов (на рисунке 9.7), закрепленных на тележке и охватывающих провод. Оси роликов находятся под углом 40° по отношению друг к другу, ниже боковых углублений провода. Между роликами располагается датчик, тележка крепится на токосъемнике для перемещения за зигзагом провода. По мере износа провода датчик поднимается, сигнал преобразуется в напряжение, пропорциональное износу. Устройство имеет низкую скорость измерения из-за необходимости переставлять датчик в местах отхода ветвей подвески на анкеровку.

Метод измерения износа по ширине площадки трения (рисунок 9.3, в) является наиболее популярным при разработке устройств автоматической диагностики. Его преимущества заключаются в достаточности одностороннего доступа к проводу. Недостатки связаны с неидеальным качеством поверхности: неровностей, кривизны и загрязнения.

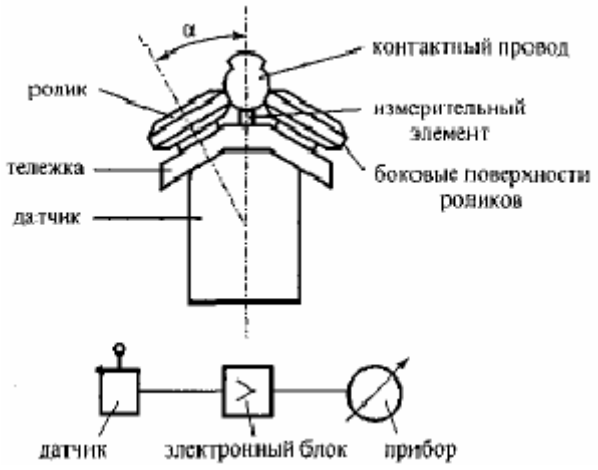


Рисунок 9.17 -Устройство измерения по высоте от базовой линии

Измерять износ одного контактного провода и суммарный износ двух проводов можно при помощи токовихревого датчика, принципиальная схема которого показана на рисунке 9.3,г. Принцип действия датчика основан на измерении магнитного потока, создаваемого катушкой, при внесении в магнитное поле контактного провода. Изменение потока вызывается вихревыми токами, возникающими в проводе. Значение ЭДС, наведенной в приемной катушке, пропорционально оставшейся массе провода.

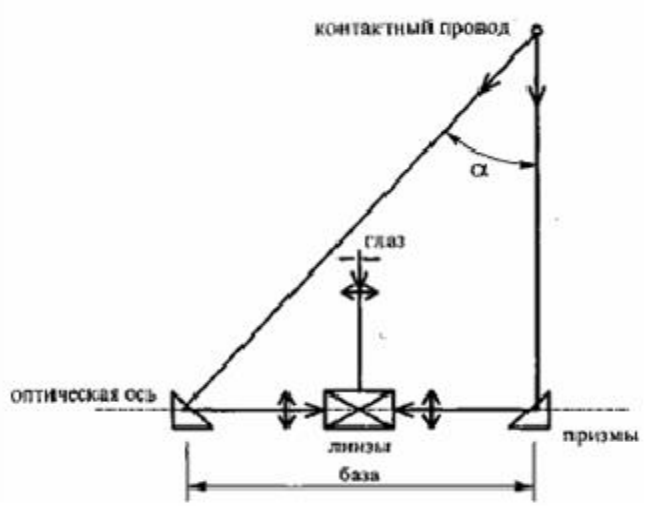


Рисунок 9.18- Оптический контрольположения проводов

Устройства, реагирующие на оставшуюся массу металла провода, (рисунок 9.3,д) работают на принципе измерения активного сопротивления участка провода по схеме четырех зажимов.

Провода и тросы. Положение в плане и по высоте может определяться оптическими методами. Устройство, содержащее оптическую систему, устанавливают на головки рельсов (рисунок 9.18).

Положение проводов в плане и по высоте определяется по углу и известной базе устройства. Погрешность измерений в плане составляет ±1 см, по высоте ±2 см. При измерениях необходимо учесть, что при движении подвижного состава путь проседает. Поэтому измеренные таким методом положения проводов не совпадут с измерениями вагона-лаборатории.

Для контроля натяжений проводов, тросов и оттяжек опор применяют методы, основанные на зависимости между натяжением в гибкой связи и ее прогибом поперечной силой (рисунок 9.19).

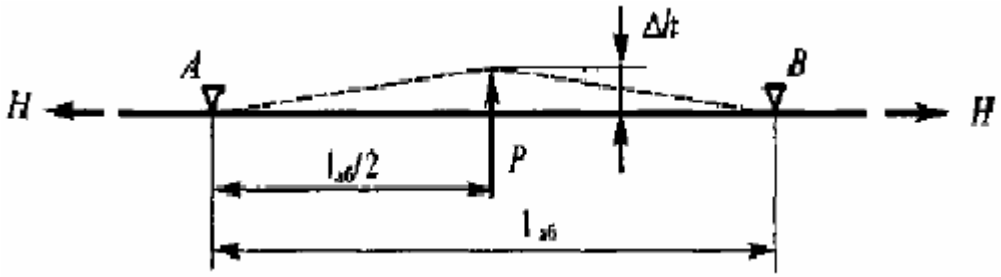


Рисунок 9.19 -Измерение натяжения

Натяжение контактного провода можно определить расчетом, если известны точные значения высоты его подвеса:

$$H = \frac{P \cdot l_{ab}}{4 \cdot \Delta h}$$

Аналогичные приборы разрабатывают и для контактной сети.

Провод располагается между ограничителями А, В, затем к нему прилагается поперечная сила Р. Прогиб провода $h\Delta$ под действием силы Р будет тем больше, чем меньше натяжение Н. Известны приборы типа ИТ-5 и ИТ-5М, применяемые для измерения натяжений 4 ... 50 кН в тросах диметром 15,5 ... 18,5 мм.

Рекомендованная литература: [4,6,7]

Контрольные вопросы

1.Дайте определение диагностики устройства контактной сети.

2.Как проводят измерение параметров контактной подвески?

3.Где размещают оптический датчик положения проводов, размещаемый в полозе токоприемника?

4.Принцип работы схемы измерения прибором «Даль -2»смещения контактного провода.

5. Принцип работы датчика фиксации мест подхвата.

6. Принцип работы схемы датчиков ударов.

7. Принцип работы устройства для контроля износа.

8. Принцип работы устройства измерения по высоте от базовой линии.

9. Принцип работы и методы измерения износа контактных проводов.

10. Принцип работы оптического контроля положения проводов.

10 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

10 Диагностика опор контактной сети
10.1. Основные повреждения опор контактной сети
10.2.Методы и средства диагностики опорных конструкций контактной сети
10.3 Диагностика подвесной изоляции и цепей заземления
10.3.1 Виды и причины повреждений изоляторов и цепей заземления
10.3.2 Методы и средства диагностики подвесной изоляции и цепей заземления

10 Диагностика опор контактной сети

10.1Основные повреждения опор контактной сети

Повреждения металлических опорных и поддерживающих конструкций подразделены на четыре основные группы:

- разрывы из-за механических перегрузок, вызванных ошибками проектирования и монтажа;
- деформации от наездов, ударов посторонними предметами;
- хрупкие разрушения при низких температурах, коробление и потеря несущей способности при повышенной температуре;
- разрушения из-за коррозии.

Повреждения железобетонных опорных конструкций:

- коррозия железобетона;
-электрокоррозионные повреждения, связанные с протеканием тока;
- механические повреждения (отслаивание бетона, сколы бетона с обнажением арматуры, появление сквозных отверстий в стенке опоры, перенагружение опоры).

10.2 Методы и средства диагностики опорных конструкций контактной сети

В настоящее время основную часть опорных конструкций контактной сети составляют железобетонные опоры и металлические опоры на железобетонных фундаментах. Рассмотрим диагностику железобетонных конструкций.

Различают два вида диагностики опор: диагностику надземной части и подземной части опор. По результатам диагностики надземной части проводится оценка несущей способности опор, изменение которой должно происходить вследствие старения бетона и уменьшения его прочностных характеристик. Диагностика подземной части опор проводится для оценки состояния проволочной арматуры и уровня снижения несущей способности при электрокоррозии арматуры.

В зависимости от рода тягового тока на электрифицированных участках необходимо проводить следующие виды диагностики:

- на участках переменного тока в основном должна проводиться диагностика надземной части. Диагностика подземной части может проводиться только в исключительных случаях, когда обнаружены коррозионные повреждения бетона в этой части;

- на участках постоянного тока обязательно следует проводить диагностику обеих частей опор: надземной и подземной.

Диагностика надземной части опор может проводиться в двух вариантах: она может быть выборочной или сплошной.

Выборочную диагностику осуществляют для установления несущей способности опор, у которых в процессе эксплуатации появились видимые разрушения в виде продольных трещин, выветривания поверхностного слоя, сетки мелких трещин и т.д., а также замечены прогибы консоли. В обязательном порядке рекомендуется проверять состояния анкерных опор и опор в кривых малого радиуса независимо от наличия на них повреждений. Первую выборочную диагностику необходимо проводить не позднее 3-х лет после сдачи участка в эксплуатацию. Последующая проверка должна проходить не реже одного раза в три года.

Сплошную диагностику надземной части следует проводить через 20 лет после начала эксплуатации участка. При сохранении тех же условий эксплуатации вторая сплошная диагностика проводится через 10 лет после первой. Последующие обследования назначаются индивидуально по каждому участку в зависимости от состояния опор с учетом данных предыдущих диагностирований.

Деградировавшие опоры выявляют несколькими способами. На первом этапе определяют места, где возможна коррозия. Для этого измеряют средние значения потенциалов «рельс - земля» и сопротивление опоры. Разделив потенциал на сопротивление, можно получить значение тока утечки, который бы протекал через арматуру. Таким способом выявляют потенциально опасные конструкции, с точки зрения электрокоррозии.

Но опасность электрокоррозии зависит не только от соотношения потенциала и сопротивления, но и от числа агрессивных ионов в почве, продолжительности существования потенциала и т. д. Более достоверна оценка опасности электрокоррозии при помощи интегрирующих датчиков. Интегрирующим датчиком называется электрохимическая ячейка стали в бетоне, погруженная в почву и способная пропустить ток.

Датчик представляет собой бетонный параллелепипед со сторонами 20 х 20 мм и длиной 150 мм с центрально армированным стальным стержнем, выступающим на 20мм над торцевой гранью и имеющий защитный слой у другой торцевой грани. Электрод изготавливается из проволоки такого же диаметра и класса, как и применим для изготовления опор. Перед установкой в почву устройство взвешивают с точностью до 0.01г. Число устанавливаемых интегрирующих датчиков электрокоррозии зависит от

профиля пути и измерения параметров грунта (в среднем через 1,5...2 км). Стальной стержень каждого датчика подключают к рельсам. По истечении заданного промежутка времени (3 – 4 месяца) датчики изымают и вновь взвешивают. По результатам начального взвешивания и взвешивания после электрохимического воздействия определяются потери металла и рассчитывается удельный вынос металла в г/дм^2 сутки для каждого датчика. На основе закона Фарадея рассчитывают электрокоррозионные диаграммы.

Для диагностирования степени электрокоррозии арматуры железобетонных опор применяют устройства АДО-2М, «Диакор», ИДА-2, прибор «ПК-1М».

При использовании прибора ПК-1М необходимо зачистить спуск (выше защитного устройства) и подошву рельса или стыковый соединитель. Затем необходимо соединить разъем прибора «Рельс» с помощью кабеля с рельсом, соединив рельсовый зажим с подошвой рельса или со стыковым соединителем. Далее необходимо соединить разъем прибора «Спуск» со спуском заземления опоры выше защитного устройства. Все подключения и зачистки проводить в диэлектрических перчатках. Далее включить питание прибора и произвести измерения. Измерения проводятся только при наличии нагрузки. Технические характеристики прибора: диапазон измеряемых потенциалов -250 - +250В; диапазон измеряемых сопротивлений 0 – 100кОм; точность измерения – 5%. Прибор содержит блок памяти для запоминания результатов обследования 1000 сопротивлений опор и 250 потенциальных диаграмм.

В АДО-2М использованы два метода - электрохимический и вибрационный. Электрохимический метод предназначен для оценки состояния высокопрочной проволочной арматуры предварительно напряженных опор. Методом можно установить, имеется или отсутствует коррозия стержней или анкерных болтов. При электрохимическом методе арматура опоры поляризуется от источника тока от 0 до 1,5 А в течение заданного промежутка времени (рисунке10.1). Затем источник тока отключают переключателем S2, и к арматуре подсоединяют вольтметр с диапазоном измерений ±1,99 В. По скорости уменьшения потенциала арматуры определяется степень коррозии.

Дело в том, что потенциал арматуры зависит от состояния ее поверхности, пассивная сталь сильно поляризуется.

Если поверхность арматуры имеет следы коррозии, то ее потенциал уменьшается. Арматура может быть предварительно поляризованной, поэтому для исключения погрешности измерения проводят дважды, меняя знак поляризации переключателем S1. Для измерения неизвестного потенциала один полюс вольтметра подключают к нулевому элементу (НЭ), который погружен в грунт. Нулевой элемент имеет известный постоянный потенциал.

Недостатком метода является необходимость подсоединения к арматуре, что сделать не всегда просто. Кроме того, ток поляризации должен

быть значительным, из-за чего источник питания АДО-2М имеет большую массу (8...10 кг).

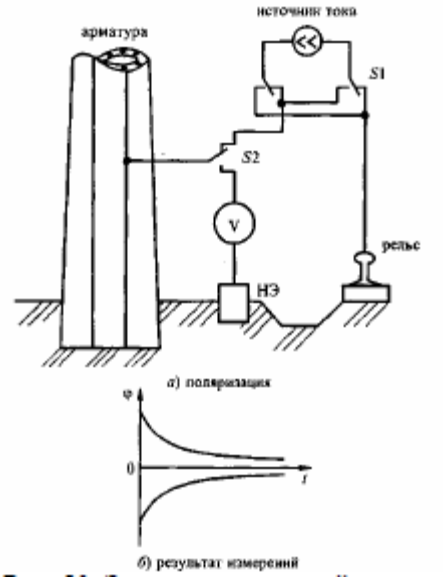


Рисунок 10.1- Электрохимический метод

Вибрационный метод (рисунок 1.2) основан на зависимости декремента затухающих колебаний опоры от степени коррозии арматуры. Опора приводится в колебательное движение, например, при помощи троса оттяжки и сбрасывающего устройства, которое калибруется на заданное усилие. На опоре устанавливают датчик колебаний, например, акселерометр. Декремент затухающих колебаний определяют как логарифм отношения амплитуд колебаний:

$$\delta = \ln\frac{A_2}{A_7}, \qquad (10.1)$$

где $A_2 A_7$ – амплитуды соответственно второго и седьмого колебаний.

Приборы АДО-2М измеряют амплитуды колебаний 0,01...2 мм частотой 1...3 Гц. Чем больше степень коррозии, тем быстрее затухают колебания.

Недостаток метода в том, что декремент колебаний в большой степени зависит от параметров грунта, способа заделки опоры, отклонений технологии изготовления опоры, качества бетона. Заметное влияние коррозии проявляется лишь при значительном развитии процесса.

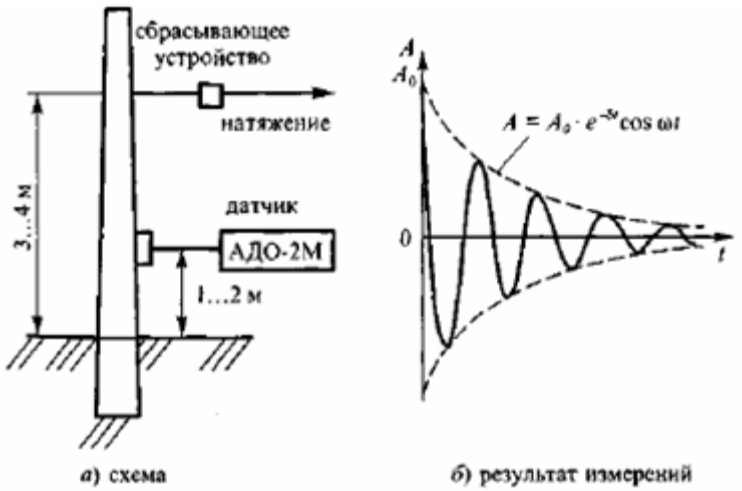


Рисунок 10.2- Вибрационный метод

АДО-2М можно применять также для измерения потенциалов «рельс - земля» (до 2000 В), сопротивлений опоры, проверки искровых промежутков и диодных заземлителей, поиска низкоомных опор в групповых заземлениях.

Принцип действия комбинированного прибора диагностики коррозионного состояния опор (ДИАКОР) основан на электрохимическом методе. При диагностировании плотность тока составляет 2,5 мкА/см^2, длительность поляризации - до 5 мин. За это время потенциал арматуры исправной опоры должен подняться до 0,6...0,7 В. Если измеренное значение менее 0,6 В, то ставят диагноз «коррозия». В знакопеременных и катодных зонах мощности источника для поляризации арматуры недостаточно. Там предлагается использовать штыревой заземлитель и увеличивать напряжение питания вдвое.

Для диагностики арматуры опоры применяют дефектоскоп ИДА-2. Действие индуктивного дефектоскопа арматуры ИДА-2 основано на методе измерения индуктивности катушки при внесении в нее стали (рисунок 10.3).

К надземной и подземной частям опоры прикладывают катушку индуктивности, введенную в одно из плеч моста, питающегося от измерительного генератора. Полное сопротивление катушки зависит от количества металла арматуры.

Достоинство такого метода состоит в том, что напрямую сравнивается масса металла в надземной и подземной частях. Недостатки заключаются в необходимости откопки опор и в том, что показания прибора зависят от колебания толщины защитного слоя бетона.

Толщина защитного слоя бетона при неизменной массе арматуры и положение арматуры могут быть определены при помощи приборов ИЗС. В пластмассовом корпусе ИЗС-10Н закреплены магниты и подвижная рамка, на оси которой имеется стрелка-указатель и магнит. Наличие и местоположение арматурных элементов устанавливают, перемещая прибор по поверхности конструкции. Толщина защитного слоя определяется по калибровочной кривой, номер которой зависит от диаметра арматуры.

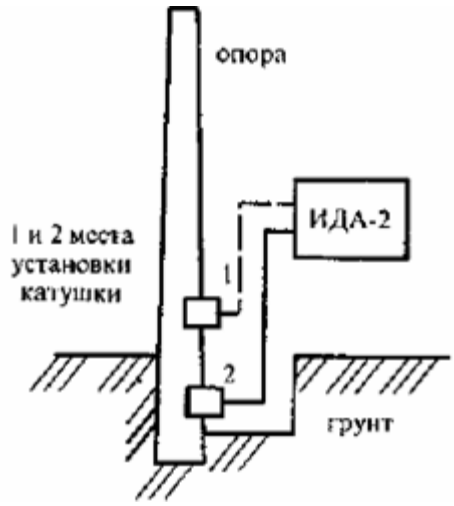


Рисунок 10.3- Индуктивный дефектоскоп арматуры

Прибор ИЗС-10Н состоит из генератора переменного напряжения, источника автономного питания, индуктивного датчика, детектора и стрелочного прибора. Его действие основано на том же принципе, что и действие ИДА-2. Проводят два измерения: когда ось датчика совпадает с направлением арматуры и под прямым углом. Диапазон измерения толщины - 5...60 мм, диаметр арматуры - 4...8 мм класса А-1 и 10...32 мм класса А-1П.

Прибор обеспечивает:

- измерение толщины защитного слоя бетона над арматурными стержнями 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20...25, 28...32 мм;

- измерение толщины защитного слоя бетона в зависимости от диаметра стержней арматуры в следующих пределах: при диаметре 4 ... 10 мм - от 5 до 30 мм; при диаметре 12 ... 32 мм - от 10 до 60 мм;

- определение расположения проекций стержней арматуры на поверхности бетона: диаметром 12...30 мм - при толщине защитного слоя бетона не более 60 мм; диаметром 4 ... 10 мм - не более 30 мм.

Погрешность измерений 5 %, масса - 4,2 кг.

Прибор ИЗС-10Н также применяется для установления типов опор. Для этого указатель диаметров на передней панели прибора устанавливается на цифру 4, а преобразователь перемещается вдоль окружности опоры. Если показания прибора изменяются от 3-4 мм до 10-15 мм, то это свидетельствует, что данная стойка типа ЖБК (со стержневой арматурой). Если же стрелка прибора указывает на 15-18 мм, то это говорит о том, что данная стойка типа СЖБК, СК (предварительно – напряженная).

Прочность бетона определяют ультразвуковым методом при помощи приборов «Бетон-5», УКВ-1М и УК-12П. Для обеспечения надежного акустического контакта между бетоном и рабочими поверхностями ультразвуковых преобразователей применяют солидол, технический вазелин. Данный метод позволяет определить глубину распространения трещин в бетоне, размеры каверн и зон неуплотненного бетона.

Ультразвуковые приборы УК-1401 (УК-14ПМ) предназначены для измерения времени и скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердых материалах при прозвучивании на фиксированной базе с целью определения прочности и целостности железобетонных опор контактной сети. База прозвучивания - 150 мм, диапазон измерений времени - 15... 70 мкс; дискретность измерения времени - 0,1 мкс; диапазон измерений скорости звука - 2150 ... 9900 м/с. Обычно выполняют два измерения - вдоль и поперек тела опоры.

Области применения:

- определение прочности бетона по скорости ультразвука согласно ГОСТ 17624-87 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности»;
- определение прочности бетона в эксплуатируемых сооружениях в сочетании с методом «отрыв со сколом»;
- оценка несущей способности бетонных опор и столбов из центрифугированного бетона через отношение скоростей распространения ультразвука в направлениях вдоль и поперек опоры;
- поиск приповерхностных дефектов в бетонных сооружениях по аномальному уменьшению скорости или увеличению времени распространения ультразвука в дефектном месте по сравнению с областями без дефектов;
- оценка сходства или различия упругих свойств материалов или образцов одного материала друг от друга, а так же возраста материала при условии изменения его свойств от времени.

Порядок измерений следующий:

- осматривают наружную поверхность опоры, устанавливают имеющиеся повреждения, их количество, расположение;
- определяют участки измерений. Количество этих участков зависит от типа стойки и степени ее повреждения. Для стоек типа СЖБК, не имеющих отверстий в вершинной части, необходимо не менее 2-х измерений на высоте 1.2 – 1.5 м от поверхности земли. В зоне ниже пяты консоли на 0.5 – 0.7 м. Для других типов стоек (типа СК), имеющих отверстия в вершинной части, достаточно одного участка – в нижней части опоры;
- участки для измерений должны находиться в сжатой зоне конструкции, расположенной со стороны пути или в плоскости действия наибольшего изгибающего момента;
- обязательным считается проведение измерений в зоне сетки трещин независимо от высоты ее расположения над землей;
- в выбранных участках при наличии продольных трещин измерения проводятся между трещинами;
- в зоне контакта ультразвуковых преобразователей с поверхностью бетона не должно быть раковин, выбоин и воздушных пор глубиной более 3 мм и диаметром более 6 мм. Места измерений должны быть очищены от грязи, краски, пыли и т.д.;
- измерения начинают с нижней части опоры;

- измерения требуется проводить в сухую погоду при температуре не ниже $+50^0$C;

-прозвучивающее устройство прикладывается к поверхности бетона с усилием порядка 4 кгс;

- откопку опоры для измерения времени распространения ультразвука следует вести до глубины 0.5-0.7 м со стороны нейтральной зоны опоры.

Состояние надземной части опоры можно проверить, нанося серию ударов специальным измерительным молотком. По ускорению отскока молотка определяют прочность железобетона. Из-за того, что структура бетона неоднородна - в нем имеются песок, гравий - диагноз ставят по оценкам математического ожидания и дисперсии измерительных параметров.

Для анализа звуковых колебаний в теле опоры применяют даже бытовой диктофон. По надземной части опоры наносится удар, затухающие звуковые колебания записывают на диктофон. Затем в лабораторных условиях его подключают к звуковой плате (карте) компьютера, и электрические колебания с помощью

аналого-цифрового преобразователя преобразуются в массив данных. Этот массив можно обрабатывать всеми известными методами, начиная с чисто визуального сравнения осциллограмм для опор с известными степенями потери прочности бетона.

Рисунок 10.4- Ультразвуковой дефектоскоп А1220

Диагностику надземной и подземной частей опор можно проводить низкочастотным ультразвуковым дефектоскопом А1220 рисунок 10.4. Прибор состоит из электронного блока с экраном и клавиатурой и 24-элементного (6*4) матричного антенного устройства (АУ). Конструкция элементов АУ прибора обеспечивает проведение контроля без контактной жидкости, т.е. с сухим точечным контактом. Элементы АУ подпружинены и

дают возможность измерений на криволинейных и шероховатых поверхностях.

Рисунок 10.5- Дефектоскоп вихретоковый ВИТ-3М

Металлические опорные конструкции можно диагностировать прибором ВИТ-3М (рисунок 10.5). Дефектоскоп вихретоковый ВИТ-3М предназначен для обнаружения и оценки глубины поверхностных трещин на изделиях изготовленных из сталей, а так же из сплавов на основе алюминия, меди, титана, магния. Дефектоскоп может применяться для обнаружения дефектов па плоских и криволинейных поверхностях, как с чистовой обработкой, так и с большой шероховатостью, а также под слоем неметаллического покрытия.

В основу работы прибора положен амплитудно-частотный метод вихретоковой дефектоскопии.

Дефектоскоп собран в одном корпусе, включая батарейный отсек. Вихретоковый преобразователь (ВИ) в корпусе которого вмонтирован светодиод индикации, соединяется с корпусом дефектоскопа кабелем через разъем на задней панели.

В дефектоскопе имеется три вида индикации результатов контроля:

-световая, срабатывающая при пересечении преобразователем трещины (конструктивно совмещена с датчиком).

- стрелочная, работающая в статическом режиме и позволяющая оценивать глубину обнаруживаемой трещины путем сравнения отклонений стрелки на специально изготовленном образце и на трещине;

-звуковая, с выводом информации на головные телефоны. Дублирует стрелочную. Изменение частоты тона пропорционально отклонению стрелки.

При проверке металлических конструкций необходимо установить ВИ на контролируемый участок перпендикулярно поверхности. Передвигая ВИ

перпендикулярно поверхности по контролируемому участку, следить за отклонением стрелки. При прохождении ВИ над трещиной стрелка отклонится вправо. Если отклонение стрелки более 4-5 делений шкалы, то при пересечении ВИ трещины сработает световой индикатор. При использовании головных телефонов будет слышен звуковой сигнал.

Технические характеристики:

- минимальное значение глубины трещины - не более 0.2 мм;
- минимальное значение длины трещины - не более 3 мм;
- размеры не более 140х90х35 мм;
- масса не более 0.3 кг.

а). б).

Рисунок 10.6- Ультразвуковой толщиномеры серии «26» (а) и «MG2»(б)

Ультразвуковые толщиномеры серии «26» и «MG2» рисунок 10.6.

Портативные, карманного типа толщиномеры серии 26 предназначены, в основном, для исследования разрушения материалов.

Ультразвуковой толщиномер серии MG2 с расширенными техническими характеристиками:

- возможность измерения толщины через изоляцию;
- толщина контролируемого материала от 0,5 до 635 мм;
- режим быстрых измерений MIN/MAX;
- режим стоп-кадра;
- компенсация смещения нуля
- время непрерывной работы от встроенных батарей - 150 часов
- рабочая температура от -10 до +1500С
- вес 340 г.

Цифровой широкополосный дефектоскоп со встроенными НЧ и ВЧ фильтрами предназначен для обследования сварных швов и соединений, измерения толщины, выявления коррозии и эрозии, нахождения и определения размеров трещин и пор, рисунок 10.7.

Рисунок 10.7- Ультразвуковой дефектоскоп «EpochLT»

Прибор имеет генератор прямоугольных или пиковых импульсов:

- частота импульсов от 30 Гц до 1 кГц;
- диапазон рабочих частот от 0,5 до 25 МГц;
- VGA, USB порт вывода данных
- NiMH батарея большой емкости, время непрерывной работы 8 часов
- большой, яркий жидкокристаллический или электролюминесцентный дисплей.
- автоматическая калибровка ультразвукового преобразователя.
- усовершенствованная функция регистрации данных с возможностью редактирования
- расширенная память (500 изображений А- развертки /12000 значений толщины)
- возможность определения положения дефекта по трем координатам.

Твердость металла металлических опор может быть определена при помощи прибора МЭИТ-7. Поверхность опоры предварительно защищают, затем вдавливают в поверхность шарик диаметром 10 мм с определенным усилием. Усилие вдавливания выбирается таким, чтобы оттиск от шарика имел диаметр 0,9 мм. Сила вдавливания измеряется и пересчитывается в предел текучести металла. Состояние металлических конструкций рекомендуется оценивать на основе анализа визуальных осмотров, агрессивности среды, оставшейся толщины, прогибов и металлографических исследований. Металлографические исследования проводят тогда, когда имеется необходимость определить марку стали. Для определения толщины полок конструктивных элементов используют индикаторные скобы (рисунок 10.8).

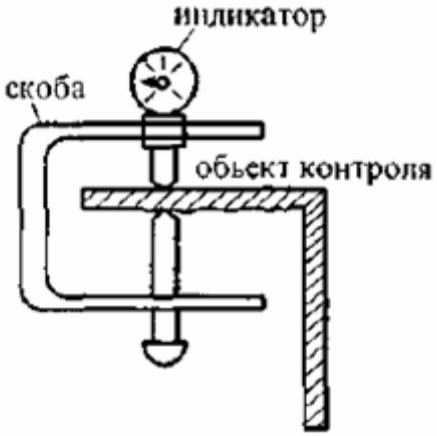


Рисунок 10.8-Индикаторная скоба

Признаками образования трещин служат разрушения слоя краски и выступающие полосы ржавчины красно-бурого цвета. Очень тонкие трещины обнаруживаются с помощью лупы или микроскопа МПБ-2. Вообще, для диагностики металлических конструкций, мест их соединений рекомендуется несколько методов: ультразвуковой, вихретоковый, анализа параметров петли гистерезиса.

10.3 Диагностика подвесной изоляции и цепей заземления

10.3.1 Виды и причины повреждений изоляторов и цепей заземления

Изоляторы ЛЭП отказывают по следующим причинам: климатические воздействия - 11,7%, посторонние воздействия - 31, 0 %, другие причины - 11,6%, дефекты конструкции, изготовления и монтажа - 9,9%, старение материалов - 3,8 %, недостатки эксплуатации - 1,5%, недостатки проектирования - 0,5%.

Наибольшая относительная повреждаемость у анкерных и натяжных изоляторов, так как они испытывают большие механические нагрузки. Тяжелые условия работы и у фиксаторных изоляторов из-за воздействия нагрузок в процессе токосъема.

На ЛЭП и контактной сети применяют тарельчатые изоляторы из фарфора, стекла и полимерных материалов, а также стержневые из фарфора иполимеров. Повреждения изоляторов различны - внутренний и поверхностный пробой, повреждение при перекрытии дугой, растрескивание и коррозия.

Причины отказов изоляторов разделяют на две группы - электрические и механические. Электрические происходят из-за старения (растрескивания) материала, загрязнения поверхности, перенапряжения и отключения разъединителей под нагрузкой. Механические (им подвержены в основном стержневые изоляторы) возникают из-за образования микротрещин при ударах и вибрации. Микротрещины возникают и при резких колебаниях температуры, из-за различия коэффициентов расширения фарфора, цемента и

металла. Вероятность механических повреждений возрастает с понижением температуры.

10.3.2 Методы и средства диагностики подвесной изоляции и цепей заземления

Цепи заземлений. Чтобы определить пробивное напряжение искровых промежутков, а также проверить диодные заземлители, используют прибор «Импульс». На искровой промежуток подается напряжение 300...500В (для диода напряжение устанавливается в соответствии с классом диодного заземлителя). Положительный вывод прибора подсоединяют к катоду, отрицательный - к аноду диода. Среднее время диагностирования составляет 15 с, диапазон регулирования - от 0 до 2000В, масса прибора 4 кг.

Проверка производится без разрыва цепи заземления, что исключает трудоемкую операцию по отсоединению заземления. Прибор обладает следующими данными:

- величина регулируемого выходного напряжения постоянного тока 200 – 2000 Вольт;
- потребляемый ток от аккумулятора при измерении 150 мА;
- габаритные размеры 175*165*95 мм;
- вес 3 кг.

Перед измерением прибор устанавливается с полевой стороны или сбоку от опоры. Присоединение зажимов к заземлению опоры и измерение проводится только при отсутствии проходящего поезда.

На искровой промежуток подается напряжение 300 – 500В. После этого нажимается кнопка на приборе. Если появляется сигнализация, то это означает, что промежуток закорочен и требует восстановления изоляции. Если сигнализации нет, то напряжение необходимо поднять до 1300В. Если теперь при нажатии кнопки сигнализация появилась, то нужно выключить прибор, снова включить его, установить 300 – 500В и повторно нажать кнопку. Сигнализация не должна работать. Искровой промежуток исправен.

Если при напряжении 1300В сигнализация не появляется, то это говорит о том, что отсутствуют вставки или контакт в искровом промежутке.

При проверке диодного заземлителя прибор положительным выводом подключается к катоду, а отрицательным к аноду. Устанавливается напряжение, соответствующее классу диодного заземлителя, и нажимается кнопка прибора. Сигнализация должна отсутствовать при исправном заземлителе.

Перед установкой на опору искровые промежутки проверяют мегаомметромМС-06 на 2000В по схеме на рисунок 10.9.

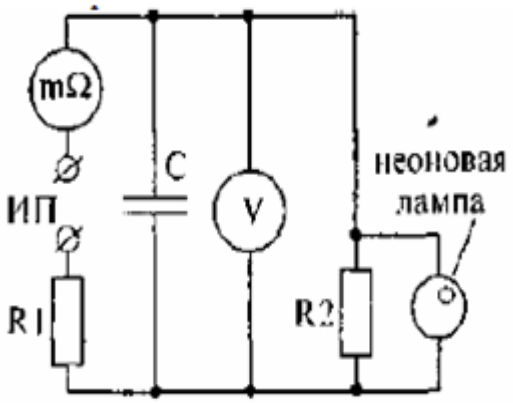


Рисунок 10.9- Проверка искровых промежутков перед их установкой

Увеличивая постепенно число оборотов ручки мегаомметра, наблюдают за стрелкой вольтметра. При исправном искровом промежутке стрелка отклоняется до момента пробоя, после чего возвращается в исходное положение. Показания прибора не должны быть ниже 800 и выше 1200В.

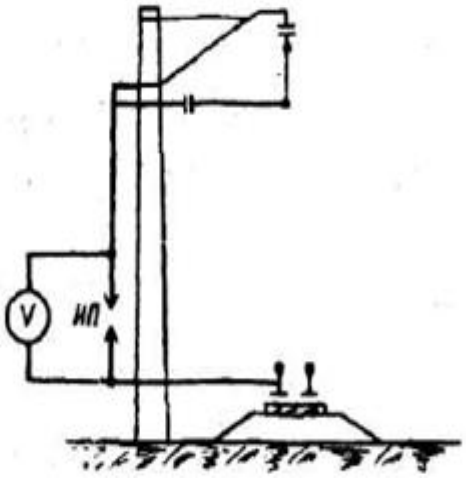


Рисунок 10.10- Схема проверки искрового промежутка в эксплуатации

При отсутствии указанных приборов первичная оценка исправности искрового промежутка может быть произведена с помощью вольтметра на шкале 20В. При этом вольтметр подключают к выводам искрового промежутка, включенного в цепь заземления. Если при проходе по участку поезда стрелка вольтметра отклоняется, то промежуток исправен (рисунок 10.10).

Диодные заземлители перед установкой проверяют мегаомметром М1101 на 500 В (в прямом и обратном включении), для чего + мегаомметра (вывод «линия») подключается первоначально к аноду, а затем к катоду, - (вывод «земля») – первоначально к катоду, а затем к аноду (рисунок 10.11, а). Заземлитель исправен, если сопротивление его в прямом направлении равно нулю, а в обратном - не менее 100 кОм.

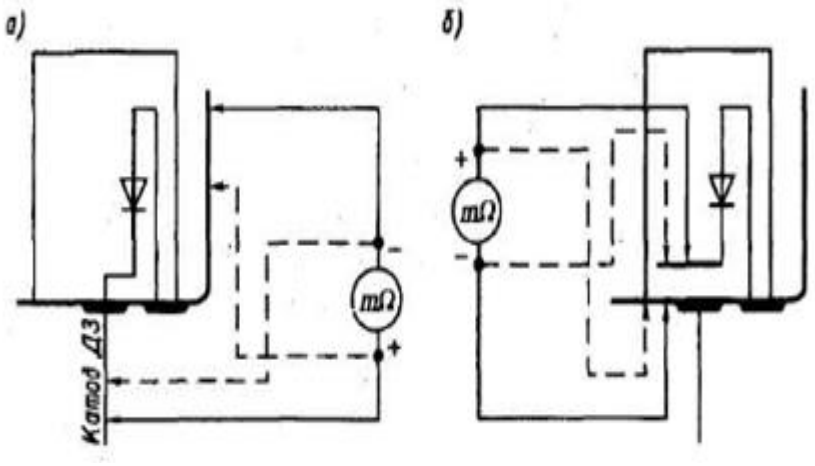


Рисунок 10.11 Схема проверки диодного заземлителя перед его установкой а) в сборе; б) каждого вентиля в отдельности

В случае, когда сопротивление диодного заземлителя в собранном виде при обратной полярности менее 100 кОм, следует снять крышку и проверить каждый вентиль отдельно (рисунок 10.11,б). Перед измерением гибкие выводы вентилей отключаются от схемы.

Вентили с обратным сопротивлением менее 100 кОм (при очищенной от пыли и влаги поверхности вентиля) следует заменить, так как при эксплуатации из-за возможно их быстрого выхода из строя (пробоя) создадутся условия электрокоррозионной опасности для защищаемых опор.

В процессе эксплуатации диодный заземлитель проверяют аналогично, предварительно отсоединив от рельсов (рисунок 10.12).

Перед измерением диодный заземлитель шунтируют проводом МГ-50 (рисунок 10.12), а провод, идущий к рельсам, отсоединяют от диодного заземлителя. Если сопротивление диодного заземлителя при обратной полярности меньше 100 кОм, следует снять крышку и проверить каждый вентиль отдельно по описанной выше методике. В случае исправности всех диодов проверяют сопротивление изоляции между корпусом заземлителя и стержнем (при отсоединенных гибких выводах вентилей). Изолирующая втулка подлежит замене при 100 кОм (если очистка от пыли, грязи не повысит сопротивление выше 100, кОм). При обнаружении дефектного вентиля допускается временная эксплуатация диодного заземлителя с двумя вентилями.

Оттяжка металлических и железобетонных опор на участках постоянного тока должна быть изолирована от анкеров изолирующими прокладками в соответствии с рабочими чертежами.

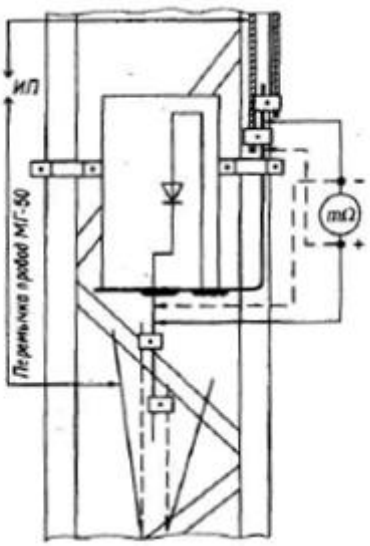


Рисунок 10.12-Схема проверки дидного заземлителя в процессе эксплуатации

Состояние изоляции анкеров от оттяжек проверяют одновременно с проверкой искровых промежутков вольтметром по шкале 20 - 100В (рисунок 10.13). Если стрелка вольтметра отклоняется при наличии поезда на перегоне, то изоляция исправна. На период измерений искровой промежуток в цепи заземления опоры должен быть закорочен.

Допускается проверка изоляции мегаомметром.

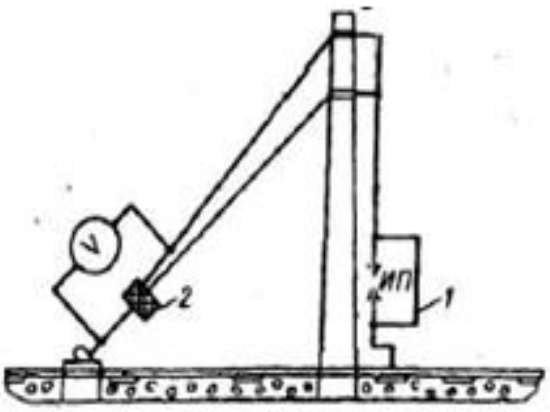


Рисунок 10.13 -Проверка изоляции оттяжки
1-временная перемычка; 2- изолирующий элемент

Изоляторы. Изоляторы в гирлянде диагностируют по распределению между ними рабочего напряжения. В соответствии с ПУТЭКС, фарфоровые тарельчатые изоляторы на участках постоянного тока диагностируют при помощи измерительной штанги с искровым промежутком ШИУ, ШИ-35,ШИ-110, ШИ-220 и штанги с электростатическим вольтметром. Штанги с искровым промежутком имеют поворотный механизм с эксцентриком и

неподвижный электрод. На оси эксцентрика находится также стрелка указателя. При измерениях щупы штанги накладывают на изолятор и поворачивают эксцентрик. Расстояние между неподвижным электродом и эксцентриком уменьшают вплоть до пробоя.

При повышении напряжения на одном изоляторе до 10 кВ возникает поверхностный частичный разряд (ПЧР). Это возможно при пробое одного из трех изоляторов в гирлянде переменного тока. Появления ПЧР сопровождается акустическими и электромагнитными колебаниями, оптическими излучениями. Наибольшая чувствительность обеспечивается в оптическом диапазоне. На многих дорогах для контроля ПЧР применяют переносной электронно-оптический дефектоскоп «Филин-3» (рисунок 10.14).

Изображение контролируемого объекта формируется входным объективом на фотокатоде усилителя яркости. На его экране оператор через окуляр наблюдает изображение. Расстояние до контролируемого объекта - 5...50 м, диапазон измеряемого излучения - 1...10 мкм, масса прибора - 2,5 кг. Дефектоскоп работоспособен только в темное время суток. Для того чтобы отличить ПЧР от коронных разрядов, необходимо осмотреть изоляторы не менее чем с двух сторон.

Рисунок 10.14- Дефектоскоп «Филин 3»

Измерения основаны на использовании эффекта Холла, когда магнитный щуп находится с одной стороны измеряемою изделия, а стальной шарик - с другой Данный метод наиболее эффективен при измерении на криволинейных поверхностях с минимальным радиусом кривизны и на труднодоступных участках изделий. Magna-Mike 8500 - идеальный прибор для измерения толщины стекла с любой степенью кривизны поверхности (min R<0, 79 мм) и практически любого размера. Точность прибора не зависит от свойств тестируемого материала.

Чтобы предотвратить массовые отказы при увлажнении загрязненных изоляторов, используется встроенная система диагностирования, состоящая из датчика загрязнения, источника питания и реле РТЗ-50, ток срабатывания -

40...50 мА. Сообщение о срабатывании реле поступает к диспетчеру, который принимает меры к снижению напряжения в контактной сети.

Прибор «Magna-Mike 8500» (рисунок 10.15) для измерения толщины немагнитных материалов.

Для дистанционного выявления гирлянд, имеющих дефектные изоляторы, применяется ультразвуковой дефектоскоп УД-8В. Принцип его действия основан на улавливании ультразвука от контролируемых изоляторов. Известно, что интенсивность поверхностных частичных разрядов на поверхности изоляторов пропорциональна 8-й степени величины приложенного к нему напряжения. При наличии «нулевых» изоляторов изменяется распределение напряжения по гирлянде: на исправных изоляторах напряжение, в сравнении с распределением в исправной гирлянде, повышается. Соответственно повышается интенсивность ультразвукового фона, что и регистрируется прибором. Установлено, что если дефект изолятора проявляется в форме незавершенного пробоя, то это приводит к резкому увеличению интенсивности сигнала в ультразвуковом диапазоне. При этом в микронаушнике прослушивается характерный треск.

Рисунок 10.15- Прибор «Magna-Mike8500»

В основу контроля изоляции положен метод сравнения: сравнивается фоновый уровень интенсивности звучания гирлянд с уровнем звучания конкретной гирлянды. При этом за фоновый уровень принимается уровень сигнала с исправных гирлянд (т.е. сигнал с большинства гирлянд). Определяется этот уровень в процессе производства работ на каждой конкретной линии и в конкретных погодных условиях. Процесс измерения сигнала выполняется следующим образом: прицел прибора визируется на середину контролируемой гирлянды и регулятором усиления стрелка измерительного прибора выводится на среднее положение индикаторной шкалы (стрелка колеблется в области середины шкалы). По окончании указанной настройки чувствительности прибора с лимба регулятора

считывается значение уровня сигнала в децибелах (dB). При этом необходимо чтобы расстояние от вертикали с контролируемой гирлянды до прибора при всех измерениях было бы одно и то же и не превышало 10 м. Когда решается вопрос о браковке гирлянды, целесообразно измерения провести с нескольких ракурсов. При сухой и безветренной погоде фоновый уровень может иметь значение 0dB. Это наиболее предпочтительные условия контроля линейной изоляции. В этом случае браковка производится по факту появления устойчивого сигнала, измеряемого прибором, и по характерному шуму в микронаушнике.

На воздушных ЛЭП для контроля степени загрязнения изоляторов применяют несколько методов:

- определение проводимости контрольных изоляторов, расположенных по соседству;
- контроль проводимости влаги и взвеси в чашке, установленной по соседству;
- определение уровня радиопомех, напряженность 1500... 5000 мкВ/м характеризует опасное состояние;
- визуальные наблюдения. При визуальных наблюдениях голубое свечение на поверхности изолятора и синие тонкие искры говорят о том, что нет опасности перекрытия. Короткие темно-желтые разряды свидетельствуют о сильном загрязнении, но немедленное перекрытие еще невозможно. Образование на поверхности плотных желтых или белых частичных дуг, сильных кистевых разрядов, охватывающих значительную часть изолятора, указывают на возможное перекрытие их в ближайшее мгновение.

Рекомендованная литература: [4,6,7]

Контрольные вопросы

1. Расскажите о диагностике опор контактной сети.
2. Перечислите основные повреждения опор контактной сети.
3. Перечислите методы и средства диагностики опорных конструкций контактной сети.
4. Какие используют устройства для диагностирования степени электрокоррозии арматуры железобетонных опор?
5. Как проводят диагностику надземной и подземной частей опор?
6. Диагностика подвесной изоляции и цепей заземления.
7. Перечислите виды и причины повреждений изоляторов и цепей заземления.
8. Перечислите методы и средства диагностики подвесной изоляции и цепей заземления.

11ДИАГНОСТИКА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ

11 Диагностика силовых трансформаторов и высоковольтных вводов
11.1 Виды и причины повреждения силовых трансформаторов и высоковольтных вводов
11.2 Методы и средства диагностирования силовых трансформаторов и высоковольтных вводов

Основными задачами диагностики трансформаторного оборудования являются обнаружение повреждений и дефектов, оценка функциональной исправности оборудования, определение возможности продления срока службы без проведения ремонта, определение объема ремонтных работ при его необходимости, оценка остаточного срока службы и рекомендации по продлению срока службы. Применение диагностических методов дает возможность оценить состояние целых трансформаторных парков, позволяя тем самым производить ранжирование трансформаторов по состоянию, что приводит к снижению затрат на эксплуатацию и ремонт. Отказ трансформатора может произойти из-за неисправности любого из них.

Техническое диагностирование отдельных элементов может осуществляться как без разборки, так и с частичной или полной разборкой трансформатора.

11.1 Виды и причины повреждения силовых трансформаторов и высоковольтных вводов

Наиболее интенсивному износу и старению подвержены изоляция обмоток, магнитопроводы, переключающие устройства, отводы, маслонаполненные и фарфоровые вводы.

Магнитопроводы повреждаются в следующих случаях:

- из-за перегрева, вследствие разрушения лаковой пленки между листами и спекания листов стали (вихревые токи возрастают и приводят к еще большему разогреву);
- при повреждении прессующих шпилек;
- при возникновении короткозамкнутых контуров, когда элементы магнитопровода оказываются замкнутыми между собой и на бак.

Переключающиеся устройства повреждаются при:

-нарушении работы контакторов;

-заклинивании механизмов контакторов;

- утрате механической прочности стальных деталей и бумажно-бакелитового вала;

-перекрытии внешнего промежутка защитного разрядника, что приводит к повреждению регулировочной обмотки.

Отводы от обмоток к переключающим устройствам и вводам отказывают из-за:

- плохих паек контактных соединений;
- приближения гибких отводов к стенкам бака;
- загрязнения масла частицами металла из систем охлаждения.

Повреждения вводов 110 кВ и выше связаны с увлажнением бумажной основы из-за разуплотнения или при доливке вводов маслом с пониженной электрической прочностью. Фарфоровые вводы отказывают из-за нагрева контактов в резьбовых соединениях составных токоведущих шпилек или в местах присоединения наружных шин.

Электрическая прочность изоляции нарушается при увлажнении, а также при наличии мелких дефектов в трансформаторах 220 кВ и выше. При этом появляется «ползущий разряд» - постоянное разрушение изоляции местными разрядами. Местные разряды возникают на поверхности диэлектрика под действием рабочего напряжения. На поверхности изоляции появляется сетка токопроводящих каналов. Возникающее при этом сокращение изоляционного промежутка ведет к пробою изоляции с образованием мощной дуги внутри бака.

Тепловой износ витковой изоляции ускоряется при набухании дополнительной изоляции катушек. Оно приводит к прекращению циркуляции масла из-за перекрытия масляных каналов. Механические повреждения витковой изоляции происходят при коротких замыканиях во внешней сети из-за недостаточной электродинамической стойкости трансформаторов (ослабление запрессовок обмоток).

Тепло, выделяемое при работе трансформаторов, вызывает необратимые процессы в материале изоляции обмотки. Очевидно, что основным источником тепла является обмотка. Старение изоляции зависит не только от степени, но и от продолжительности нагрева.

11.2 Методы и средства диагностирования силовых трансформаторов и высоковольтных вводов

Как показывает анализ отказов, надежность трансформатора определяется состоянием изоляции, обмоток и магнитопровода. Рассмотрим методы и средства диагностирования твердой изоляции.

В настоящее время нет практически пригодных прямых методов определения влажности и степени старения твердой изоляции. Поэтому применяют косвенные методы - контроль изоляционного масла и индикацию частичных разрядов.

Анализ масла позволяет выявить процессы его старения, появление загрязнений и влаги. По его результатам можно обнаружить до 90 % развивающихся дефектов. Индикация частичных разрядов необходима, потому что под их действием происходит очень быстрое развитие повреждения изоляции, которое не успевает отразиться на состоянии масла из-за малого выделения газов.

Состояние масла характеризуется несколькими параметрами. Степень увлажнения масла может быть определена по его углу диэлектрических потерь tgδ (рисунок 11.1), но лишь при большом количестве влаги. Это объясняется малым влиянием на tgδ масла растворенной в нем воды, резкий рост tgδ происходит при возникновении эмульсии.

В результате старения масло окисляется. Наличие продуктов окисления определяется кислотным числом (Кч), которое характеризует стабильность масла.

Диэлектрические потери измеряют по мостовой схеме, кислотное число - количеством гидроокиси калия (в миллиметрах), затраченного для нейтрализации кислых соединений, извлеченных из масла раствором этилового спирта (ГОСТ 5985-79).

Под воздействием интенсивных местных нагревов, мощных электрических разрядов и дуги происходит термическое разложение масла (крекинг), что приводит к снижению температуры вспышки смеси паров масла с воздухом. Температуру вспышки определяют при нагревании масла с одновременным перемешиванием в закрытом тигле, испытание на вспышку повторяют через определенные интервалы времени.

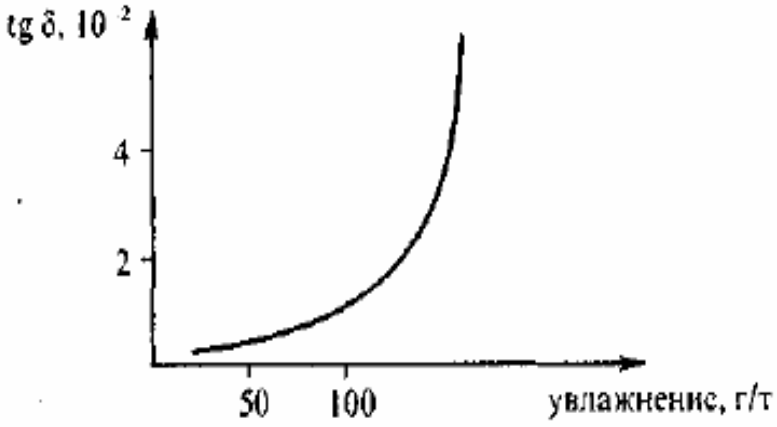


Рисунок 11.1- Зависимость tgδ масла от увлажнения

Твердые изоляционные материалы при старении выделяют семь диагностических газов: водород, низкомолекулярные углеводороды, окись и двуокись углерода. Из опыта эксплуатации следует, если скорость увеличения концентрации диагностического газа превышает 10 % в месяц, то это свидетельствует о развитии опасного дефекта.

Для анализа газов применяют методы определения общей горючести, масс-спектрометрический и хрома-тографический. Наибольшее распространение получил метод газовой хроматографии. Существующие методики предусматривают три способа извлечения газов из пробы масла: барботирование, вакуумный и статический.

Барботированием называется процесс извлечения газов при помощи продувания через пробу масла воздуха. Аппаратура для барботирования громоздка и требует до 3 л масла.

При вакуумном способе газы извлекают из масла при давлении не более 133 Па (1 мм рт. ст.), ускорение достигается за счет вспенивания. Этот способ требует определять степень извлечения каждого газа из масла, что связано с большими погрешностями.

При статическом методе выделения газа используют медицинский шприц на 50 мл, часть объема которого заполняют маслом, часть - газом. Затем пробу выдерживают, периодически покачивая, при постоянной температуре в течение 15...20 мин.

После выделения газов из масла они поступают через дозатор (рисунок 11.2, а) в разделительную колонку.

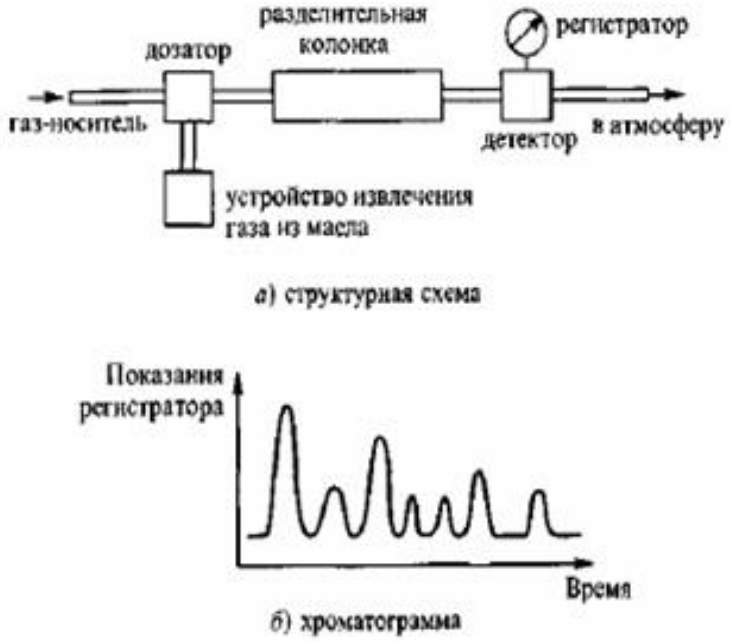


Рисунок 1.2-Хромотографическая установка

Для продвижения исследуемой смеси используется газоноситель, инертный по отношению к исследуемым газам. Разделительная колонка содержит адсорбент - пористое вещество с сильно развитой поверхностью. Вследствие физико-химического воздействия отдельных компонентов с поверхностью адсорбента происходит разделение смеси газов. Различия в физико-химических свойствах отдельных газов смеси вызывают различия в скорости их продвижения через адсорбент. На выходе колонки разные газы будут появляться в разные моменты времени.

Если известны свойства газов, скорость движения газа-носителя и температура разделительной колонки, то можно точно определить последовательность (время) вывода их из колонки. В качестве адсорбента, например, может применяться активированный уголь, а в качестве газа-носителя - аргон или азот. Тип адсорбента и газа-носителя определяется тем,

какие газы анализируются. Выходящие из разделительной колонки газы вместе с газом-носителем поступают в детектор.

Применяют два типа детекторов - по *теплопроводности и по ионизации в пламени.* Детектор по теплопроводности - катарометр - содержит чувствительные элементы - терморезисторы, включенные в плечи моста и нагреваемые протекающим по ним током. Два резистора обтекаются газом из колонки, два других - чистым газом-носителем. При появлении на выходе исследуемого газа меняется теплопроводность смеси, условия охлаждения резисторов. Напряжение диагонали моста записывается регистратором (рисунок 11.2,б).

В пламенно-ионизационных детекторах газ из разделительной колонки смешивается с водородом и сжигается. Образующиеся при этом ионы под действием напряжения, приложенного к расположенным в камере сгорания электродам, создают ток.

Количественные данные содержания газов в исследуемой смеси определяются по площади пиков хроматограммы.

По составу и концентрациям растворенных в масле газов составлен перечень выделяемых дефектов. Например, наличие соединений C_2H_4, CH_2, CH_4 свидетельствует о превышении температуры токоведущих частей и частичных разрядах. Обнаружение CO_2и CO говорит о старении твердой изоляции. Для определения состава газовой смеси используют хроматографы ЛХМ-80, «Модель 370», «Агат», «Цвет-100», «Цвет-200», «Цвет-500».

Электрохимический сигнализатор - водорода встраивается в систему охлаждения масла (рисунок 11.3).

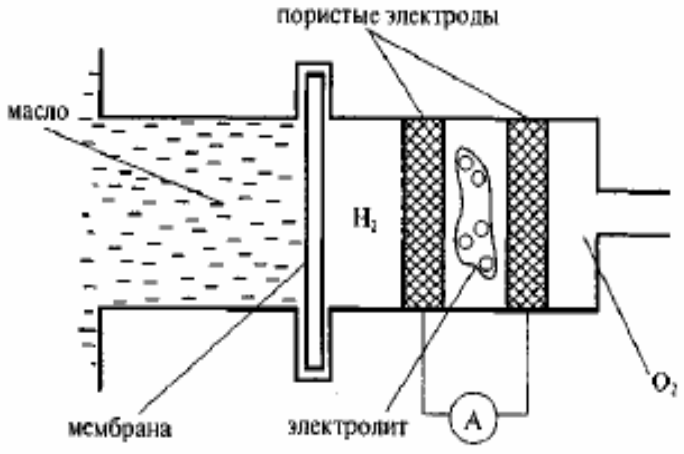


Рисунок 11.3- Сигнализатор водорода

Датчик реагирует на газы CO, C_2H_4, C_2H_2. Газы, растворенные в масле, проникают сквозь полупроницаемую мембрану в сернокислый топливный элемент, где в присутствии кислорода воздуха генерируется электрический ток, который фиксируется измерительным прибором.

Кроме перечисленных приборов для определения газов в пробах масла применяются следующие приборы.

Hydran M2 - интеллектуальная система, предназначенная для непрерывного анализа содержания газов (H, CO, C_2H_2, C_2H_4) и влаги в трансформаторном масле показано на рисунке 11.3.

Hydran 103B - портативный, полностью автоматизированный прибор с автономным питанием, который измеряет концентрацию растворенных горючих газов, водорода (H_2) и оксида углерода (CO) в полевых условиях.

Aquaoil 400 - система, предназначенная для непрерывного анализа влажности трансформаторного масла (рисунок 11.4).

Рисунок 11.4 Приборы и системы контроля трансформаторного масла

Эргономичные, полностью автоматические приборы для испытаний трансформаторного масла DPA75/DTA100 (рисунок 11.5,а), безопасные, удобные и простые в эксплуатации.

Рисунок 11.5- Автоматические пробивные установки: а) DPA75, б) DTA100

Испытание электрической прочности масла выполняется при напряжении до 100 кВ. Все необходимые данные отображаются на большом дисплее с высоким разрешением. Защитная крышка прибора снабжена блокировкой, отключающей высокое напряжение при ее открытии. В процессе работы на дисплей выводится информация о требуемых от оператора действиях, например, о необходимости проверки расстояния между электродами, Автоматическое самотестирование прибора обеспечивает исключительно высокую точность измерений.

Автоматическая установка для определения диэлектрических свойств масла (tgδ, ε) и других жидких диэлектриков (рисунок 11.5,б) отличается высокой точностью измерения и простотой эксплуатации. Все необходимые данные отображаются на большом дисплее с высоким разрешением. Защитная крышка прибора снабжена блокировкой, отключающей высокое напряжение при ее открытии.

Автоматизированная установка измерения диэлектрических потерь трансформаторного масла «Тангенс-3М» (рисунок 11.6) предназначена для определения диэлектрической проницаемости, емкости, рабочего напряжения, температуры пробы трансформаторного масла и тангенса угла диэлектрических потерь масла по ГОСТ 6581-75 при частоте 50 Гц.

Рисунок 11.6 -Автоматическая установка «Тангенс -3м»

Установка рассчитана для эксплуатации в помещениях при рабочих значениях температуры воздуха от плюс 15° С до плюс 35° С, относительной влажности 80 % при температуре плюс 20° С и атмосферном давлении 84,0 - 106,7 кПа (630 - 800 мм.рт. ст.). В микроконтроллере установки предусмотрено программное обеспечение, позволяющее переписать из установки в стационарный персональный компьютер (ПК) файл, содержащий результаты измерений.

В аварийных режимах работы для быстрого обнаружения перегрева обмоток применяют волоконно-оптический датчик, расположенный внутри бака. Диапазон измерения температуры - 0...200°С, точность - ±2 °С. Оптический люминесцентный датчик представляет собой диск, спрессованный из порошка люминофора, диаметр датчика - 0,4 мм, толщина - 0,13 мм. Он освещается ультрафиолетовыми лучами через оптическое волокно диаметром 0,4 мм. Источник лучей расположен за пределами трансформатора.

Ультрафиолетовое излучение вызывает флуоресценцию люминофора в видимой части спектра. Интенсивность линии спектра зависит от температуры датчика. Видимое свечение люминофора передается через то же волокно в измерительный прибор. С помощью интерференционных фильтров выделяются и измеряются необходимые длины волн.

Напряженности электрического поля в газовых включениях (дефектах) изоляции превышают напряженность в окружающем диэлектрике,

электрическая прочность газа ниже, чем диэлектрика и происходит пробой газового включения или частичный разряд. Частичные разряды вызывают дальнейшее разрушение диэлектрика, но не разрушают фарфор, стекло, слюду и другие диэлектрики неорганического происхождения. Их можно обнаружить акустическими методами или по электромагнитному излучению в широком диапазоне частот.

Для обнаружения частичных разрядов в цепь шины заземлений баков устанавливают высокочастотные трансформаторы тока (рисунок 11.7). На корпусе бака размещают акустические датчики, преобразующие звук в электрический сигнал (цепи СД показаны однолинейными).

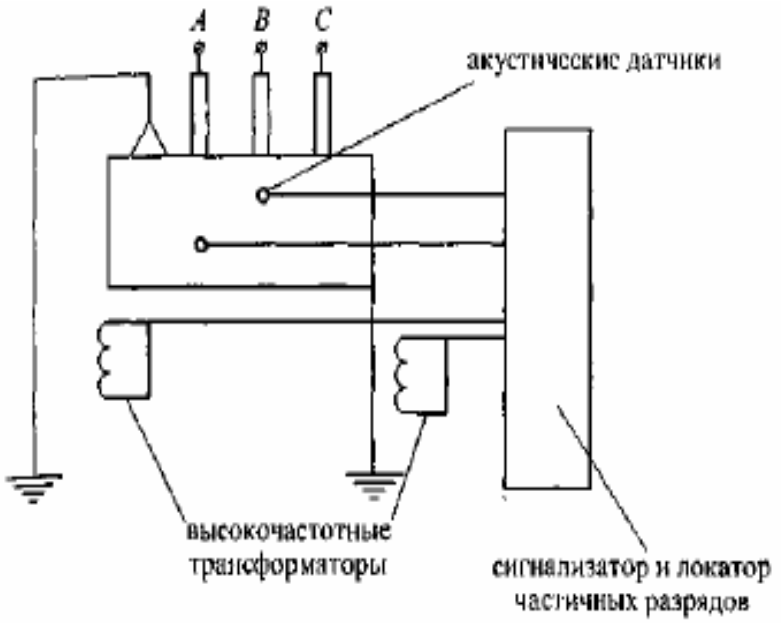


Рисунок 11.7- Контроль частичных разрядов в трансформаторе

Важнейшие характеристики трансформатора:
- сопротивление изоляции обмоток;
- тангенс угла диэлектрических потерь обмоток;
- отношения C2/C50 и ΔC/C.

При приложении к диэлектрику разности потенциалов происходит *поляризация* - перемещение электрических зарядов. На это затрачивается энергия поля, рассеиваемая затем в объеме диэлектрика. Известны несколько видов поляризации: электронная, ионная, междуслойная и др. При междуслойной поляризации на поверхности раздела разных слоев изоляции накапливаются свободные заряды.

Перемещение этих зарядов создает ток *абсорбции,* что и может быть обнаружено при диагностировании.

Для измерения абсорбционных характеристик - геометрической емкости (емкости изоляции на частоте 50 Гц) C_{50}, абсорбционной составляющей ДС, разности емкостей на частотах 2 и 50 Гц C_2, C_{50} —

используются приборы ПЕКИ-2 и У268. Измерения указанных параметров проводят дважды: до и после окончания ремонта.

Сопротивления обмоток измеряют мегаомметром на напряжение 2500 В дважды через 15 и 60 с после начала вращения его ручки. Нормируются как наименьшие значения сопротивлений, так и их отношение. Тангенс угла диэлектрических потерь определяют при помощи моста переменного тока. Емкости обмоток измеряют дважды на частотах 2 и 50 Гц при помощи прибора ПКВ-7 или ПКВ-8. Этими же приборами измеряют емкость обмоток «С» и ее прирост ΔС.

IDA 200 - универсальная портативная система для диагностики электрической изоляции в полевых условиях показана на рисунке 11.8.

Рисунок 11.8- IDA 200

Области применения: силовые и измерительные трансформаторы, бушинги, кабели.

Система позволяет измерять емкость и диэлектрические потери tgδ на дискретных частотах ниже и выше промышленной частоты, от 1000 Гц до 0,0001 Гц. Это позволяет получить больший объем информации о состоянии изоляционного материала, в том числе возможность распознавания отдельных элементов и идентификации процессов старения изоляционных материалов.

Выявление деформаций обмоток. При протекании больших токов в трансформаторе возможна деформация обмоток, что может привести к витковым замыканиям и потере устойчивости обмоток (вибрации). Деформация обмоток изменяет их частичные емкости, а также собственные и взаимные индуктивности. Чтобы обнаружить указанные изменения, применяют методы импульсов, частотных характеристик, короткого замыкания и вибрационных характеристик.

Метод импульсов основан на анализе и сравнении токов переходного процесса в обмотках при приложении коротких импульсов напряжения. Осциллограммы снимают перед первым включением трансформатора в работу и по мере необходимости диагностирования. Недостатками метода являются большие погрешности измерений формы и амплитуды импульсов.

Метод частотных характеристик основан на снятии амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) трансформатора на частотах до 500 кГц. Измерения проводят перед первым включением трансформатора в работу и по мере необходимости диагностирования. Диагноз ставят на основе сравнения АЧХ.

Метод короткого замыкания является стандартным. Диагностическим параметром служит относительное изменение сопротивления короткого замыкания. Граница поля допуска назначается в пределах от 3 до 5 %.

В литературе имеются рекомендации по определению сопротивления короткого замыкания при подаче на трансформатор пониженного (до 0,4 кВ) напряжения. Результаты испытаний приводят к номинальным путем умножения на соответствующие масштабные коэффициенты. Таким методом можно обнаружить деформацию обмоток не только после аварийных режимов, но и после транспортировки трансформаторов с завода изготовителя. Если измеренное значение сопротивления короткого замыкания на 1,5 - 3 % отличается от паспортного, то необходим регулярный контроль после каждого короткого замыкания.

Вибрационные характеристики определяются при измерении вибрации поверхности бака в 10-15 точках по периметру и в 3-4 сечениях - по высоте. Сравнивая результаты измерений в разных трансформаторах, можно обнаружить ослабление креплений, уменьшение усилия прессовки и т. п.

Рекомендованная литература: [4,6,7]

Контрольные вопросы

1. Назовите основные задачи диагностики трансформаторного оборудования.
2. Перечислите виды и причины повреждения силовых трансформаторов и высоковольтных вводов.
3. Анализ методов и средств диагностирования силовых трансформаторов и высоковольтных вводов.
4. На каком анализе основан метод импульсов?
5. На каком анализе основан метод частотных характеристик?
6. Как определить вибрационные характеристики?
7. Перечислите важнейшие характеристики трансформатора.

12 ДИАГНОСТИКА ТОКОВЕДУЩИХ ШИН И КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

12Диагностика токоведущих шин и контактных соединений
12.1. Виды и причины повреждения контактных соединений
12.2. Методы и средства диагностирования контактных соединений
12.3 Диагностика выключателей переменного и постоянного тока
12.3.1. Основные причины и виды повреждений выключателей переменного и постоянного тока
12.3.2. Методы и средства диагностики выключателей переменного и постоянного тока

12 Диагностика токоведущих шин и контактных соединений

12.1 Виды и причины повреждения контактных соединений

В контактных соединениях наблюдается как общий отжиг металла проводов при аварийных перегрузках, так и локальный в местах подключения питающих зажимов. Нагрев зажимов происходит из-за увеличения их электрического сопротивления. Оно может возрастать из-за окисления контактных поверхностей, ослабления затяжки болтов, а также из-за деформации самого зажима. При колебаниях температуры зажимов возникают остаточные деформации, приводящие к увеличению сопротивления в 2 раза.

Результаты экспериментальных исследований зависимости переходного сопротивления зажимов от времени показывают, что сопротивление шинных болтовых соединений «алюминий - алюминий» за один год возрастает с 8 мкОм до 40 мкОм, т.е. в 5 раз. Более стабильное переходное сопротивление имеют безболтовые соединения. Даже у новых электрических соединителей, изготавливаемых из проводов МГ 95, МГ 70, распределение тока между отдельными проволоками неравномерно. Те проволоки, которые соприкасаются с зажимом, работают с перегрузкой, внутренние - недогружены. Наружные проволоки отжигаются, теряют механическую прочность, обламываются. После этого ток перераспределяется на внутренние проволоки, но из-за больших переходных сопротивлений (до 1000 мкОм) резко возрастает нагрев и ускоряется старение материала соединителя. Скорость старения соединителей напрямую зависит от токовой нагрузки.

Ухудшение электрической проводимости соединителей приводит к электрическому износу струн. Электрический износ струны в звеньях имеет две составляющих: отжиг металла и электрическую эрозию. Кроме того, появляется чисто механический износ струн вследствие трения в звеньях. Если напряжение между звеньями струны превышает 15 - 20В, возникают искровые поджоги.

12.2. Методы и средства диагностирования контактных соединений

Нагрев деталей и конструкций контактной сети измеряют портативным инфракрасным дефектоскопом (пирометром) ИКД. Если известны характеристики излучающей способности поверхности объекта, то можно рассчитать ее температуру. Разность измеряемых температур между ИКД и объектом составляет 0 ... 150 ^{0}С, угол поля зрения - 0,17 ^{0}, расстояние до объекта - не более 15 м, масса 1 кг.

Глядя в окуляр оптической системы, наводят прибор на контролируемый объект, и по шкале определяют температуру. ИКД состоит из приемника ИК-излучения (пироэлектрический приемник), нескольких усилителей и пикового вольтметра. Отклонение стрелки пропорционально разности температур контролируемого объекта и окружающей среды. Проверку можно проводить только в период интенсивного движения поездов. При расстоянии до объекта более 8 м необходимо вводить поправку. Поправка необходима и на вид соединений, а также на степень их загрязнения. Прибор нельзя применять при дожде, снеге, тумане, а также устанавливать против солнца.

Данный прибор обладает высокой производительностью. Его производительность ограничена лишь скоростью пешего перемещения персонала вдоль линии. Из статистики применения ИКД следует, что каждый сороковой - пятидесятый узел контактной сети из проверенных имеет повышенную температуру.

Нагрев устройств электроснабжения контролируется также бесконтактным переносным пирометром НРК, предел измерений от 0 ^{0} до 300 ^{0}С при температуре окружающего воздуха +5... + 40 ^{0} С. Расстояние до объекта не более 4 м, масса НРК - 1,5 кг.

Для контроля нагрева можно применять пирометры, шведской фирмы AGEMA, **«Thermopoint 90».**

Рисунок 12.1-Прибор «Thermopoint 90»

Рисунок 12.2- Прибор «Thermopoint 2/30Pro»

Высокотемпературные пирометры серии «Thermopoint 90» (рисунок 12.1) имеют большое разнообразие пределов измерения температуры, систем визирования, значений оптического разрешения, различные величины спектральной чувствительности. Диапазон измеряемых температур от -32 до +3000 ^{0}C, разрешающая способность - 75:1, спектральный интервал - 8 ... 14 мкм. Используются для решения практических задач, где требуется высокая точность и оптическое разрешение в условиях неопределенной или меняющейся излучательной способности объекта. Прибор наводят на объект при помощи перекрестных лучей лазера. На дисплее отображается текущая температура, величина эмиссии, максимальная измеренная температура. Расстояние до объекта - до 5 м, пятно чувствительности - 203 мм.

Приборы «Thermopoint 2/3Pro и 6/8Pro Plus» (рисунок 12.2) - низкотемпературные, простые в эксплуатации и надежные портативные пирометры. Предназначены для дистанционного бесконтактного температурного контроля. Диапазон измеряемых температур от -32 до +760 ^{0}C. Функция сигнализации по верхнему и нижнему пределу температур. Память на 12 измерений.

Пирометры Thermopoint 62/64/64 Plus позволяют измерять температуру в диапазоне от -30 до +900 ^{0}C, возможна также опция с пределами измерения от -50 до +500 ^{0}C, имеют уникальную 16-точечную систему кругового лазерного визирования с центральной точкой. Графический дисплей автоматически отображает график изменения температуры по 10-ти последним измеренным точкам.

Пирометр «Thermoprofile 50» (рисунок 12.3) реализуют бесконтактный способ измерения температуры на всей поверхности движущегося объекта или во всех точках протекающего процесса. Полученная информация обеспечивает возможность фиксировать значения всех переменных, описывающих состояние объекта или процесса. Многоточечное сканирование обеспечивается вращением оптической системы, которая регистрирует ИК излучение в 256 точках в поле зрения 90 ^{0}. Максимальная скорость сканирования - 48 строк в секунду. Диапазон температур от 0 до +1600 ^{0}C.

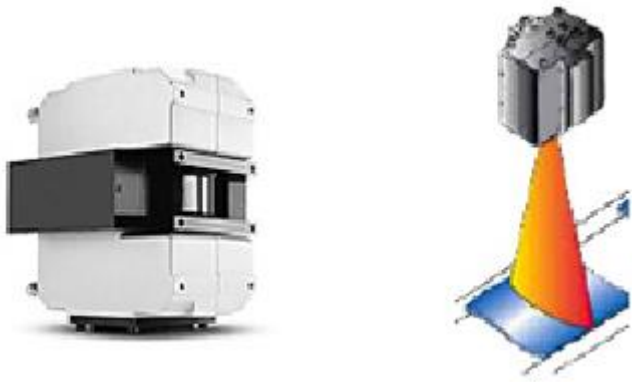


Рисунок 12.3- Thermoprofile 50

Место стыковки сталеалюминевых проводов в опрессованной стальной гильзе может быть смещено по отношению к оси гильзы. Стальная часть соединителя проводов закрыта алюминиевой гильзой, поэтому визуально выявить указанный дефект практически невозможно. Для определения положения стального сердечника применяют прибор ИПС. Он содержит постоянный магнит, размещенный на оси, положение магнита указывается стрелкой. Прибор перемещают вдоль гильзы. Когда магнит оказывается над ее краем, стрелка отклоняется. Прибор позволяет контролировать соединения проводов АС, АСКС, АСКП, АСК сечением от 240/32 до 800/105 мм^2 с точностью ±10 мм.

Портативные **магнитные дефектоскопы DA 1500 и DA 750** (рисунок 12.4) обеспечивают эффективный контроль больших поверхностей.

Рисунок 12.4- Портативный магнитный дефектоскоп DA 1500

Выбор размера контролируемого поля зависит от величины тока и места контакта кабелей. Выходной ток варьируется от 0,1 А до максимума с помощью переключателя на передней панели и контролируется по показаниям амперметра. Сила выходного тока зависит от сечения и длины кабеля. При этом обеспечивается более высокая чувствительность при обнаружении поверхностных дефектов и не требуется размагничивание. Магнитное поле постоянного тока обеспечивает лучшую возможность обнаружения как поверхностных, так и подповерхностных дефектов.

12.3 Диагностика выключателей переменного и постоянного тока

Выключатели переменного тока. В зависимости от среды, в которой происходит гашение дуги, выключатели можно разделить на масляные, со специальными жидкостями, воздушные, автогазовые (газ генерируется твердым веществом под воздействием дуги), элегазовые, вакуумные. В устройствах электроснабжения железных дорог наиболее часто применяют масляные, элегазовые и вакуумные выключатели.

Выключатели постоянного тока. В устройствах электроснабжения наибольшее распространение получили выключатели АБ-2/4, ВАБ-28, ВАБ-43, ВАБ-48. Быстродействующие выключатели, наиболее повреждаемые аппараты среди оборудования тяговых подстанций постоянного тока.

12.3.1 Основные причины и виды повреждений выключателей переменного и постоянного тока

Неисправностями выключателей являются:

-не до включение подвижных контактов, их зависание;

-поломка розеточных контактов приводит к невозможности отключения и включения выключателя, что может закончиться дугой и взрывом;

-перекрытие изоляции - самое массовое явление, происходит из-за атмосферных осадков и коммутационных перенапряжений, а также загрязнений;

-попадание воды внутрь выключателя и вытекание масла приводит к пробою;

-ослабление крепления подвижных и неподвижных контактов на изоляторах, а также токопроводящих шин проходных изоляторов;

-изменение плотности соприкосновения подвижного и неподвижного контактов, допустимые значения вытягивающего усилия не должны превышать заданных значений;

-эрозия, коррозия и окисление мест контакта ножа и губки;

-ослабление соединения шин с неподвижным контактом, заземления с разъединителем;

-смещение подвижного контакта относительно оси неподвижного;

-загрязнение и растрескивание изоляторов;

-разновременность касания ножей с губками трехфазного разъединителя, граница поля допуска - 3 мм. У выключателя ВМГ-133 может наблюдаться разрушение фарфоровых тяг. Механизмы отказывают из-за поломок отдельных деталей, нарушений регулировки. Застревание тяг, заедание валов может быть источником аварии. Приводы отказывают из-за плохой регулировки, заедания в механизме расцепления, дефектов пружин, выпадения осей, пальцев. Пружинный привод ВМП-10П может самопроизвольно включаться при заводе пружин.

12.3.2 Методы и средства диагностики выключателей переменного и постоянного тока

В качестве определяющих параметров состояния масляного выключателя можно использовать диэлектрическую прочность масла и степень износа контактов выключателя с последующим увеличением переходного электрического сопротивления.

Диэлектрическая прочность масла снижается с ростом числа отключений коротких замыканий. Ток дуги приводит к подгару контактов выключателя и последующему увеличению переходного электрического сопротивления.

Диэлектрическая прочность масла при заливке должна быть не ниже 40 кВ, граница поля допуска - 25 кВ на выключатель. Если после заливки диэлектрическая прочность масла снижается более чем на 5 кВ, то это говорит о загрязнении внутри-баковой изоляции.

Диэлектрическую прочность масла и износ контактов на практике трудно контролировать. Существует еще один интегральный определяющий параметр - сумма отключаемых токов. Границей поля допуска для выключателей ВМО и ВМК, работающих на фидерах контактной сети, можно принять 100 кА. На практике для фиксации суммы отключенных токов применяют сумматор ФСТКЗ-76. Выключатели типа ВМО и ВМК имеют ограниченный ресурс по числу оперативных отключений - всего 70 - 80.

Основной метод диагностирования коммутационных аппаратов - комплексное опробование с одновременными измерениями времени включения и отключения, разновременности замыкания и размыкания контактов, проверкой приводов (напряжения срабатывания электромагнитов, работоспособности при нижнем пределе давления воздуха), температуры и переходного сопротивления контактов.

Около 70...80 % всех отказов коммутационных аппаратов связано с отказами механической системы. Ее можно полностью диагностировать только при проверке функционирования на выведенном из работы аппарате. Состояние механизмов можно определить по усилиям, необходимым для их перемещения. Временные характеристики определяют осциллографированием работы контактов. Для исследования механических частей снимают *виброграммы* (рисунок 12.5).

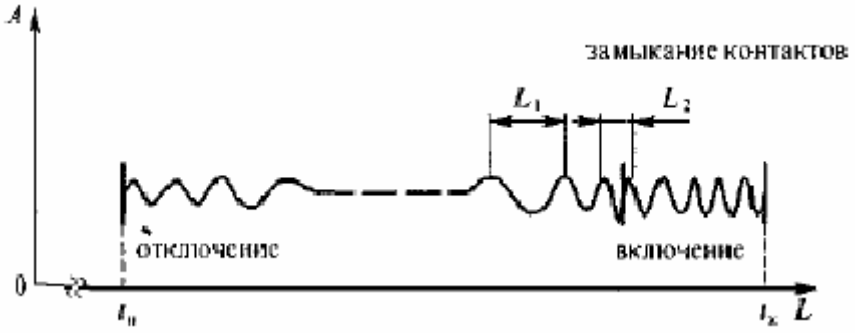


Рисунок 12.5- Виброграмма выключателя

Виброграмма записывается при помощи вибрографа - электромагнита, питаемого переменным током частотой 50 Гц, к якорю которого прикреплено пишущее устройство. Синусоида служит для отметки времени.

Изоляцию выключателей испытывают повышенным напряжением. Мелкие частицы в элегазе, возникающие при работе механизмов, могут вызывать частичные разряды. Отбираются также пробы элегаза для контроля пробивного напряжения, влажности и наличия продуктов разложения.

Возможны измерения акустическими методами (они сопровождаются большими помехами), электрическими методами с использованием специальных встроенных электродов.

Увеличение переходного сопротивления контактов может быть обнаружено пирометрами по изменению температуры наружных поверхностей выключателя.

В качестве показателя наработки высоковольтных выключателей используют сумму произведений отключаемых токов на время отключения. Для регистрации указанного показателя применяют фиксатор-сумматор токов короткого замыкания ФСТКЗ-76. Наибольшая сумма, которую фиксирует сумматор, равна 125 кА·с. Для эксплуатируемых на тяговых подстанциях масляных выключателей 27,5 кВ граница поля допуска составляет 100 кА·с.

Для проверки коммутационной аппаратуры комплексных распределительных устройств КРУ и КРУН (исключая высоковольтные испытания и прогрузку токовых цепей) служит устройство УПКА-1. Оно позволяет:

- проверять коммутационную аппаратуру (за исключением токовых реле и автоматов);

- измерять время и скорость включения и отключения выключателя с помощью вибратора;

-проверять напряжения срабатывания и возврата контактора и электромагнита привода выключателя;

- опробовать выключатель при пониженном на 20% напряжении питания.

Измерение переходных сопротивлений контактов коммутационной аппаратуры с номинальным напряжением до 500 кВ возможно с помощью микроомметра М-1. Он работает по принципу вольтметра - амперметра с непосредственным отчетом, пределы измерения - 0...2500 мкОм.

Кроме аппаратурного диагностирования, высоковольтные выключатели обследуют визуально и на слух.

Масляные выключатели. Визуально проверяют действительное положение выключателя, состояние поверхности фарфоровых покрышек вводов, изоляторов и тяг, целость мембран предохранительных клапанов и отсутствие выбросов масла из газоотводов, отсутствие просачивания масла через сварные швы, разъемы, краны. По цвету термопленок определяют температуру контактных соединений. Проверяют также уровень масла. На слух проверяют отсутствие треска и шума внутри выключателя.

Элегазовые выключатели. Контролируют давление по показаниям манометров, а также плотномеров. При значительных колебаниях температуры давление изменяется в широких пределах. Утечки элегаза не должны превышать 3 % общей массы в год (массу определяют по номинальному давлению при известной температуре). Визуально проверяют

чистоту наружной поверхности, состояние заземляющих проводок резервуаров, на слух - отсутствие электрических разрядов, треска, вибраций

Вакуумные выключатели. Контролируют отсутствие дефектов (сколов, трещин) изоляторов и загрязнений их поверхности, а такжеотсутствие следов разрядов и коронирования. Износ контактов допускается до 4 мм.

Быстродействующие выключатели. В качестве показателя наработки быстродействующих выключателей рекомендуется использовать сумму произведений $I^2 t$. Этот показатель определяет ресурс выключателя по состоянию дугогасительной камеры. Разработан регистратор-сумматор токов короткого замыкания, содержащий шесть каналов, каждый из которых имеет свой порог тока срабатывания. Число срабатываний каждого канала фиксируется электромеханическими счетчиками. Разработан также электронный сумматор токов короткого замыкания.

Разъединители, отделители **и** ***короткозамыкатели.*** Визуально проверяют состояние контактных соединений и изоляции аппаратов (признаки нагрева контактов: цвет побежалости, изменение цвета термопленки), чистоту поверхности изоляторов, отсутствие продольных и кольцевых трещин. После срабатывания короткозамыкателей контролируют целость тяг и изолирующих вставок.

У отделителей проверяют механизмы приводов, цепи управления и блокировки. Для контроля температуры нагрева контактов применяют метод, основанный на том, что при данном токе определяют превышение температуры контакта над температурой окружающей среды и, приведя его к значению номинального тока соединения, сравнивают с нормой. Расчет приведенного значения температуры производится по формуле:

$$\Delta t_{\text{НР}} = \Delta t \cdot \left(\frac{I_{\text{НОМ}}}{I}\right)^2, \qquad (12.1)$$

где $\Delta t_{НР}$ - расчетное значение превышения температуры при номинальном токе $I_{НОМ}$; Δt- измеренное превышение температуры при токе через контакт I.

Для диагностирования выключателей могут применяться следующие приборы.

Система ODEN AT (рисунок 12.6) предназначена для проверки автоматических выключателей первичным током, определения коэффициента трансформации трансформаторов тока и др. Универсальная система ODEN AT позволяет отображать значения времени, тока и напряжения, коэффициент трансформации, фазовый угол, Z, P, R и $\cos\varphi$. С ее помощью можно проверять:

- выключатели напряжения;
- устройства РЗ первичным током;
- трансформаторы тока;

- устройства автоматического повторного включения и секционные разъединители;
- системы заземления;
- полярность подключения устройств.

Рисунок 12.6-Система ODEN AT

Рисунок 12.7- Система ТМ 1600/МА 61

ТМ 1600/МА 61 – система измерения временного цикла выключателей (рисунок 1.7). Дискретные входы системы позволяют регистрировать время включения и отключения главных контактов, контактов резисторов и других вспомогательных контактов. Каналы являются независимыми, поэтому можно измерять временные характеристики контактов резисторов и последовательно соединенных камер выключателя, не разъединяя их.

Блок ТМ1600 обеспечивает 24 канала и более. Производит измерение аналоговых величин; падение напряжения; ток катушки, построение вибро-диаграммы хода контактов.

Микропроцессорный микроомметр МОМ 690 (рисунок 12.8) для измерения сопротивления контактов выключателей, разъединителей, предохранителей с ножевыми контактами, шинных соединений, линейных соединений и т.п.

Рисунок 12.8- Микропроцессорный микроомметр МОМ 690

Рисунок 12.9-Система Egil

Позволяет производить измерение, хранение и представление результатов с использованием микропроцессора. Выход переменного тока используется для быстрого и удобного размагничивания трансформаторов тока.

Система **Egil**(рисунок 12.9). Система предназначена для испытания выключателей среднего напряжения. Тестируются выключатели, имеющие только один главный контакт на фазу. Состояние контактов, оборудованных предварительно включенными резисторами, записывается и одновременно выводится на дисплей.

Вакуумный тестер Vidar(рисунок 12.10) предназначен для проверки состояния вакуумной камеры выключателя. В основу его работы положено известное соотношение между напряжением пробоя величиной вакуума. Позволяет подавать одно из шести напряжений в пределах от 10 до 60 кВ постоянного тока. При этом одно из значений напряжения устанавливается при заказе прибора пользователем. Состояние вакуумной камеры определяется по индикаторным лампам: зеленая лампа указывает на то, что камера исправна, а красная - нет. Вес прибора 6 кг.

Рисунок 12.10-Вакуумный тестер Vidar

Рисунок 12.11-Источник напряжения постоянного тока B10E

Приборы для испытания высоковольтных выключателей.

Источник напряжения постоянного тока B10E (рисунок 12.11) предназначен для определения работоспособности выключателей при различных уровнях напряжения на управляющих катушках. Имеет два источника напряжения переменного/постоянного тока для подачи напряжения на катушки управления и источник постоянного тока напряжения для питания двигателя моторного привода. Для измерения тока катушек электромагнитов включения и отключения прибор оснащен токовым шунтом 5А/50мВ.

Регистратор процессов включения/отключения выключателей TM1800 (рисунок 12.12) предназначен для осцилографирования динамических процессов выключателя.

Рисунок 12.12-Регистратор процессов включения/отключения выключателей ТМ1800

Регистратор позволяет регистрировать время замыкания и размыкания главных и вспомогательных контактов, разновременность замыкания и размыкания контактов, ход и скорость перемещения подвижной части, динамику изменения сопротивления контактной системы выключателя.

Рекомендованная литература: [4,6,7]

Контрольные вопросы:

1. Как проводиться диагностика токоведущих шин и контактных соединений?
2. Назовите виды и причины повреждения контактных соединений?
3. Анализ методов и средств диагностирования контактных соединений.
4. Как проводиться диагностика выключателей переменного и постоянного тока?
5. Назовите основные причины и виды повреждений выключателей переменного и постоянного тока?
6. Перечислите методы и средства диагностики выключателей переменного и постоянного тока.
7. Какие Вы знаете приборы для испытания высоковольтных выключателей?

13 ДИАГНОСТИКА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

13. Диагностика кабельных линий электропередач
13.1. Причины повреждения кабельных ЛЭП и виды отказов
13.2. Методы и средства диагностирования кабельных линий электропередач
13.4 Основные требования, предъявляемые к качеству электрической энергии и уровня напряжения

13 Диагностика кабельных линий электропередач

13.1 Причины повреждения кабельных ЛЭП и виды отказов

Причины повреждения кабельных ЛЭП:

-повреждения землеройными машинами (до 70 %);

- электрические пробои в кабельных соединительных муфтах;

- старение и износ изоляции, попадание влаги и коррозия металлической оболочки кабеля, усиливающаяся при появлении блуждающих токов.

Виды отказов кабелей - обрывы, короткие замыкания, замыкания на землю.

13.2 Методы и средства диагностики кабельных линий электропередач

Приборы для диагностики кабельных линий постоянно совершенствуют, однако все они основаны на нескольких известных методах, которые можно разделить на две группы - дистанционные и топографические.

Дистанционный метод позволяет определить расстояние от места подключения к кабелю средства диагностирования до точки повреждения.

Топографический метод позволяет непосредственно на местности, при движении вдоль трассы кабеля находить места повреждений.

Оба указанных метода дополняют друг друга. Вначале с помощью дистанционных методов приближенно определяют зону, в которой может находиться повреждение. Затем, применяя топографический метод, сужают место поиска. Такой порядок позволяет сократить до минимума крайне трудоемкие земляные работы при раскопке места повреждения.

Перед диагностированием поврежденного кабеля применяют специальную процедуру для усиления сигнала с места повреждения. Дело в том, что такое повреждение, как пробой изоляции, часто является перемежающимся отказом. При некоторых видах жирной пропитки изоляции напряжение пробоя дефектного участка кабеля может даже возрасти. Чтобы снизить переходное сопротивление в месте повреждения, применяют *прожигание* изоляции кабельной линии. Оно заключается в подаче на линию

напряжения от специального источника с целью образования проводящего мостика.

Процедура прожигания может длиться от нескольких минут до нескольких часов. Сопротивление уменьшается до нескольких десятков Ом - в сухом месте, порядка 2000 Ом - при расположении линии в мокром грунте. При повреждениях в муфте вообще не всегда удается добиться результата. Прожигание изоляции проводят переменным током (в резонансном и нерезонансном режимах), а также постоянным током.

Импульсный метод. Основан на посылке в поврежденную линию зондирующего электрического импульса и измерении времени между моментом подачи этого импульса и моментом прихода его отражения. Скорость распространения импульса в линии зависит от ее параметров (сечения и материала провода, типа изоляции, геометрических размеров). Импульс, посланный в линию, отражается от неоднородностей волнового сопротивления (рисунок 13.1).

Устройства, работающие по такому принципу - ИКЛ-4, ИКЛ-15, Р5-1А, Р5-8, Р5-9.

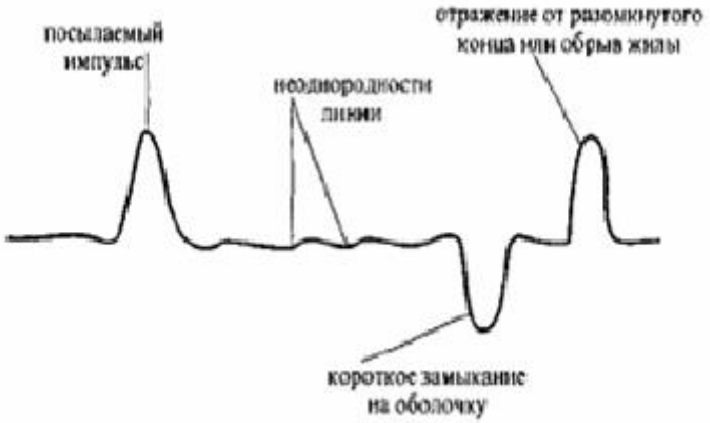


Рисунок 13.1- Осциллограмма импульсов

Метод колебательного разряда. Применяется для диагностирования повреждений, которые можно обнаружить только под действием испытательного напряжения (когда прожигание не дает результатов). Метод основан на измерении длительности переходного процесса, возникающего при пробое заряженного кабеля (рисунок 13.2).

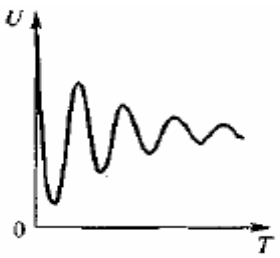


Рисунок 13.2- Осциллограмма напряжения при пробое заряженного кабеля

Чтобы наиболее точно определить расстояние до места повреждения, измеряют время только первого полупериода колебаний, подверженного в меньшей степени искажению и затуханию. Среднее значение скорости распространения начальных точек фронта волны для кабельных линий составляет около 160 м/мкс.

Процесс диагностирования состоит в подаче на поврежденную жилу кабеля плавно поднимаемого напряжения постоянного тока. Дефект изоляции вызывает пробой в месте повреждения, и в кабеле происходит колебательный разряд. Период колебаний связан с расстоянием до места пробоя соотношением

$$T = \frac{4L}{V}, \tag{13.1}$$

где L - расстояние до места пробоя; V - скорость распространения электромагнитных волн в кабеле.

По методу колебательного разряда работают приборы ЭМКС-58, Щ-4120.

Петлевой метод. Если в кабеле имеется хотя бы одна неповрежденная жила, а жилы с поврежденной изоляцией не имеют обрыва, то используют петлевой метод (рисунок 13.3).

С одной стороны к поврежденному кабелю подключают измерительный мост, с другой - устанавливают шунтирующую перемычку. Перемещением движка резистора R2 балансируют мост. Всего проводят два измерения, при втором меняют местами концы проводов, идущих от жил кабеля.

В первом случае (рисунок 13.3) расстояние определяют так:

$$L_X = \frac{2L \cdot R2}{R1+R2}. \tag{13.2}$$

Во втором случае,

$$L + L_Y = \frac{2L \cdot R'2}{R'1+R'2}. \tag{13.3}$$

Оба результата в сумме должны давать двойную длину кабеля, что является проверкой правильности измерений.

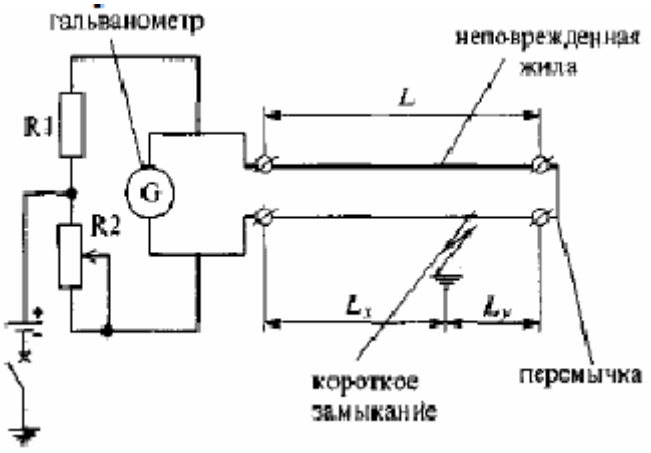


Рисунок 13.3- Схема петлевого метода

Индуктивный метод. Основан на улавливании магнитного поля над кабелем, по которому пропускается ток частотой 800...1200 Гц. Данный метод является топографическим (рисунок 13.4, а). Метод применим, если есть электрическое соединение двух жил кабеля. Датчиком служит катушка L. Наведенная в катушке ЭДС усиливается и подается на телефоны *WA*. Двигаясь вдоль трассы кабеля, можно зафиксировать колебания амплитуды сигнала (см. рисунок 13.4, б*)*. В общем случае колебания интенсивности сигнала могут быть вызваны разными, в том числе мешающими, факторами, например, разной глубиной залегания кабеля, неправильной структурой жил, экранированием трубопроводами и т. д. Место повреждения можно выявить по характерному усилению, а затем быстрому ослабеванию сигнала.

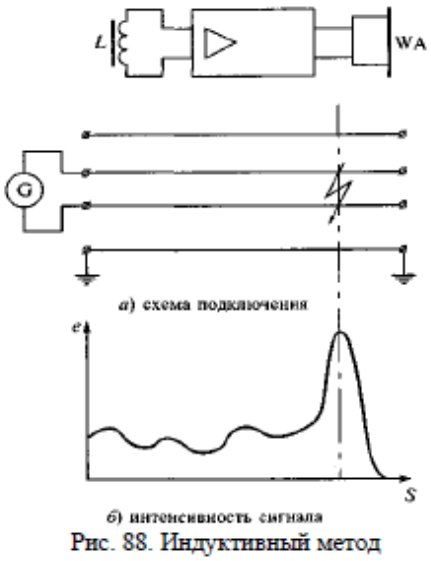


Рис. 88. Индуктивный метод

Рисунок 13.4- Индуктивный метод

Индукционном методе основана работа кабеле-искателей КТ-2, КТ-3, ПС-77, КАИ-77

Акустический метод. Основан на прослушивании над местом повреждения кабельной линии звуковых колебаний, создаваемых искровым разрядом в месте пробоя. Такой метод является топографическим (рисунок 13.5).

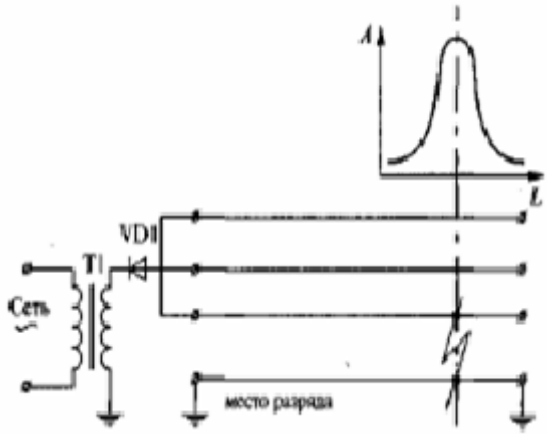


Рисунок 13.5- Акустический метод

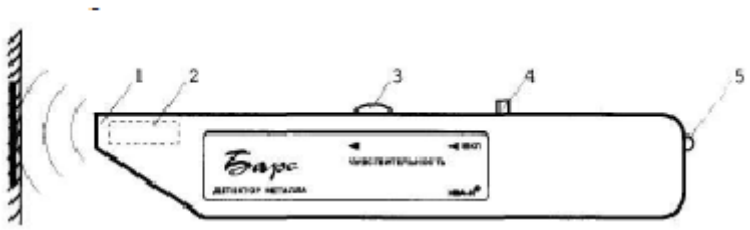
Поскольку энергия разряда велика, выделяется она в течение очень короткого промежутка времени. В месте пробоя происходит мощный акустический удар. Его звук можно услышать на поверхности земли при помощи простейшего стетоскопа, или используя специальные кабелеискатели, например, КАИ-73. Акустический метод применяется для диагностирования кабелей, находящихся глубоко под землей или в зоне сильных электромагнитных помех.

Для обнаружения срытой электропроводки и поиска металлических распределительных коробок используется детектор металла «Барс» (рисунок 13.6). Он имеет следующие характеристики:

- глубину обнаружения проводов в железобетонной стене, мм, до – 40;
- индикация режимов работы – световая;
- питание прибора, - один элемент R6 UM-3AA, В – 1.5
- масса прибора не более, кг – 0.15
- диапазон рабочих температур, 0С – от 0 – 40.

Рисунок 13.6- Детектор металла «Барс»

Поиск металла следует проводить, касаясь передней торцевой частью прибора поверхности стены. Там, где индикаторный светодиод изменит свой цвет с зеленого на красный, находится проводка. Схема прибора и методика его использования показаны на рисунок 13.7.



1 – корпус прибора
2 – катушка индуктивности
3 – регулятор чувствительности
4 – выключатель питания
5 – светодиод индикаторный

Рисунок 13.7- Схема прибора и методика использования

Локаторы серии **RD-4000** (рисунок 13.8) позволяют точно и быстро обнаруживать подземные коммуникации электрических кабелей, кабелей связи и оптоволоконные кабели.

Технические характеристики:

- до 16 мест локации;
- поиск мест повреждения изоляции;
- измерение силы тока;
- идентификация требуемой трассы путем определения направления сигнала.

Рисунок 13.8- Локатор RD-4000

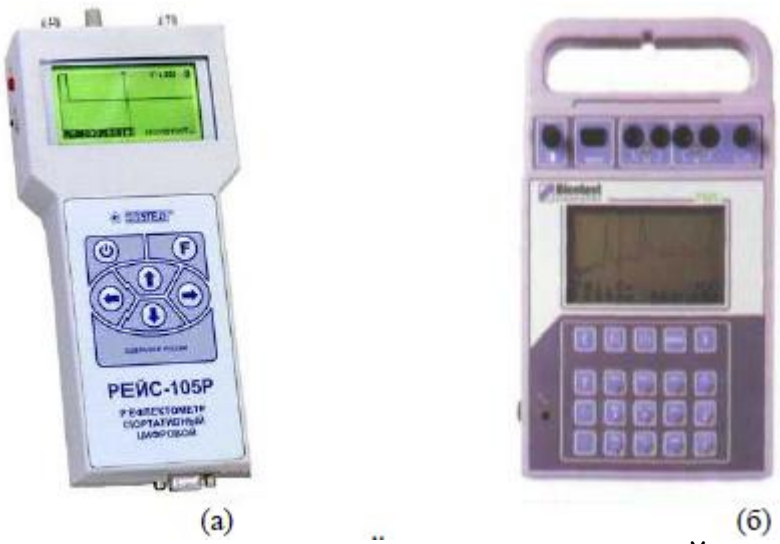
Локатор C.A.T. и генератор **Genny** (рисунок 13.9) универсальная система общецелевого назначения для определения положения кабелей.

Рисунок 13.9- Локатор С.А.Т. и генератор Genny

Имеет звуковой отклик, предоставляет возможность визуальной индикации уровня сигнала одновременно с измерением глубины залегания линии, снабжена съемным громкоговорителем для работы в условиях высокого шума.

SCM - система обнаружения натекания подземных блуждающих токов на трубопровод (рисунок 13.10). Оно может быть обусловлено влиянием систем катодной защиты посторонних трубопроводов и электрических железнодорожных линий. Система обеспечивает возможность картографирования распространения блуждающих токов. Позволяет быстро оценивать величины блуждающих токов без подключения к трубопроводу. Определяет участки трубопроводов, находящихся под воздействием блуждающих токов. Производит бесконтактное обнаружение неисправностей катодной защиты.

Рисунок 13.10- SCM- система обнаружения натекания подземных блуждающих токов



(а) (б)

Рисунок 13.11- Портативные рефлектометры РЕЙС-105Р и Т617/Т625/Т631/Lexxi Т810

Портативные рефлектометры. Портативный цифровой рефлектометр РЕЙС-105Р (рисунок 13.11,а) предназначен для обследования методом импульсной рефлектометрии (методом отраженных импульсов) электрических воздушных и кабельных линий связи, электропередачи, контроля, управления с целью обнаружения неисправностей, выявления их характера и определения расстояния до места повреждения, для определения длины кабеля (провода) в бухте (на барабане), а также для хранения результатов измерения с целью последующей обработки и документирования. Прибор аналогичен многим отечественным и зарубежным импульсным приборам для определения мест повреждения в кабельных линиях: Р5-1А, Р5-5, Р5-8, Р5-9, Р5-10, Р5-13, Р5-17, Р5-23, ИР-10М.

Прибор РЕЙС-105Р позволяет:

-обнаружить и точно определить расстояние до места повреждения и неоднородностей линий локационным методом (методом отраженных импульсов);

- в ручном или автоматическом режимах измерять длину линий и кабелей, в том числе на барабанах;

- измерять коэффициенты укорочения и записывать их во встроенную энергонезависимую память для последующего использования;

- работать совместно с компьютером.

Прибор может автоматически измерять длину линии или расстояние до короткого замыкания; упрощает определение нарушения изоляции и наличия повреждения в линии; обеспечивает возможность измерения коэффициентов укорочений линий и запоминания измеренных значений (до 64 коэффициентов) во встроенной памяти; запоминает до 200 рефлектограмм со встроенной памяти (время хранения не менее 10 лет) и позволяет обойтись при измерениях в полевых условиях без компьютера. Имеет возможность обмена информацией и управления от компьютера по интерфейсу RS-232.

Портативный рефлектометр T617/T625/T631/Lexxi T810 фирмы Bicotest(Англия) (рисунок 13.11,б) отличает простота использования и высокая надежность определения различных неисправностей кабелей – от короткого замыкания или обрыва до влажных соединений, а так же наличия отводов или несанкционированных подключений.

Приборы оснащены пылевлагонепроницаемым корпусом, ударопрочным ЖК-дисплеем высокого разрешения.

T617 - предназначен для локализации неисправностей в телекоммуникационных и силовых кабелях.

T625 имеет широкий диапазон измерения от 24 м до 20 км. Применим для любых типов металлических кабелей, включая силовые кабели под напряжением 600В постоянного тока или переменного тока частотой 50/60 Гц.

Рефлектометр T631 предназначен для локализации повреждений коаксильных кабелей в электроэнергетике и кабелях систем кабельного телевидения.

Lexxi T810 предназначен для поиска неисправностей кабелей. Может быть использован при локации, как на небольших, так и на значительных расстояниях любых типов металлических кабелей. Простое переключение режимов работы обеспечивает возможность локации сетей кабельного телевидения, телекоммуникационных и цифровых линий передачи информации, кабелей витая пара, а так же коаксильных кабелей с импедансом 75 и 50 Ом.

13.4 Основные требования, предъявляемые к качеству электрической энергии и уровня напряжения

Цель функционирования системы электроснабжения - обеспечение энергией электрического подвижного состава и нетяговых потребителей.

Цель достигается выполнением задач:

-преобразования электрической энергии;

- передачи электроэнергии потребителю;

- защиты от аварийных режимов;

- поддержания параметров в заданных пределах.

При функционировании системы электроснабжения достигаются определенные цели. Количественная мера, измеряющая степень соответствия результатов функционирования целям, называется ***показателем эффективности*** функционирования системы электроснабжения. Он должен:

- объективно характеризовать систему;

- иметь прямую связь с целевым назначением системы;

- быть чувствительным к изменению основных параметров системы;

- должен быть достаточно простым и удобным для его вычисления, измерения и изображения.

Система электроснабжения работает в условиях действий случайных факторов, поэтому значения показателей эффективности являются случайными величинами, или случайными функциями.

Для системы электроснабжения показателем эффективности является ***количество переработанной электроэнергии*** в единицу времени у потребителя:

$$W_{Э}^{П} = \sum_{i=1}^{N} A_i, \qquad (13.1)$$

где A_i – количество электроэнергии, получаемой i-тым потребителем; N – число потреблений.

Этот показатель определяет нагрузку на элементы системы электроснабжения а, следовательно, и скорости протекания процессов деградации. Можно рекомендовать и другие показатели.

Коэффициент полезного действия определяется состоянием элементов системы, экономичностью преобразования и распределения электрической энергии:

$$\Theta = \frac{\sum_{i=1}^{N} A_i}{A_\varepsilon}, \qquad (13.2)$$

где A_ε- количество электроэнергии, потребляемое системой электроснабжения на ее входе.

Показатели качества электрической энергии для сетей постоянного тока:

Отклонения напряжения

$$V = \frac{U - U_H}{U_H} \cdot 100\%, \qquad (13.3)$$

где U- действительное значение напряжения; U_H - номинальное напряжение.

Колебания напряжения

$$V_t = \frac{U_{MAX} - U_{MIN}}{U_H}, \qquad (13.4)$$

где U_{MAX} и U_{MIN} соответственно максимальное и минимальное значения напряжений.

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения.

Для однофазного переменного тока к этим показателям добавляются:

- отклонения частоты;
-не синусоидальность формы кривой напряжения.

Для системы трехфазного тока дополнительно введены:

-не симметрия напряжения;
- отклонение нейтрали.

Для контактной сети применяют следующие показатели качества токосъема:

- коэффициент относительного изменения контактного нажатия;
- максимальная переменная составляющая контактного нажатия;
- коэффициент отрыва токоприемника, равный отношению продолжительности отрывов ко времени наблюдения;
- среднее квадратическое отклонение контактного нажатия;
- максимальный размах вертикальных перемещений контактного провода;
-отжатие контактного провода.

Наличие нескольких показателей эффективности функционирования системы представляет собой одну из трудностей ее анализа. Другая трудность заключается в необходимости выражения показателя эффективности функционирования системы через характеристики функционирования элементов. Эти характеристики являются частными показателями. Они свидетельствуют, насколько хорошо функционирует элемент, но не дают представления о вкладе, который данный элемент вносит в достижение целей, стоящих перед системой в целом. Например, трудно судить по количеству переработанной электроэнергии о вкладе дистанции электроснабжения в провозную способность отделения дороги. По показателям качества токосъема трудно судить о количестве переработанной электроэнергии. Поэтому при оценке функционирования *k-го*элемента (или подсистемы) часто в качестве основных показателей используют ***приращение показателя эффективности системы***, получаемое за счет функционирования этого элемента:

$$\Delta W_l^k = W_l^{p(k)} - \mathrm{W}_\mathrm{l}^{\mathrm{o(k)}}, \qquad (13.5)$$

где $W_l^{p(k)}$ - *l -й* показатель эффективности системы; $W_l^{o(k)}$- *l* -й показатель эффективности системы при условии, что *k*-й элемент не участвует в достижении *l-й* цели системы, но все ресурсы системы распределены между остальными подсистемами оптимальным образом.

В качестве интегрального показателя эффективности функционирования систем электроснабжения предлагается использовать стоимость переработки одного киловатт-часа С (раздельно для тяговых и нетяговых потребителей), получаемого делением расходов предприятия на количество электроэнергии, полученной потребителями:

$$C = \frac{P}{\sum_{i=1}^{n} A_i}, \qquad (13.6)$$

Предложенный показатель полностью отвечает требованиям, приведенным выше. Для его определения могут быть использованы частные показатели эффективности.

Важной является задача нормирования показателей эффективности. В рассматриваемом случае в качестве нормативного показателя можно использовать тариф на переработку одного киловатт-часа $T_{П}$. Величина тарифа должна стимулировать использование научно-технических достижений, повышение производительности труда, рациональное использование сырья, материалов и энергетических ресурсов, повышение качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

Рентабельность переработки электроэнергии *P*определяется отношением чистого дохода $(T_n - C) \cdot \sum_{i=1}^{n} A_i$ к расходам на переработку $C \cdot \sum_{i=1}^{n} A_i$:

$$P = \frac{\mathrm{Т_П - С}}{\mathrm{С}}, \qquad (13.7)$$

В расходах должны учитываться стоимость потерь электроэнергии в устройствах электроснабжения, стоимость электроэнергии на собственные нужды, фонд оплаты труда с начислениями, налоги, амортизационные отчисления, прочие эксплуатационные расходы и т.д.

В настоящее время систематических исследований по оценке эффективности функционирования системы электроснабжения практически не имеется.

Средства измерения переменного тока. Токоизмерительные клещи типа Ц90 (рисунок 13.12) предназначены для измерения переменного тока частотой 50Гц без разрыва цепи в высоковольтных сетях (до 10кВ).

Принцип действия состоит в том, что измерение тока производится с помощью трансформатора тока, вторичная обмотка которого замыкается на измерительную схему. Причем роль первичной обмотки трансформатора играет шина или провод с измеряемым током. Измеряемый переменный ток, проходя по шине, охваченной разъемным магнитопроводом, создает в последнем переменный магнитный поток, который индуктирует ЭДС во вторичной обмотке, расположенной на магнитопроводе. Вторичная обмотка замыкается на сопротивление, играющее роль шунта, падение напряжения на котором измеряется детекторным милливольтметром. Количество шунтируемых сопротивлений равно числу пределов измерения. Переключение пределов измерения производится с помощью рычажного переключателя.

Магнитопровод трансформатора тока состоит из двух половинок. Материал магнитопровода-листовая электротехническая сталь марки Э4А, подвергнутая после сборки в пакет и склепки специальному отжигу для получения необходимых магнитных свойств. Обе половинки магнитопровода в местах стыка точно пришлифованы друг к другу.

Левая половинка магнитопровода укреплена в литой силуминовой вилке неподвижно, правая половинка качается вокруг неподвижной оси на небольшой угол. Вилки сочленяются шарниром. Посредством сильной

спиральной пружины, укрепленной своими концами на обеих вилках, обе половинки магнитопровода плотно смыкаются, оставляя в стыке пакетов железа магнитопровода минимальный зазор. На левой половинке магнитопровода размещен каркас из пластмассы с намотанной на нем вторичной обмоткой. На каркас одевается чехол из пластмассы, предохраняющий от повреждения обмотки.

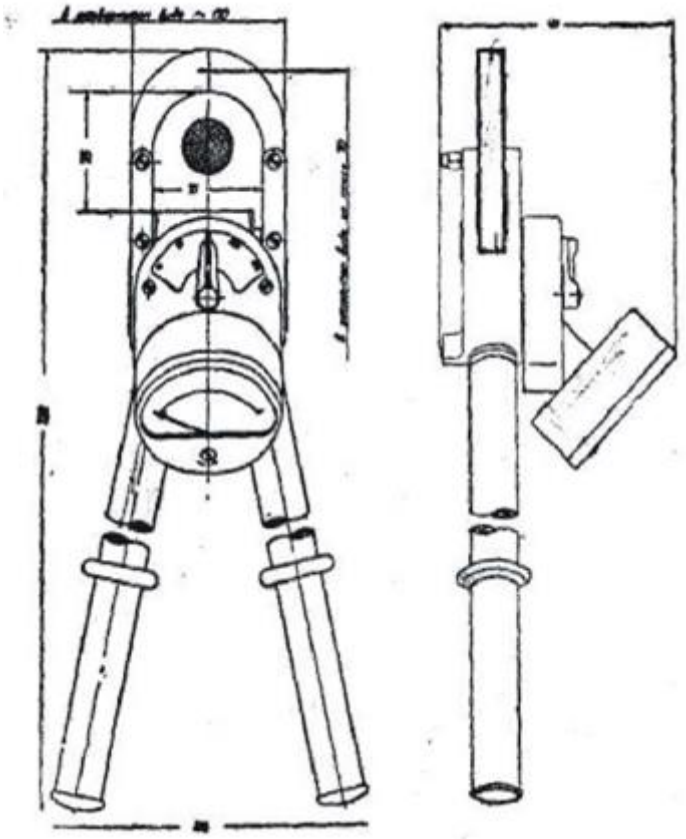


Рисунок 13.12-Токоизмерительные клещи

На левой вилке укреплена коробка из пластмассы, на основании которой размещены подгоночные сопротивления (реохорды) и шунты.

Внутри коробки размещен также пятипредельный переключатель рычажного типа, ось которого выведена на лицевую часть коробки. На оси переключателя закреплена пластмассовая ручка, указатель которой фиксирует выгравированные на крышке надписи: “15”; “30”; “75”; “300”; “600”, дающие возможность судить о включенном в данный момент пределе измерения прибора. Надписи залиты белой краской. В нижней части коробки расположены специальные штепсельные гнезда для штырей измерительного прибора.

Измерительный прибор имеет круглую форму. Материал корпуса - пластмасса. Снаружи на заднюю часть корпуса прибора надет цилиндрический кожух из тонколистового железа для экранировки измерительного механизма. В качестве измерительного механизма использован механизм прибора М24.

Шкала имеет одну дугу, отградуированную от нуля до 15А. При измерении на каждом из пределов отсчет производится с помощью умножения показания прибора на соответствующий множитель.

Элементы мостовой схемы прибора размещены на основании корпуса.

В качестве выпрямителей применены германиевые диоды типа Д2В.

На основании корпуса прибора расположены контактные штыри, посредством которых прибор соединяется с клещами при работе и отсоединяется от клещей при транспортировке и хранении.

На вилках клещей укреплены две съемные рукоятки из бакелитовых трубок, которые делятся ограничительными резиновыми кольцами на изолирующую часть и захват-ручку.

Перед началом работы необходимо осмотреть бакелитовые ручки клещей. При наличии трещин, забоин и других повреждений поверхности трубок пользоваться клещами нельзя. Если порядок величины измеряемого тока известен, то переключатель ставится в положение» соответствующее этой величине, после чего провод с измеряемым током охватывается клещами. В том случае, когда порядок величины измеряемого тока неизвестен, измерение следует начинать с высшего предела 600А. В момент измерения нельзя нажимать на рукоятки, осуществляющие разъем клещей, так как при этом между половинками железного пакета образуется зазор и снижается точность измерения. При измерении отсчет производится на каждом из пределов с помощью умножения показания прибора на соответствующий множитель. Переключение пределов измерения при одетых на токопровод клещах категорически запрещается. Переключение пределов следует производить только после снятия клещей с токопровода. Переключение пределов при одетых на токопровод клещах опасно для жизни.

Бесконтактный сигнализатор напряжения (СН) "ИВА-Н" (рисунок 13.13) предназначен для работы в электроустановках частотой 50 Гц. Прибор на расстоянии предупреждает работающего световой и звуковой сигнализацией о наличии напряжения на токоведущих частях.

Рисунок 13.13- Бесконтактный сигнализатор (СН) «ИВА-Н»

СН "ИВА-Н" позволяет с земли или с опоры определять наличие напряжения в воздушных линиях электропередачи 6 кВ и выше. С помощью СН "ИВА-Н" можно также контролировать исправность защитного заземления у включенного электрооборудования, устанавливать расположение скрытой проводки, находящейся под напряжением 220 В, проверять правильность монтажа выключателей электроосвещения и др. СН "**ИВА-Н**" имеет следующие характеристики:

Габаритные размеры, мм 130х52х22;

Масса, не более, г 120;

Продолжительность работы (дежурный режим), не менее, ч 100;

Температурный диапазон, °С -20 ...+40;

Питание СН – автономное от двух элементов R6 - AA-UM3 (A316), В 3.

Прибор "**ИВА-Н**" оснащен системами световой и звуковой сигнализации, а также устройством контроля работоспособности.

Световая сигнализация осуществляется с помощью пяти светодиодов, четыре из которых расположены на лицевой панели в линию и один на нижнем торце. Число горящих светодиодов пропорционально напряженности электрического поля. В дежурном режиме горит нижний светодиод на лицевой панели, и генерируются редкие звуковые сигналы. При определении с земли наличия напряжения на проводах воздушной линии с помощью СН "ИВА-Н" следует располагаться на участках, где расстояние от проводов до земли близки к наименьшим допускаемым. Прибор должен находиться в руке выше головы. При работе вне помещения в солнечную погоду наличие напряжения контролируется по звуковой сигнализации и светодиоду в нижнем торце корпуса СН. При приближении к незаземленному корпусу включенной электроустановки, СН "ИВА-Н" срабатывает на расстоянии большем, чем при приближении к отдельному проводу. Если же заземление исправно, то сигнализатор на расстоянии 10-15 мм от корпуса будет оставаться в дежурном режиме.

Указатель напряжения двухполюсный универсальный УНН "Комби" (рисунок 13.14) со звуковой и световой индикацией предназначен для контроля напряжения в цепях постоянного тока до 500В и переменного тока частотой 50 Гц до 380В при работе в электроустановках. УНН "Комби" может быть использован в качестве однополюсного для определения фазных проводов в сетях 380/220В и 220/127В, а также для проверки целостности электрической цепи, определения рода тока и полярности постоянного напряжения.

Указатель напряжения универсальный УНН "Комби" позволяет проводить следующие операции:

- определение фазного и нулевого проводов;
- оценку уровня переменного напряжения (12, 220, 380 В);
- определение наличия и полярности постоянного напряжения;
- проверку целостности ("прозвонку") электрической цепи, проверку диодов.

Указатель напряжения УНН "Комби" имеет следующие технические характеристики:

- напряжение индикации более, В
- однополюсный – 90,
- двухполюсный -12;
- питание указателя, один элемент R6-UM-3AA, В - 1,5;
- масса указателя не более, кг - 0.2;
- длина соединительного провода, не менее, м – 1.0;
- индикация режимов работы - световая, звуковая;
- диапазон рабочих температур, °С - (0 – 40).

УНН «Комби» не имеет переключателей режимов работы, оснащён устройством самоконтроля работоспособности. При отсутствии элемента питания УНН «Комби» сохраняет функции проверки наличия напряжения, определения рода тока, нахождения фазного провода.

Наличие и уровень напряжения или его отсутствие с помощью УНН «Комби» определяется по свечению индикаторов уровня напряжения "~12В", "~120В", "~380В" и звуковой сигнализации. При отсутствии напряжения ни один из индикаторов уровня не горит.

Индикаторы, обозначенные знаками "+" и "-", позволяют определить род тока и полярность постоянного напряжения. Одновременное свечение обоих индикаторов указывает на наличие переменного напряжения.

Рисунок 13.14- Указатель напряжения универсальный (УНН) «Комби»

При использовании указателя УНН "Комби" в качестве однополюсного для определения фазных и нулевого проводов в цепи переменного тока, контактный наконечник указателя должен касаться контролируемого провода. Свечение соответствующих индикаторов и звуковая сигнализация указывают на наличие потенциала более чем на 90В отличающегося от потенциала "земли".

При "прозвонке" электрической цепи в случае наличия гальванической связи (целостности) срабатывают световой и звуковой индикаторы.

Анализатор параметров качества электроэнергии (рисунок 13.15) предназначен для измерения и регистрации показателей качества электроэнергии по стандартам ГОСТ 13109-97, EN 50160.

Рисунок 13.15- Анализатор параметров качества электроэнергии

Применяется для измерения и регистрации основных показателей энергопотребления в однофазных и трехфазных сетях. Позволяет измерять действующие значения напряжений и токов при синусоидальной и искаженной формах кривых, активной, реактивной и полной электрической мощности и энергии. Область применения:

-обследование потребителей электроэнергии (энергоаудит);

- технологический контроль и анализ качества электроэнергии на узлах учета;

- комплектация систем управления энергопотреблением и качеством электроэнергии;

- поиск источников возмущений в сетях.

Рекомендованная литература: [4,6,7]

Контрольные вопросы

1. Как проводиться диагностика кабельных линий электропередач?
2. Назовите причины повреждения кабельных ЛЭП и виды отказов?
3. Перечислите методы и средства диагностики кабельных линий электропередач.
4. Перечислите основные требования, предъявляемые к качеству электрической энергии и уровня напряжения.
5. Что является показателем эффективности для системы электроснабжения?
6. Область применения анализатора параметров качества электроэнергии.

14 ДИАГНОСТИРОВАНИЕ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

14. Диагностирование релейно-контактных устройств автоматики и телемеханики
14.1. Виды отказов релейно-контактных схем
14.2. Основные способы диагностирования релейно-контактных схем и комплексов телемеханики
14.2.1. Проверка исправности электрического монтажа
14.2.2. Проверка исправности релейно-контактных схем
14.3 Диагностика параметров работы рельсовых цепей
14.3.1. Назначение рельсовых цепей
14.3.2. Характерные неисправности рельсовых цепей
14.3.3. Средства и способы диагностирования параметров работы рельсовых линий

14 Диагностирование релейно-контактных устройств автоматики и телемеханики

14.1 Виды отказов релейно-контактных схем

Релейно-контактные схемы, широко применяемые в устройствах ЖАТС, состоят из контактов и обмоток реле и соединительных проводов. Контакты имеют два вида неисправностей: короткое замыкание - цепь остается замкнутой независимо от состояния реле; разрыв контакта - цепь остается разомкнутой независимо от состояния реле.

Обмотки реле также имеют два вида неисправностей (к ним относятся и неисправности механических элементов реле). При обрыве обмотки реле не включается, когда оно должно включаться. Причинами могут быть обрыв обмотки, межвитковые замыкания в ней, механические повреждения подвижных частей. При этом нормально замкнутые (размыкающие контакты) остаются замкнутыми, а нормально разомкнутые (замыкающие) контакты – разомкнутыми. При ложном включении обмотки, реле включается, когда оно не должно включаться. Причинами этого могут быть соединение обмотки с источником питания, залипание или заклинивание якоря, сваривание замыкающих контактов. При этом размыкающие контакты размыкаются, а замыкающие контакты замыкаются.

Неисправность «обрыв обмотки» эквивалентна кратной неисправности, в которую входят короткие замыкания всех размыкающих контактов и разрыв всех замыкающих контактов. Соответственно неисправность «ложное включение обмотки» эквивалентна кратной неисправности, включающей в себя короткие замыкания всех замыкающих контактов и разрыв всех размыкающих контактов. Данное обстоятельство позволяет выявлять неисправности обмоток теми же способами, что и неисправности контактов, а в большинстве схем вообще рассматривать только неисправности контактов.

Кроме рассмотренных неисправностей, возможны три вида неисправностей соединительных проводов: обрыв, ложное соединение проводов, перепутывание соединений (неправильный монтаж). Обрывы соединительных проводов эквивалентны соответствующим неисправностям типов разрыв контакта и обрыв обмотки.

14.2 Основные способы диагностирования релейно-контактных схем и комплексов телемеханики

На практике часто используют такой принцип проверки релейно-контактных схем. Сначала проверяют исправность монтажа схемы, а затем в схему включают реле и проверяют контакты и обмотки реле.

14.2.1 Проверка исправности электрического монтажа

Электрический монтаж есть совокупность монтажных выводов и линий. Под монтажным выводом понимается контакт электрического монтажа, доступный для подключения внешних цепей, а под монтажной линией – физический проводник, имеющий сопротивление не выше нормативного, не зависящее от направления протекающего тока. Монтажной группой называют совокупность монтажных выводов, соединенных линиями в произвольном порядке. Электрический монтаж содержит 10 монтажных выводов, шесть монтажных линий и четыре монтажные группы (рисунок 1.1)

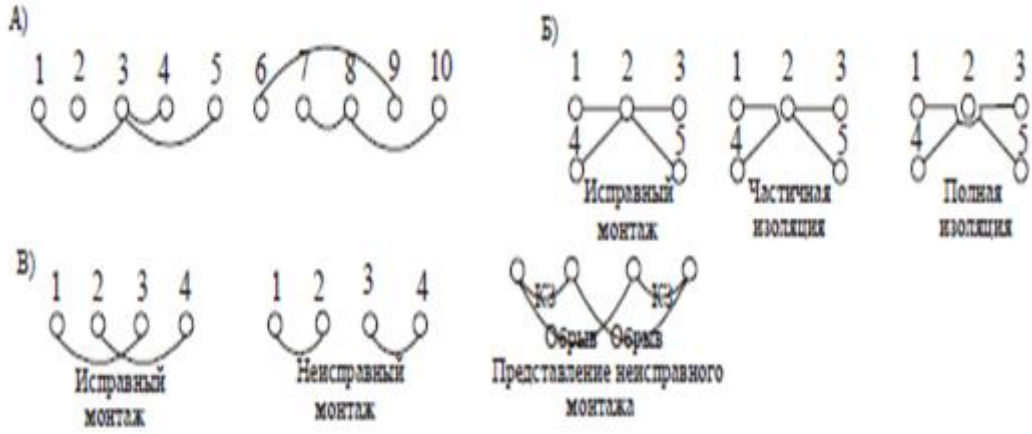


Рисунок 14.1- Примеры электрического монтажа (а) и неисправностей «перепутывание проводов (в), изоляция клеммы (б)»

В монтаже возможны следующие виды неисправностей: обрыв монтажной линии, короткое замыкание между монтажными выводами, перепутывание проводов (неправильный монтаж), полная или частичная изоляция вывода. Два последних вида неисправностей сводятся к соответствующей комбинации обрывов и короткого замыкания. Неисправность вида «перепутывание проводов» представлена двумя короткими замыканиями и двумя обрывами. Неисправность типа «полная

изоляция» вывода представлена как комбинация шести коротких замыканий и четырех обрывов (рисунок 14.1).

Задача полной проверки монтажа состоит в обнаружении любой комбинации коротких замыканий и обрывов.

Неисправность в электрическом монтаже обнаруживается последовательной проверкой. Проверка заключается в измерении электропроводимости участка цепи между парой выводов.

Задача обнаружения обрывов может быть решена с помощью измерения проводимости между каждыми двумя выводами. При этом требуется $\mathbf{C_p^2}$ измерений для схемы, содержащей **p** выводов, соединенных между собой произвольным образом. Другой метод проверки состоит в измерении проводимости между одним из выводов (например, вывода 1) и каждым другим выводом, т.е. в испытании пар (1, 2), (1,3), (1,4), …, (1,p). В этом случае требуется **p-1** проверок. Использование меньшего числа измерений не обеспечивает полную проверку группы на обрывы.

Задача проверки отсутствия КЗ между группами может быть решена только одним способом – за счет измерения проводимости между каждыми двумя группами. В монтажной схеме содержащей **m** групп, не соединенных между собой, требуется $\mathbf{C_m^2}$ измерений.

Метод проверки монтажа, основанный на диаграммах Феррера. Электрический монтаж может быть представлен в виде диаграммы. Диаграмма состоит из **m** строк, каждая из которых соответствует одной из монтажных групп (рисунок 1.2). Группы располагаются в порядке убывания числа выводов. Соединения между выводами не показываются.

Рисунок 14.2. Схемы обнаружения обрывов(а) и короткого замыкания(б)

Для обнаружения обрывов (рисунок 14.2,а) необходимо в каждой группе измерить проводимости между первым и остальными выводами. С помощью наложения соединений между группами можно каждое измерение выполнять во всех группах одновременно. При этом требуется $l_з = p_{max} - 1$ измерений, где p_{max} – наибольшее число выводов в одной группе. Первое измерение контролирует проводимость между первым и вторым выводом в первых трех группах, второе измерение – между первым и третьим выводами в первых двух группах и третье – между первым и четвертым выводами в первой группе.

При обнаружении короткого замыкания (рисунок 14.2,б) устанавливают дополнительные соединения между выводами в одной группе, что обеспечивает обнаружение любой комбинации обрывов и КЗ. Все монтажные группы объединяются в две изолированные общие группы, измерение проводимости между которыми позволяет обнаруживать КЗ между любыми монтажными группами, входящими в разные общие группы. Последние должны быть образованы таким образом, чтобы любые две монтажные группы в каком-либо из случаев находились в разных общих группах. При этом достаточно выполнить $l_4 = [\log_2 m]$измерений. Монтажные группы нумеруются двоичными числами с числом разрядов $l_4 = [\log_2 m]$. Столбец одного разряда, образованный всеми числами, соответствует варианту образования общей группы. При этом объединяют те монтажные группы, которым в столбце соответствует одно и то же значение разряда.

14.2.2 Проверка исправности релейно-контактных схем

Для релейно-контактных схем при построении проверяющих тестов используют метод цепей и сечений. Под цепью понимают набор состояний контактов, которые обеспечивают наличие цепи проводимости между полюсами схемы. Например, схема (рисунок 14.3) содержит три цепи $G_1 = a\overline{b_1} G_2 = c_1\overline{b_1}$и $G_3 = b_2\overline{c_2}$. Под сечением понимается набор состояний контактов, которые обеспечивают разрыв всех цепей схемы.

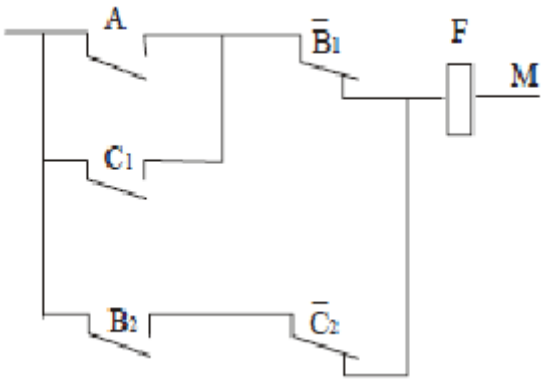


Рисунок 14.3- Релейно-контактная схема

Рассматриваемая схема имеет четыре сечения: $H_1 = \overline{ac_1b_2}, H_2 = \overline{ac_1}c_2,$ $H_3 = b_1\overline{b_2}$ и $H_4 = b_1c_2$. Перечисление всех цепей и сечений задает схему.

Для того чтобы проверить некоторый контакт «а» на отсутствие неисправности типа «Разрыв», необходимо обеспечить наличие какой-либо цепи, содержащей этот контакт, и обрыв всех других цепей, в которые не входит данный контакт. Тогда при отсутствии неисправности схема будет замкнута, а о наличии неисправности будет свидетельствовать разомкнутое состояние схемы. Для проверки на разрыв контакта «а» необходимо создать

цепь $G_1 = a\overline{b_1}$ две другие цепи $G_2 = c_1\overline{b_1}$и $G_3 = b_2\overline{c_2}$ разорвать. Цепь$G_2 = c_1\overline{b_1}$необходимо разорвать на контакте C_1, а цепь $G_3 = b_2\overline{c_2}$ разорвать на любом контакте. Тогда при разрыве контакта «а» будут разомкнуты все цепи, вследствие чего схема будет находиться в разомкнутом состоянии вместо замкнутого, чем и будет зафиксирована неисправность.

При проверке контакта «а» на *КЗ* необходимо обеспечить разрыв всех цепей схемы и наличие хотя бы одной цепи, разорванной только на данном контакте. Тогда при отсутствии неисправности схема будет разомкнута, а о наличии неисправности будет свидетельствовать замкнутое состояние схемы. Для проверки контакта C_1на *КЗ* необходимо обеспечить разрыв цепи $G_2 = c_1\overline{b_1}$ только на контакте C_1, а разрыв остальных цепей на любых контактах. Тогда при КЗ контакта C_1 из всех цепей замкнется только цепь $G_2 = c_1\overline{b_1}$, вследствие чего схема будет находиться в замкнутом состоянии вместо разомкнутого, чем и будет зафиксирована неисправность

Приборы для диагностирования релейно-контактных схем. Sverker 760 (рисунок 14.4) - прибор тестирования релейных защит вторичным током, предназначен для тестирования всех типов однофазной защиты, а также пофазно - трехфазной защиты.

Рисунок 14.4-Sverker 760- прибор тестирования релейных защит вторичным током

Прибор позволяет измерять ток, напряжение, время, импеданс, мощность и фазовый угол. Результаты измерений выводятся на встроенный дисплей. Прибор позволяет проводить построение кривых намагничивания, определять коэффициент трансформации, измерять нагрузки, проводить проверку полярности (направления).

14.3 Диагностика параметров работы рельсовых цепей

14.3.1 Назначение рельсовых цепей

Рельсовые цепи являются основным элементом всех устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, выполняющим функции датчиков информации о местоположении подвижного состава и используемым в качестве телемеханических каналов для передачи информации между путевыми и поездными устройствами. Рельсовая цепь представляет собой линию с очень низким сопротивлением изоляции между токоведущими рельсами, изменяющимся в широких пределах, и большой проводимостью по отношению к земле. Кроме того, такая линия работает в особых условиях, определяемых наложением переменного шунта в виде колесной пары подвижных единиц, что обусловливает специфику ее технического обслуживания и измерений.

14.3.2 Характерные неисправности рельсовых цепей

Особенность рельсовой цепи состоит в том, что ее элементы пространственно разобщены. Часть элементов расположена на посту, где имеются хорошие условия для наблюдения и измерений. Другая часть элементов находится на поле, где измерения и наблюдения затруднены. С другой стороны, отказы постовой аппаратуры составляют незначительную часть от общего числа отказов рельсовой цепи и имеют меньшую вероятность возникновения. Большинство отказов рельсовой цепи связано с повышением затухания рельсовой линии, которое происходит в результате обрывов стыковых соединителей и джемперов, нарушения изоляции изолирующих стыков, понижения сопротивления балласта, замыкания между рельсами и других повреждений напольной аппаратуры.

14.3.3 Средства и способы диагностирования параметров работы рельсовых цепей

При эксплуатации рельсовые цепи осматривают и вольтметром измеряют напряжение между рельсами в конце каждого звена. При исправной рельсовой цепи показания вольтметра будут изменяться плавно; резкое изменение напряжения, измеряемого между соседними звеньями, указывает на низкое сопротивление балласта или неисправность стыковых соединителей. Одновременно измеряют и сопротивление изолирующего стыка, которое должно быть не менее 30 Ом. При измерениях необходимо учитывать наличие помех от соседних рельсовых цепей или других источников. Эти помехи можно обнаружить вольтметром, подключив его в середине рельсовой цепи при отключенном источнике питания.

Параметры рельсовых цепей измеряют в интервалах между движущимися поездами. На электрифицированных участках, где при измерениях требуется отключать дроссели-трансформаторы, необходимо

отключить напряжение с контактной сети или закрыть движение по данному пути. Необходимо убедиться и в том, что токи с других путей не проходят через рельсовую цепь, в которой отключался дроссель-трансформатор.

Измерительные приборы, как правило, подключают к зажимам кабельных стоек, а вольтметры и вольтметровые обмотки фазометров - непосредственно к рельсовым нитям. Внутреннее сопротивление вольтметра должно быть не менее 100 Ом на 1 В шкалы прибора, а длина рельсовой нити измеряется с точностью до 1,0 м.

Проверка состояния изолирующих стыков. Состояние изолирующих стыков контролируется в основном измерением "рельс - накладка". Нормативное сопротивление изоляции 50 Ом, поэтому сопротивление изоляции накладки можно проверять вольтметром с внутренним сопротивлением 50 Ом. При отсутствии такого прибора параллельно входу высокоомного вольтметра устанавливают резистор сопротивлением 51 Ом. При автономной тяге измерение сопротивления изоляции первого стыка (рисунок 14.4) сводится к определению напряжений.

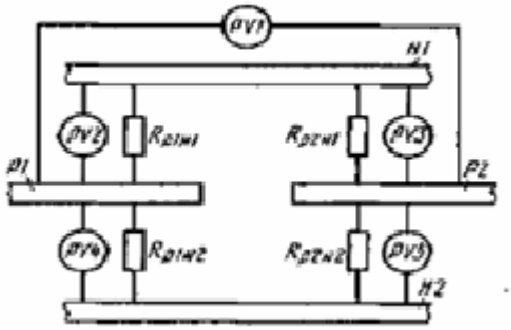


Рисунок 14.4 - Схема измерения сопротивления изоляции «рельс-накладка»

Аналогично определяют исправность изоляции второго стыка. Указанный метод измерения основан на том, что напряжение между рельсовыми нитями прикладывается к последовательной схеме из сопротивлений измерительного вольтметра (51 Ом), подключенного к одной из рельсовых нитей и накладке, и сопротивления изоляции между этой накладкой и противоположным рельсом. При этом, чем больше сопротивление изоляции между накладкой и рельсом, тем меньше напряжение на измерительном вольтметре, подключенном между этой накладкой и противоположным рельсом.

В однониточных рельсовых цепях исправность изолирующих стыков проверяют по схеме (рисунок 14.5) с использованием вольтметра, внутреннее сопротивление которого 51 Ом. Исправность изоляции в изолирующем стыке сохраняется при условии

$$U_{P1H1} < 0.5U_C, U_{P1H2} < 0.5U_C, U_{P2H1} < 0.5U_C \text{ и } U_{P2H2} < U_C, \quad (14.1)$$

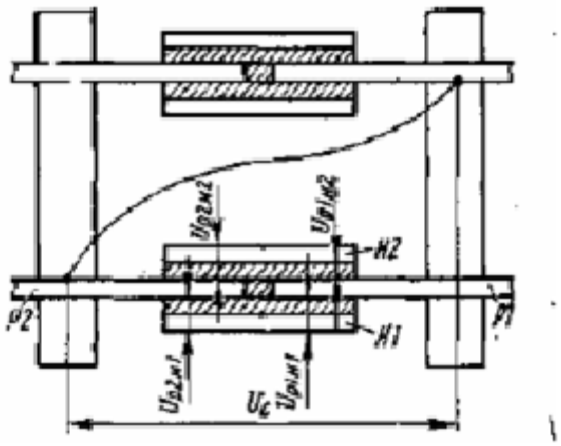


Рисунок 14.5- Схема проверки изолирующих стыков в однониточных рельсовых цепях

Сопротивление изоляции изолирующего стыка в цепи "рельс - накладка" определяют по схеме (рисунок 14.6). При использовании источника постоянного тока GB напряжением 8 - 9В вольтметром PV измеряют напряжение U, а амперметром - ток I (см. рисунок 14.6, а).

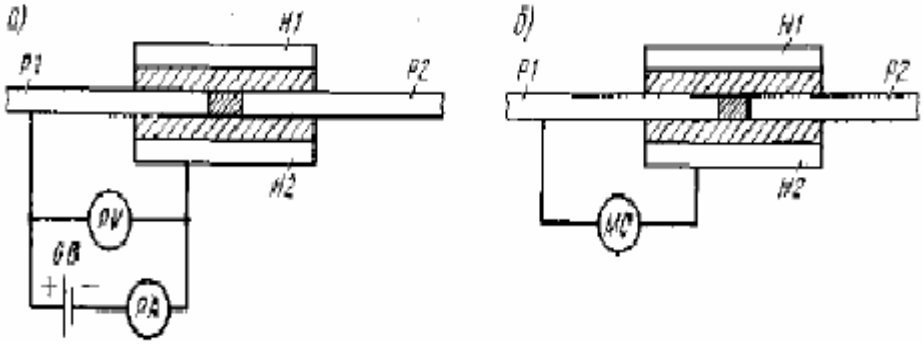


Рисунок 14.6- Схема измерения изоляции стыков с помощью вспомогательного источника постоянного тока (а) и измерителя сопротивления (б)

Затем по отношению U/I вычисляют сопротивление изоляции цепи "накладка - рельс". При электротяге постоянного тока необходимо выполнить дополнительное измерение, изменив порядок подключения проводников. Окончательный результат будет равен среднему значению результатов двух измерений. Для измерения сопротивления изоляции можно использовать и измеритель сопротивления МС типа МС-07 (08) или М16 (рисунок 14.6, б).

Состояние изолирующих элементов сережек остряков, стрелочных гарнитур, стяжных полос и распорок проверяют вольтметром с внутренним сопротивлением 51 Ом. При проверке состояния изолирующих элементов сережек остряков и стрелочных гарнитур (рисунок 14.7, а)

измеряют напряжение между рельсами $U_р$, а затем напряжения между связной тягой и рельсами $U_{тр1}$ и $U_{тр2}$. Если $U_{тр1} \geq 0{,}5U_р$, то неисправна изоляция со стороны второго рельса, если же $U_{тр1} < 0{,}5U_р$ и $U_{тр2} < 0{,}5U_р$, то изоляция исправна. Конкретное место пробоя изоляции определяют таким образом. В свободное от движения поездов время, по договоренности с ДСП, со стороны, где изоляция исправна, гарнитуру соединяют с рельсом и в это же время индикатором рельсовой цепи определяют место неисправной изоляции.

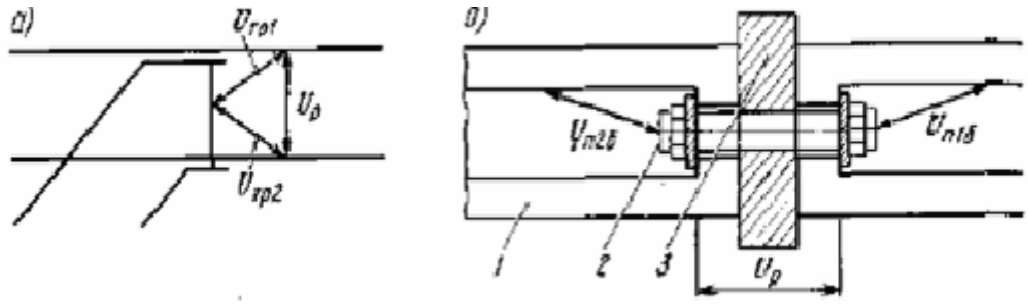


Рисунок 14.7- Схемы проверки изолирующих элементов: а- сережки остряка; б- стяжный полос

При измерении сопротивления изоляции 3 стяжных полос 1 (рисунок 14.7, б) определяют напряжения $U_р$ между рельсами (или полосами), а затем - напряжения между каждым рельсом $U_{п1б}$, $U_{п2б}$ (полосой) и болтом 2. Если $U_{п1б} < 0{,}5U_р$ и $U_{п2б} < 0{,}5U_р$, то изоляция исправна.

Определение места короткого замыкания в элементах рельсовых цепей (изолирующие стыки, стяжные полосы, железобетонные шпалы) упрощается при использовании индикаторов тока, основным элементом которых является индукционная катушка. При протекании по рельсу или другому элементу, на который наложена индукционная катушка переменного тока или импульсного постоянного тока, в последней наводится ЭДС. Для определения места короткого замыкания служит измеритель рельсовой цепи типа ИРЦ 58 (рисунок 14.8,а), содержащий катушку индуктивности К, усилитель У на транзисторах VT1, VT2 и измерительный прибор ИП. Можно применять катушку К без усилителя с чувствительным стрелочным прибором П, подключаемым через выпрямитель VD (рисунок 14.8,б). Отсутствие усилителя позволяет обходиться без источника питания, однако чувствительность прибора снижается. Эти схемы обладают слабой частотной селективностью, и поэтому их использование на участках с электротягой затруднительно.

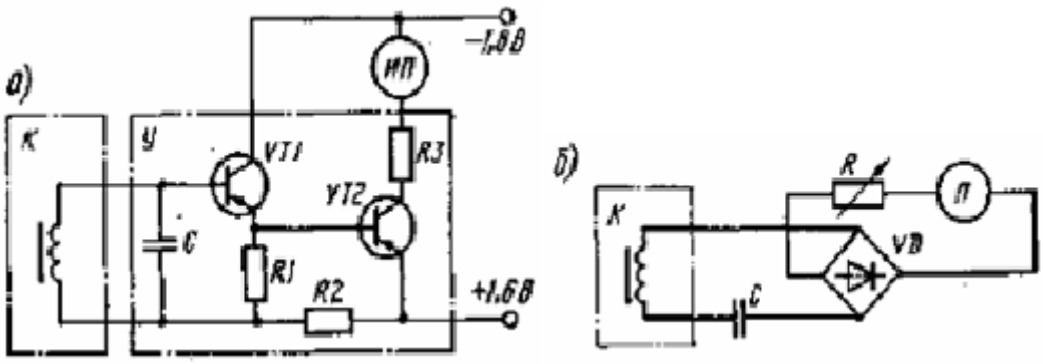


Рисунок 14.8- Схемы измерителя типа ИРЦ-58(а) и простейшего прибора с индукционной катушкой (б)

Для аналогичных цепей может быть использован индикатор тока электрических рельсовых цепей типа ИРЦ 25/50. Он предназначен для индикации присутствия в рельсах и других элементах станционных и перегонных рельсовых цепей сигнальных токов частотами 25 и 50 Гц, в том числе частотой 25 Гц при больших мешающих воздействиях переменных тяговых токов промышленной частоты и сигнальных токов частотой 50 Гц. Индикатор построен по схеме частотно-избирательного приемника прямого усиления (рисунок 14.9).

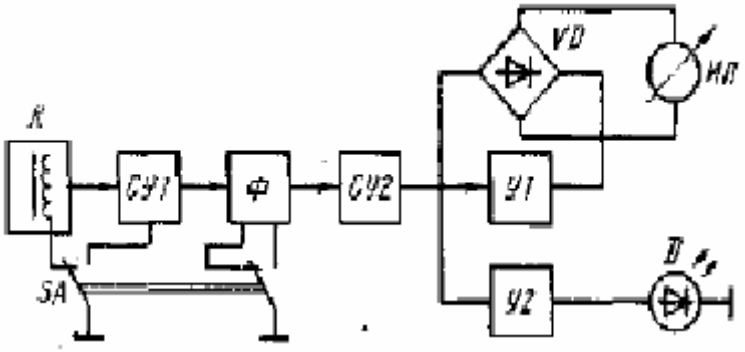


Рисунок 14.9- Схема индикатора типа ИРЦ 25/50

С измеряемой цепи сигнал снимается индуктивным способом - катушкой индуктивности К, что исключает влияние индикатора на режим работы измеряемой цепи. Сигнал с катушки поступает на вход согласующего устройства СУ1, согласовывающего высокое сопротивление катушки К с низким входным сопротивлением электрического фильтра Ф. Одновременно СУ1 усиливает сигнал с катушки К. Электрический фильтр Ф настраивается на частоту сигнального тока в измеряемой цепи. С его выхода сигнал поступает на согласующее устройство СУ2 и затем на два канала индикации. Первый канал стрелочной индикации имеет усилитель У1, выпрямитель VD и измерительный прибор ИП. Второй канал световой индикации состоит из усилителя У2 и светоизлучающего диода D, обеспечивающего индикацию в темное время суток. В индикаторе предусмотрена перестройка с частоты 25

Гц на частоту 50 Гц, осуществляемая переключателем SA. При этом фильтр Ф перестраивается на другую частоту, изменяется коэффициент усиления СУ1 и схема включения секций катушки К.

Чувствительность прибора выбрана такой, чтобы при индикации наличия сигнального тока полное отклонение стрелки ИП наблюдалось при токах в измерительной цепи около 3А, а начало свечения светоизлучающего диода - при токах около 0,5 А. Прибор обладает высокой избирательностью. Максимальный ток промышленной частоты, при котором сохраняется работоспособность прибора, до 200 А. Индикатор питается от источника постоянного тока с номинальным напряжением 9 В.

Для индикации состояния изоляции элементов рельсовых цепей на разработан прибор (рисунок 14.10).

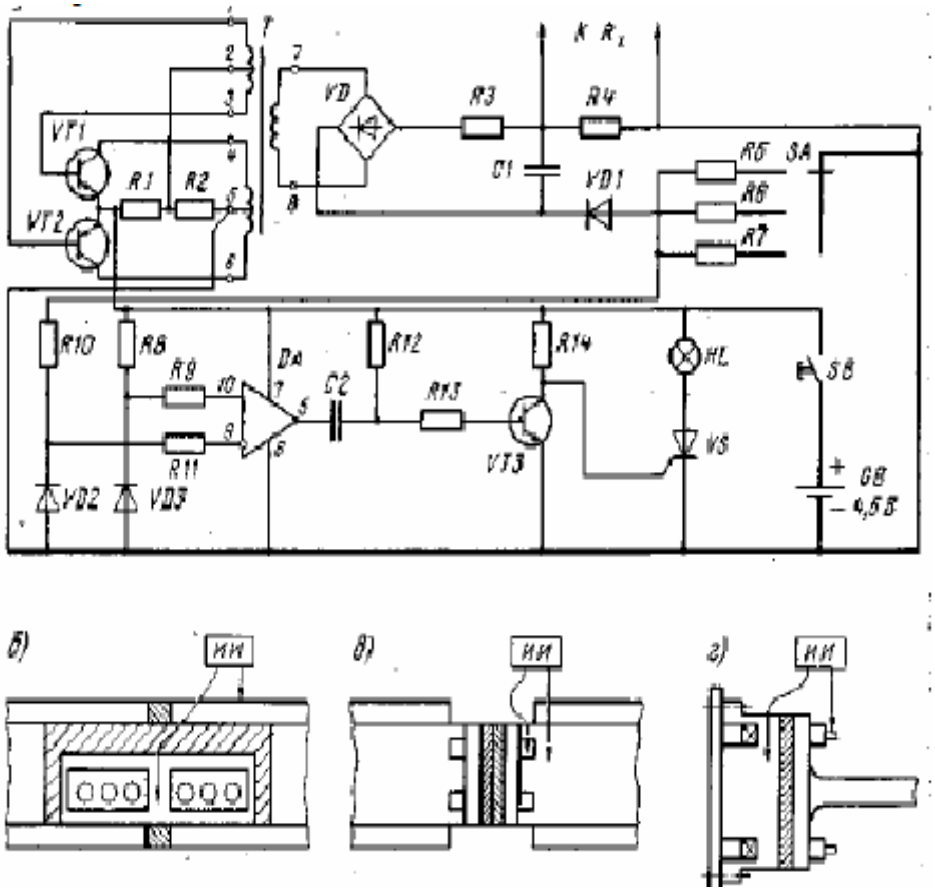


Рисунок 14.10- Принципиальная схема индикатора типа ИРЦ 25/50(а); варианты подключения индикатора для измерения сопротивления элементов изоляции «рельс-накладка» (б) связной полосы (в), серег крепления стрелочного электропривода (г)

Постоянное напряжение 4,5 В батареи GB с помощью транзисторов VT1 и VT2 преобразуется в переменное, которое выпрямляется выпрямителем VD и подается на конденсатор С1. Через резистор R3 конденсатор заряжается до напряжения пробоя динистора VD1. Динистор разряжается на последовательную цепочку, содержащую один из резисторов

R5, R6 или R7 (подключаемые переключателем SA), и измеряемое сопротивление Rx. После окончания разряда конденсатор C1 опять заряжается от выпрямителя и процесс повторяется.

Напряжение с подключенного резистора R5, R6 или R7 подается на вход порогового устройства, выполненного на микросхеме DA, порог срабатывания которого определяется сопротивлением резистора R8 и стабилитроном VD3. Сопротивления резисторов R5, R6 и R7 подобраны таким образом, чтобы падение напряжения на них при разряде конденсатора C1 при снижении сопротивления Rx было достаточным для срабатывания порогового устройства. Контролируемые сопротивления изоляции резистора Rx при подключении резисторов R5, R6 и R7 соответственно 2, 20 и 200 Ом. Если сопротивления Rx меньше указанных значений при соответствующем положении переключателя SA, срабатывает пороговое устройство, импульс, с выхода которого через конденсатор C2 поступает на вход схемы индикации, выполненной на транзисторе VT3 и тиристоре VS, и загорается лампа HL. Питание схемы индикатора включают кнопкой SB только на период измерения. Существует несколько вариантов подключения индикатора ИИ к различным элементам изоляции рельсовых цепей (рис. 110, б, в и г). Большинство случаев обрыва рельсовой цепи приходится на обрыв стыковых соединителей. Нормативные сопротивления стыковых соединителей выражаются в метрах эквивалентной длины целого рельса и составляют для медных приварных соединителей 9 м, стальных приварных соединителей 36 м, стальных штепсельных соединителей 123 м. Сопротивление постоянному току рельса марок Р50 и Р75 длиной 1 м соответственно $3{,}33\ 10^{-5}$ и $2{,}54\ 10^{-5}$ Ом.

При наличии стыковых соединителей различных типов сопротивление рельсовых стыков в большинстве случаев равно от 1 до 20 м эквивалентной длины; при отсутствии стыковых соединителей сопротивление стыков равно от 2 до 200 м эквивалентной длины.

Для измерения сопротивления рельсовых стыков применяют стыко измерители типов ЦНИИ-56 и ИЭСС-1М.

При электротяге постоянного тока измерительный прибор стыко измерителя - гальванометр G (рисунок 14.11, а) - работает от тягового тока, протекающего по рельсовой нити, а при электротяге переменного тока и автономной тяге - от источника питания - сухого элемента GB с током короткого замыкания примерно 30 А или от переносного аккумулятора (показано штриховой линией). Схема прибора собрана по принципу неполного моста, дополняемого двумя плечами при установке стыко измерителя на путь (сплошной рельс длиной 1 м и стык рельсов с двумя концами рельсов общей длиной 1 м). После подключения прибора переключатель SA необходимо установить в такое положение, чтобы уравновесить мост, т.е. добиться нулевого показания гальванометра G. При этом выполняется условие равновесия моста, заключающееся в том, что произведения сопротивлений противоположных плеч равны. Обозначим

суммарное сопротивление от точки К1 до точки подключения переключателя 8А через К1, а от точки подключения переключателя SA до точки К2 через R2. Тогда $R_P R1=R_{CT}R2$, откуда *Rcm=Rp(R1/R2)*.

Отношение R1/R2 определяет, во сколько раз сопротивление стыка Rст больше сопротивления Rp отрезка целого рельса длиной 1 м. При данной схеме стыко-измеритель позволяет измерить сопротивление стыка, не превышающее 9 м эквивалентной длины, т. е. фактически предназначен только для измерения медных соединителей. Изменив сопротивления резисторов (значения в скобках), можно расширить пределы измерения прибора до 200 м эквивалентной длины, что позволяет измерять сопротивления стыковых соединителей любых типов.

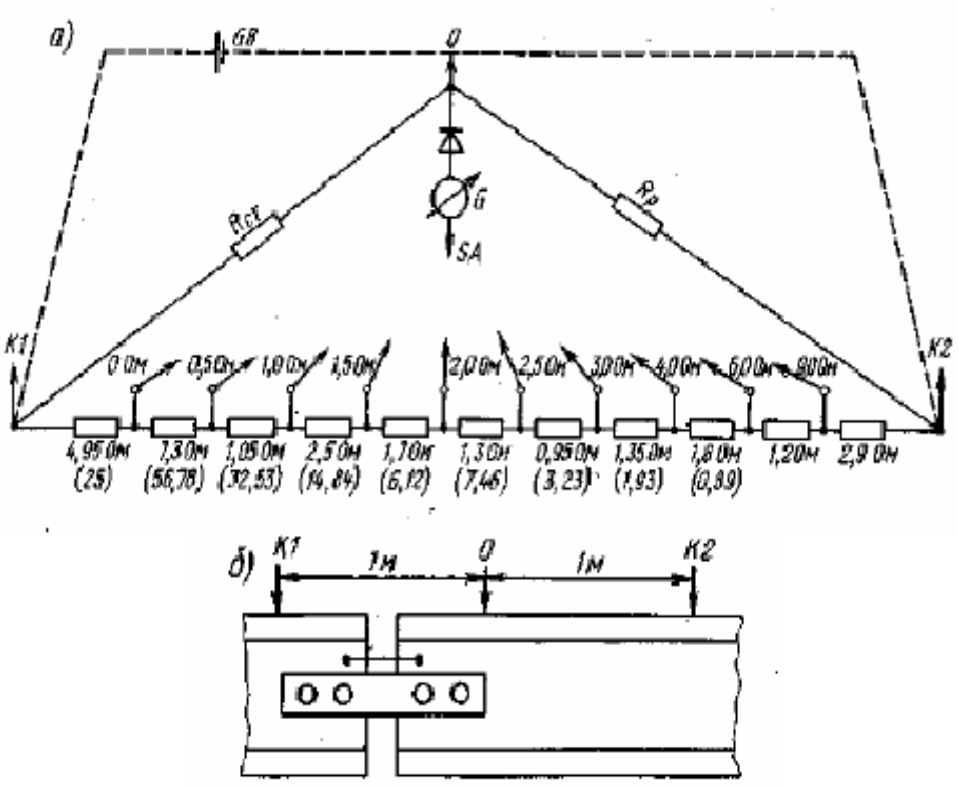


Рисунок 14.11- Схема стыко измерителя типа ИЭСС-1М (а) и его подключение к рельсам (б)

При подключении измерителя (рисунок 14.11,б) необходимо следить за тем, чтобы рельсовые накладки и стыковые соединители полностью находились между зажимами К1 и О, а также за тем, чтобы между зажимами и рельсовой нитью был хороший контакт.

Измерить сопротивление в стыках можно при помощи прибора ПК-1М.

Наиболее важна проверка электрической целости стыковых и стрелочных соединителей при техническом обслуживании не обтекаемых параллельных ответвлений стрелочных изолированных участков, так как обрыв цепи не обтекаемых ответвлений может привести к ложному контролю свободности стрелочной секции. При отсутствии описанного выше

прибора исправность дублированных не обтекаемых соединителей и стыковых соединителей можно проверять токоизмерительными клещами типа Ц-90, фиксируя ток в каждом из соединителей при наложении на конец ответвления нормативного шунта.

Электрическую целость стыковых соединителей не обтекаемых ответвлений можно проверять также наложением нормативного шунта на конец этого ответвления. При этом остаточное напряжение на путевом реле в импульсных рельсовых цепях постоянного тока не должно превышать 60% напряжения притяжения путевого реле, в фазочувствительных рельсовых цепях с реле типа ДСШ - 85 % напряжения отпускания и во всех остальных рельсовых цепях - 60 % напряжения отпускания. Если путевое реле находится на большом расстоянии от рельсовой линии, то остаточное напряжение можно измерять не на путевом реле, а на рельсах релейного конца.

Исправность стыковых соединителей, не обтекаемых током, можно проверить индикатором тока. Шунт накладывают на параллельное ответвление. В исправном соединителе будет протекать ток, наличие которого будет определять индикатор.

При поиске отказов в рельсовой цепи часто требуется определить обрыв или повышение сопротивления в месте соединения элементов рельсовой линии. Для этого измеряют напряжение между рельсовыми нитями до и после соединителя или же измеряют напряжение на каждом соединителе по обеим рельсовым нитям. При измерении напряжения на переменном токе и использовании комбинированного прибора Ц4380 повышение чувствительности может достигаться измерением напряжения амперметром переменного тока этого прибора на шкале 0,006А. Максимальное полное отклонение стрелки прибора будет иметь место при напряжении на соединителе 0,09В. В то же время полное отклонение стрелки вольтметра переменного тока в комбинированном приборе Ц4380 наблюдается при напряжении 0,3 В. На участках с автономной тягой при ложном контроле занятости рельсовой цепи для приблизительного обнаружения места обрыва стыкового соединителя применяют такой способ. К тросам на питающем конце рельсовой цепи подключают вольтметр PV (рисунок 14.12), который покажет скачкообразное увеличение или уменьшение напряжения в тот момент, когда поезд хвостом или головой проследует за неисправный соединитель. Этот метод сокращает время обнаружения отказа.

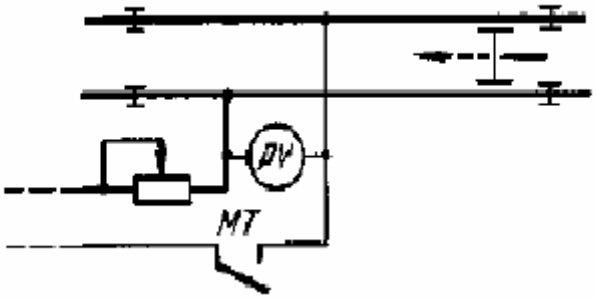


Рисунок 14.12- Схема определения обрыва стыкового соединителя при проходе поезда

Проверка чередования полярности в рельсовых цепях. Для безопасности движения большое значение имеет правильное чередование полярности тока в рельсах соседних рельсовых цепей. Чередование полярности тока проверяют регулярно в соответствии с графиком технологического осмотра. Кроме того, такую проверку следует выполнять после замены аппаратуры питающего конца рельсовой цепи или после работ, связанных с отключением кабельных жил, дроссельных и кабельных перемычек комбинированным прибором типа Ц4380, индикатором ИП4П и замыканием изолирующих стыков.

В смежных рельсовых цепях постоянного тока при импульсном и непрерывном питании чередование полярности определяют вольтметром. Вольтметр включают сначала по одну сторону изолирующих стыков, а затем, поменяв концы проводов прибора, - по другую. Если стрелка прибора отклонится в одну сторону, то чередование полярностей правильное.

В смежных двухниточных рельсовых цепях с дросселями-трансформаторами (рисунок 14.13) при правильном чередовании фаз

$$U_1 = \frac{U_{1РЦ}+U_{2РЦ}}{2},\ \text{а}\ U_2 = \frac{U_{1РЦ}-U_{2РЦ}}{2}, \qquad (14.2)$$

Признаком такого чередования фаз является выполнение условия $U_1 \geq U_2$. Если из-за действия помех не удается достаточно точно измерить эти напряжения, то следует замкнуть один из изолирующих стыков и убедиться в реакции путевых реле. При правильном чередовании полярности в зависимости от расположения питающих и релейных концов по отношению к исследуемому стыку реакция путевых реле будет такой.

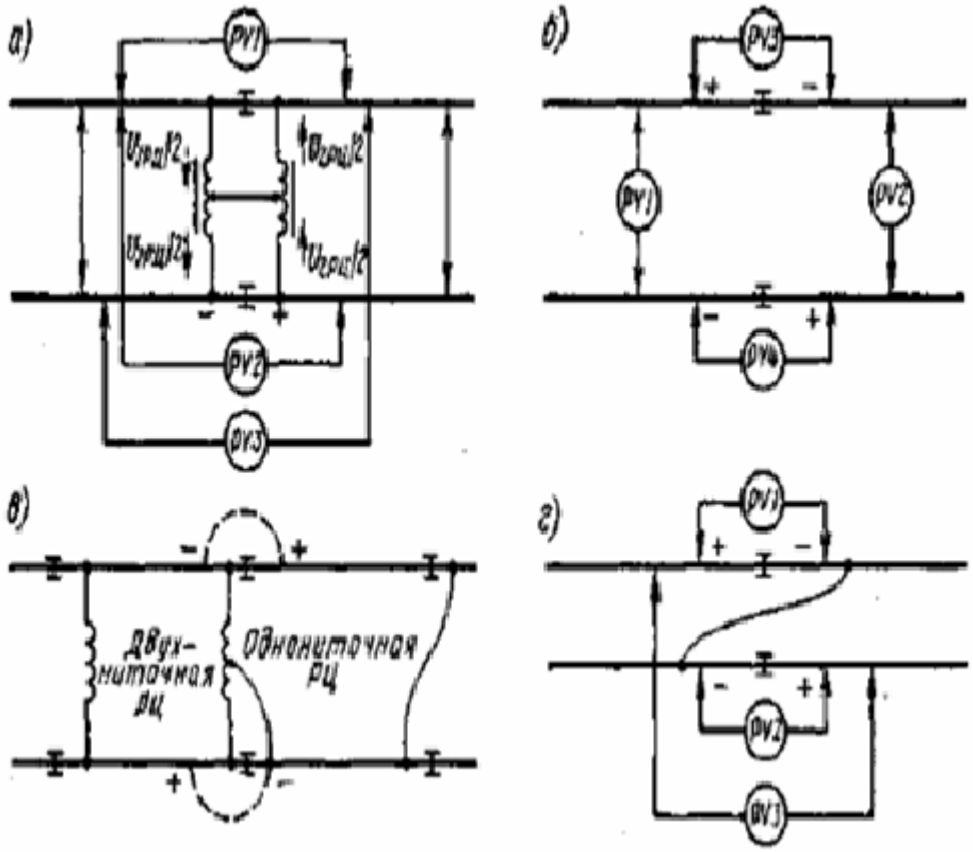


Рисунок 14.13-Схемы проверки чередования полярности в двухниточных рельсовых цепях с ДТ (а), в двухниточных рельсовых цепях без ДТ (б), двух- и однониточных рельсовых цепях (в) и в однониточных рельсовых цепях (г)

Правильность чередования фаз при стыковании двухниточных рельсовых цепей без дросселей-трансформаторов проверяют измерением напряжений в соответствии со схемой (рисунок 14.13,б). Условие правильного чередования полярности: меньшее из U_3 и U_4 больше большего из U_1 и U_2, т.е. $[U_3, U_4]>max[U_1, U_2]$.

При отсутствии уверенности в выполнении данного неравенства необходимо замкнуть изолирующие стыки и убедиться в правильности чередования полярности.

Правильность чередования полярности при стыковании двух- и однониточной рельсовых цепей (рисунок 14.13,в) проверяют таким образом. Отключают напряжение на вторичной обмотке питающего трансформатора в двухниточной рельсовой цепи. Замыкают изолирующие стыки. Необходимо убедиться, что сектор путевого реле двухниточной рельсовой цепи опускается вниз.

При стыковании однониточных рельсовых цепей (рисунок 14.13,г) чередование полярности будет правильным, если выполняются условия $U_3<U_1$, и $U_3<U_2$.

Таблица 14.1

Расположение питающих и релейных концов у изолирующего стыка

Расположение питающих и релейных концов у изолирующего стыка.	Реакция путевых реле
Питающий – релейный.	Реле, подключенное у изолирующего стыка, отпускает сектор.
Релейный – релейный.	Оба реле, подключенные у изолирующего стыка, отпускает сектор.
Питающий – питающий.	Отпускает сектор хотя бы одно путевое реле.

Правильность чередования полярности при стыковании двухниточной рельсовой цепи с непрерывным питанием с импульсной рельсовой цепью или с рельсовой цепью с числовым кодом проверяют замыканием изолирующих стыков при отключенном напряжении питания в рельсовой цепи с непрерывным питанием. При правильном чередовании полярности сектор путевого реле рельсовой цепи с непрерывным питанием должен двигаться в сторону нижнего ролика.

Измерение сопротивлений балласта и шпал. На практике измерения достаточно проводить через каждые 200 - 300 м длины рельсовой цепи. От исправности стрелочных соединителей зависит безотказная работа рельсовых цепей, поэтому необходимо проверять целость этих соединителей и надежность их контактирования в местах соединения с рельсами.

Контрольные измерения железобетонных шпал обычно проводит электромеханик по схеме, приведенной на рисунке 14.14.

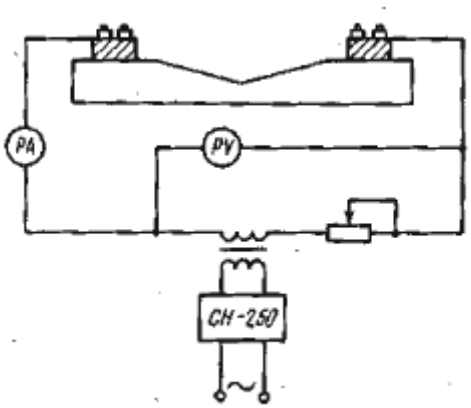


Рисунок 14.14- Схема измерения параметров железобетонных шпал

В некоторых случаях для оценки качества балласта или степени его старения требуется знать его удельное сопротивление, которое можно определить, например, измерителем сопротивления балласта типа ИСБ-1.

Одним зажимом прибор подключают к рельсу, а другим - к металлическому стержню, вбитому в пространство шпальной решетки в балластную призму. Если длина стержня 70 см, а диаметр 2,5 см, то удельное сопротивление балластного материала 90 Ом·см.

Ориентировочно удельное сопротивление асбестового балласта (6 — 10) 10^3 Ом·см, щебеночного (2 - 5) 10^3 - 20^3 - 50^3 Ом·см. В солончаках при заносе шпальной решетки песком с примесью солей свыше 30% удельное сопротивление грунта достигает 500 - 800 Ом·см.

Контрольные измерения железобетонных шпал обычно проводит электромеханик по схеме, приведенной на рисунке 14.14. Сопротивление сухой железобетонной шпалы при температуре воздуха около плюс 20^0 С должно быть не менее 9,2 кОм, а сопротивление влажной шпалы - не менее 4,6 кОм. По данной схеме можно измерять и сопротивление изоляции каждого рельсового звена перед его укладкой. При сухих шпалах это сопротивление должно быть не менее 400 Ом, а при влажных — не менее 200 Ом.

Сопротивления шпал целесообразно измерять в сухую погоду при сухой поверхности шпал и рельсовых скреплений. При измерениях могут использоваться комбинированные приборы типа Ц-435, мост постоянного тока типа МВУ-49, а также измеритель сопротивления балласта типа ИСБ-1.

Рекомендованная литература: [4,6,7]

Контрольные вопросы

1. Принцип диагностирования релейно-контактных устройств автоматики и телемеханики.
2. Назовите виды отказов релейно-контактных схем?
3. Перечислите основные способы диагностирования релейно-контактных схем и комплексов телемеханики?
4. Перечислите проверку исправности электрического монтажа.
5. Перечислите проверку исправности релейно-контактных схем.
6. Принцип диагностики параметров работы рельсовых цепей.
7. Назовите назначение рельсовых цепей?
8. Обьясните характерные неисправности рельсовых цепей.
9. Перечислите средства и способы диагностирования параметров работы рельсовых линий.
10. Назовите расположение питающих и релейных концов у изолирующего стыка.

15 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ АТС И ЭНС ПО СОСТОЯНИЮ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

15. Понятие о прогнозировании технического ресурса устройств по результатам диагностирования
15.1. Статистический анализ
15.2. Накопление информации и ее обработка
15.3. Диагностирование по результатам измерения параметров
15.4. Оценка точности контролируемых параметров
15.4.1. Доверительные границы при нормальном и логнормальном распределении
15.4.2. Доверительные границы при распределении Пуассона
15.4.3. Доверительные границы при экспоненциальном распределении
15.4.4. Анализ параметров методом доверительных интервалов
15.5 Стратегии эксплуатации, обслуживания и ремонта устройств по состоянию

15 Понятие о прогнозировании технического ресурса устройств по результатам диагностирования

15.1 Статистический анализ

Результаты анализа надежности многочисленных объектов АТС и ЭНС свидетельствуют, что в процессе длительной и интенсивной эксплуатации почти все показатели надежности существенно изменяются и, более того, - ухудшаются. Оказывается, что по мере воздействия эксплуатационных факторов в объектах АТС и ЭНС зарождаются, развиваются и накапливаются повреждения, которые, в свою очередь, являются причинами зарождения и развития отказов. Объекты АТС и ЭНС как бы «стареют».

В противовес этому негативному процессу должен быть поставлен позитивный процесс своевременного и качественного выполнения ремонтно-профилактических работ, работ по уходу, грамотной эксплуатации.

Понятно, что выбрать рациональную периодичность и рациональный объем ремонтно-профилактических работ можно только на основе систематического сбора и глубокого анализа данных по результатам диагностирования. Для этого в инженерной практике широко используются различные модели изменения надежности.

Несмотря на разнообразие надежностных моделей, их условно можно разграничить на две группы: модели возникновения отказов (как правило, охватывают короткие этапы эксплуатации); модели изменения надежности (как правило, охватывают длительные этапы эксплуатации).

Модель возникновения отказа чаще всего представляет собой математическую или графическую зависимость между контролируемым параметром (характеризующим работоспособность объекта) и наработкой (календарным сроком). Наибольшее распространение получили ***параметрические модели возникновения отказа.*** Пример такой модели представлен на рисунке 15.1.

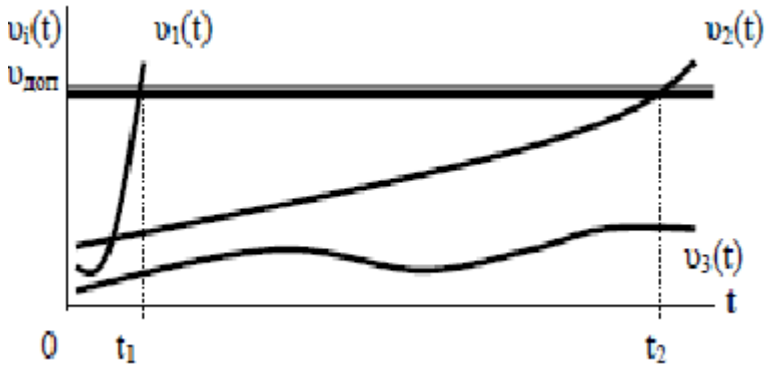


Рисунок 15.1- Параметрическая модель отказа

Анализ данных на рисунке 15.1 позволяет заключить:

1. Из трех контролируемых параметров к отказам критичны лишь параметры $\upsilon_1(t)$ и $\upsilon_2(t)$. Параметр $\upsilon_3(t)$ не критичен к отказам, поэтому его контроль в эксплуатации не целесообразен (в модели этот параметр избыточен).

2. Параметр $\upsilon_2(t)$ изменяется постепенно вплоть до отказа объекта. Такой характер изменения приводит к постепенному зарождению и развитию отказа. Отказы объекта из-за недопустимого изменения $\upsilon_2(t)$ происходят при очень большой наработке.

3. Параметр $\upsilon_1(t)$ непосредственно перед отказом объекта имеет характерный «всплеск». Такой характер его изменения приводит к практически внезапному отказу. Отказы из-за недопустимого изменения $\upsilon_1(t)$ происходят при малой наработке объекта.

4. Значения параметров $\upsilon_1(t)$ и $\upsilon_2(t)$ непосредственно перед отказом объекта позволяют установить их предельные уровни, превышение которых недопустимо.

5. Моменты наработки, когда контролируемые параметры $\upsilon_1(t)$ и $\upsilon_2(t)$ пересекают допустимые уровни, позволяют установить периодичность контроля и профилактических работ на рассматриваемом объекте (это моменты наработки накануне t_1 и t_2).

Модель изменения надежности чаще всего представляет собой математическую или графическую зависимость между обобщенным показателем надежности (обычно это: вероятность безотказной работы,

вероятность отказа, интенсивность отказов) и наработкой (календарным сроком). Примеры ***вероятностной модели изменения надежности*** и ***лямбда-характеристик*** представлены на рисунках 15.2,15.3.

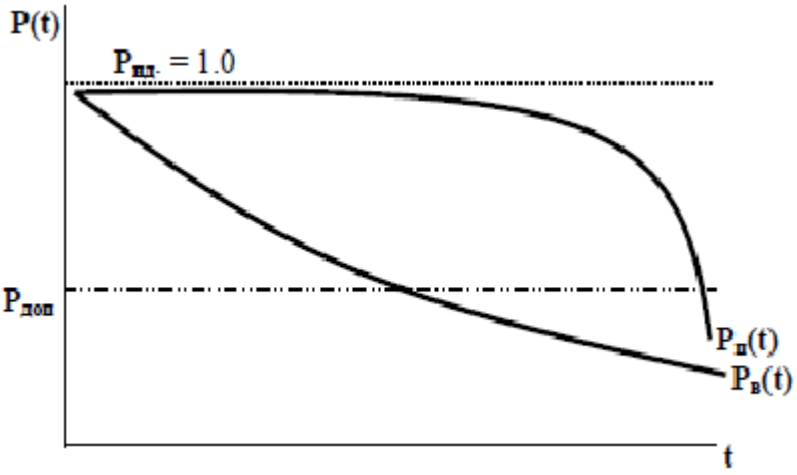


Рисунок 15.2- Вероятностная модель изменения надежности объекта при эксплуатации

Если параметрическая модель корректна (построена на большом объеме экспериментальных данных) и полностью количественно определена (установлены численные значения $\upsilon_{доп}$, t_1 и t_2), то она позволяет установить обоснованную программу технического обслуживания рассматриваемого объекта (объем, периодичность и даже технологию контрольно-поверочных и ремонтно-профилактических работ). Такая модель может быть положена в основу управления техническим обслуживанием объекта.

Вероятностная модель изменения надежности. Рассмотренная модель отказов имеет ряд недостатков, главный из которых - невозможность непосредственного учета изменения надежности, так как наблюдения производятся не за показателем надежности, а за функциональными параметрами, которые, в лучшем случае, лишь косвенно характеризуют надежность.

Этого недостатка лишена вероятностная модель изменения надежности, вариант которой изображен на рисунке 15.2. В модели учитываются как внезапные, так и постепенные (износовые) отказы. В изображенном варианте принято, что внезапные отказы (кривая $P_в(t)$) имеют экспоненциальное распределение, а постепенные отказы (кривая $P_п(t)$) имеют нормальное распределение.

Все эти модели могут относиться ко всему парку однотипных объектов АТС и ЭНС **(*парковые модели*),** или к конкретному объекту **(*индивидуальные модели*).** Парковые модели изменения надежности используются, преимущественно, для управления надежностью в условиях стратегии технической эксплуатации и ремонта (СТЭР) «по ресурсу».

Индивидуальные модели изменения надежности используются, преимущественно, для управления надежностью в условиях СТЭР «по уровню надежности». Модели возникновения отказа используются, преимущественно, для управления надежностью в условиях СТЭР «по техническому состоянию».

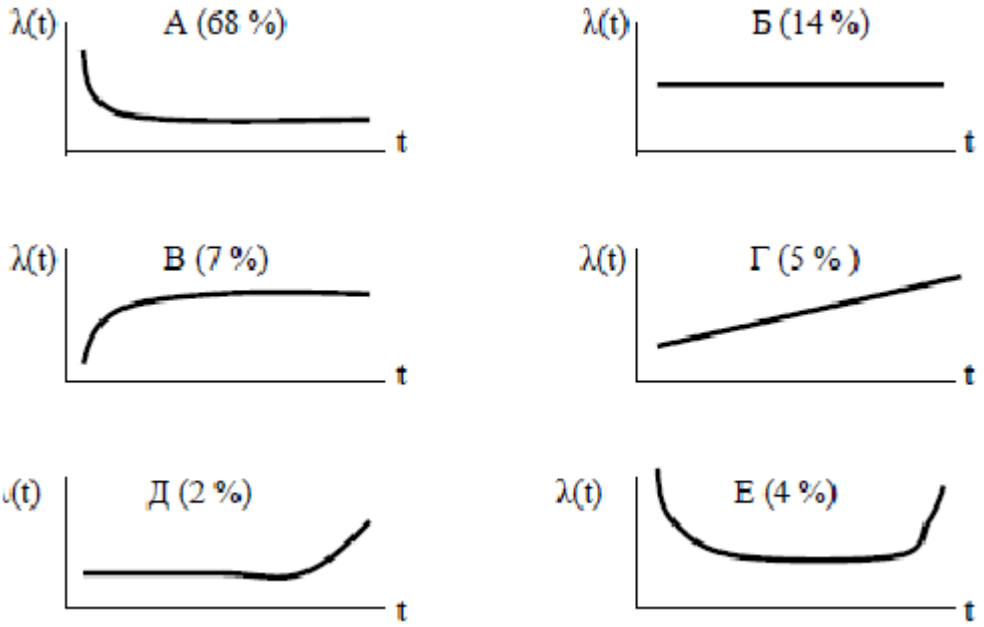


Рисунок 15.3- Разновидности лямбда - характеристик

Параметрическая модель отказа. В параметрической модели устанавливается зависимость параметров от наработки. Влияние эксплуатационных факторов на работоспособность объектов АТС и ЭНС имеет случайный характер, поэтому случайными являются характер, глубина и направленность физико-химических процессов в этих объектах. В этой связи по разному изменяются и параметры, характеризующие работоспособность объекта. На рисунке 15.1 представлен пример с возможными вариантами изменения контролируемых функциональных параметров по наработке $\upsilon_i(t)$.

Лямбда-характеристики объектов. Лямбда-характеристика *λ(t)* устанавливает зависимость между интенсивностью отказов объекта и его наработкой. Такую характеристику можно и необходимо понимать как модель изменения надежности (безотказности) в процессе эксплуатации или хранения объекта. Эту модель целесообразно использовать для определения или своевременного корректирования программы технического обслуживания объекта.

Исходя из характера протекания функции *λ(t)*, выделяют ситуации *(А…Е),* отмеченные на рисунке 15.3. На этом же рисунке для каждого случая указана распространенность случая применительно к объектам АТС и ЭНС. Из рисунка 15.3 видно, что во всех лямбда-характеристиках (за исключением

случаев *В*и *Г*) имеется выраженный участок наработки, в пределах которого величина $\lambda(t)$ минимальна и, кроме того, постоянна. Этот участок принято называть периодом нормальной эксплуатации. Обычно именно в пределах периода нормальной эксплуатации назначается технический ресурс объектов АТС и ЭНС.

Кроме того, для некоторых типов лямбда-характеристик (*А, Д, Е*) наблюдается «всплеск» значений $\lambda(t)$ в начале и (или) в конце наработки *t*. Это объясняется повышенным числом отказов из-за не при работанности деталей на новых объектах и высоким износом деталей на старых объектах. При работочный и износовый участки наработки *t* стараются исключить из пределов назначенного и (или) межремонтного ресурса объекта.

Необходимо отметить, что сборные, комплексные изделия, АТС и ЭНС имеют классический «корытообразный» тип лямбда-характеристики (на рисунке 15.3 - это вариант **Е**).

15.2 Накопление информации и ее обработка

Исследование, проводимое с целью определения причин отказа объектов АТС и ЭНС, направлено на решение двух основных задач:

разработку профилактических мероприятий по предупреждению подобных отказов;

устранение неисправности конкретного объекта и ввод его в строй.

Для успешного решения этих двух задач необходимы:

- высокая степень оперативности проведения исследования;
- глубина и тщательность - в результате проведенного исследования должны быть вскрыты все основные и способствующие причины отказа, эксплуатационные и конструктивно-производственные факторы, оказывающие влияние на его возникновение и развитие.

Любое исследование причин отказа или неисправности начинается с составления программы исследования, в которой указываются этапы исследования, определяющие основное содержание работ по выбранным направлениям, сроки их начала и окончания, исполнители, трудоемкость и расчетная стоимость.

Как правило, исследование проводится по следующим направлениям:

- сбор информации об обстоятельствах отказа;
- внешний осмотр отказавшего объекта;
- анализ информации об обстоятельствах проявления отказа и результатов внешнего осмотра отказавшего объекта;
- проведение испытания отказавшего объекта и анализ его результатов;
- исследование технического состояния узлов и деталей неисправного объекта;
- исследование узла, неисправность которого вызвала отказ;
- анализ материалов исследования и разработка рекомендаций.

Однако не во всех случаях выполняются все эти этапы, так как иногда причина отказа выявляется на первой стадии исследования, например, при

внешнем осмотре отказавшего объекта, и не всегда указанные этапы выполняются именно в указанной последовательности.

Сбор информации об обстоятельствах отказа. Имеет целью получить как можно более подробные сведения об условиях, в которых возник отказ, характерных особенностей его возникновения и развития. Он должен быть начат немедленно после того, как стало известно об отказе.

Основными источниками такой информации являются:

- данные, которые сообщаются инженерно-техническим составом (ИТС), эксплуатировавшим объекты АТС и ЭНС, когда произошел отказ;
- показания очевидцев отказа о явлениях, которыми он сопровождался;
- данные регистрирующих средств с записями параметров при проведении проверок работоспособности объектов АТС и ЭНС.

Внешний осмотр отказавшего оборудования. Имеет целью выявить признаки отказа, позволяющие судить о его характере, причине и последствиях. Этот осмотр необходимо провести в самое короткое время после того, как произошел отказ, так как некоторые последствия отказа под атмосферным воздействием или при проведении работ могут не сохраниться.

В процессе осмотра оценивается техническое состояние объектов, имеющиеся на них признаки ненормальной работы

Все результаты должны тщательно фиксироваться в виде записей, эскизов, схем, фотографий и другими возможными в данных условиях способами.

Анализ информации об обстоятельствах отказа. Имеет целью:

- составить четкое представление о характере отказа и по возможности определить, какая система или какой агрегат отказали, то есть определить объект дальнейших исследований;
- определить возможные причины отказа (разработать версии о причинах отказа);
- наметить основные направления исследования с целью определения причин отказа.

В процессе этого анализа должны быть изучены все собранные материалы по обстоятельствам проявления отказа и результаты внешнего осмотра, а также все имеющиеся информационные материалы, руководящая документация и другие данные по происходившим ранее отказам с тем, чтобы определить, не известны ли уже причины возникшего отказа.

В результате анализа всех материалов об обстоятельствах проявления отказа должно быть определено, какие были ненормальности в работе и какое они имеют отношение к происшедшему отказу. В некоторых случаях при этом удается также определить, какая система или какой агрегат отказали.

Анализ также должен ответить на вопросы, не явились ли причиной отказа ошибки, допущенные ИТС, какие действия были предприняты для предотвращения развития отказа, насколько они были правильны и эффективны.

Испытания отказавшего оборудования имеют целью оценить работоспособность отдельных систем, агрегатов и узлов, а также объекта исследования в целом, получить дополнительные объективные данные об особенностях возникновения и развития отказа и о наиболее эффективных действиях по управлению его работой для прекращения развития отказа.

Перед проведением испытания составляется программа, в которой отражаются следующие вопросы:

- где проводится испытание отказавшего объекта (на поле, на стенде);
- какие работы должны быть на нем проведены при подготовке к испытаниям;
- какие параметры должны измеряться при испытании, и какая контрольно-измерительная аппаратура применяется для измерения каждого из них;
- какие меры безопасности должны приниматься в ходе испытания;
- в какой форме ведутся записи в процессе испытаний.

При составлении программы руководствуются тем, что при испытании необходимо выполнить два условия:

- проверить работу систем и агрегатов на соответствие требованиям технических условий;
- проверить работоспособность систем и агрегатов на режимах и в условиях, максимально приближенных к тем, при которых произошел отказ.

При изучении и анализе материалов испытания следует руководствоваться тем, что после этого этапа исследования должно быть получено четкое представление не только о характере отказа и его особенностях, но и о том, неисправность какого агрегата или узла вызвала отказ объекта исследования.

После выявления неисправного агрегата производится его замена на объекте исследования, после чего объект снова испытывается. Иногда неисправность может быть устранена проведением регулировочных работ, выполнением более качественного монтажа тех же агрегатов и деталей и другими способами без замены агрегатов. В этом случае проводятся работы, необходимые для устранения ненормальной работы объекта, и его повторные испытания, но из них исключаются работы, затраченные на поиск условий, при которых проявляется отказ, и обязательно сохраняются те режимы и работы, при которых отказ проявлялся.

В тех случаях, когда определяется, что отказ вызван неисправностью внутреннего узла объекта, производится его частичная или полная разборка.

Если при испытаниях отказ не проявляется, решение о допуске объекта к эксплуатации может быть принято только после окончания проведения всего исследования и обнаружения неисправного узла или детали, неисправность которых вызвала отказ.

15.1.3 Диагностирование по результатам измерения параметров

Сущность диагностирования по результатам измерения параметров состоит в периодическом анализе тенденции и скорости их изменения с наработкой, обусловленное ухудшением технического состояния изделия.

Регистрация параметров производится на установившемся режиме работы изделия в заданных (стандартных) условиях. По значениям параметров составляют графики. Горизонтальная ось графиков это ось наработки.

Полученные значения являются дискретными временными рядами и рассматриваются в качестве отдельных выборок стохастического процесса, который в случае отсутствия изменения технического состояния изделия или аппаратуры контроля достаточно устойчив и стационарен. Признаки изменения технического состояния отражаются на графиках в виде следующих зависимостей (рисунок 15.4):

-тренд, то есть неслучайное, устойчивое изменение контролируемого параметра с наработкой, отражающее постепенное развитие дефекта (а – на рисунок 15.4);

- несоответствие параметра его возможным и допустимым статистическим пределам или же по техническим условиям (б – на рисунке 15.4);

- скачек контролируемого параметра, отражающий мгновенное, по сравнению с предыдущим периодом, развитие дефекта (в – на рисунке 14.4);

- изменение величины разброса, оцениваемого дисперсией контролируемого параметра, отражающее развитие нестационарности в работе изделия и аппаратуры контроля параметра (г – на рисунке 15.4);

- наличие систематических выбросов, не связанных с ошибками регистрации параметров, отражающих в основном скрытое для данного метода контроля развитие неисправностей, которые проявляются лишь в определенных условиях (д – на рисунке 15.4). Нередко при анализе информации наблюдается сочетание отмеченных выше признаков.

Необходимо помнить, что не все параметры, характеризующие работоспособность изделия, могут быть использованы в качестве диагностических: одни из них малоинформативны, другие невозможно измерить и о их изменении можно судить только косвенно.

В качестве диагностических параметров используют значения напряжений, величины сопротивлений и т.д. За этими параметрами ведется постоянное наблюдение, их значения фиксируются в системе координат, в которой по вертикальной оси откладывается значение параметра, а по горизонтальной – наработка объекта.

Однако простая фиксация параметров малоэффективна, так как их значения имеют большой разброс, обусловленный влиянием внешних условий, при которых они были измерены, неадекватностью режимов работы изделий и другими факторами (рисунок 15.5). В этой связи одним из важных условий качественного диагностирования является предварительная

обработка параметров, измеряемых в процессе эксплуатации. Цель обработки заключается в снижении влияния внешних факторов на значения этих параметров.

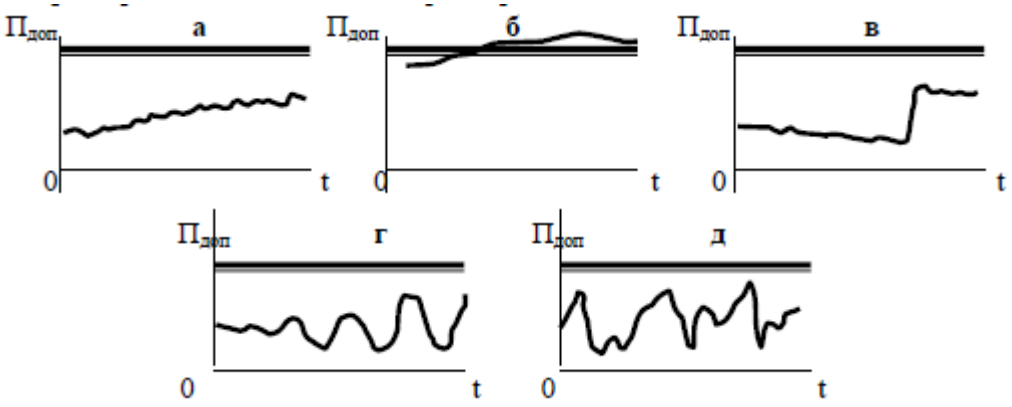


Рисунок 15.4- Типовые реализации изменения контролируемых параметров

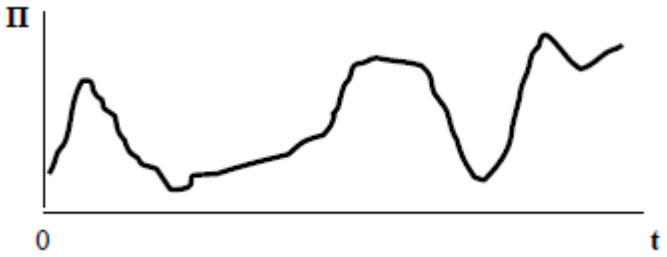


Рисунок 15.5- Практическая реализация изменения контролируемого параметра

Чаще всего обработка ведется путем:

- приведения значений параметров к стандартным условиям работы;

-приведения значений параметров к одним режимам работы оборудования;

-статистического сглаживания значений параметров в выборке (во временном ряду).

15.2 Оценка точности контролируемых параметров

В ряде задач требуется найти для какого-либо показателя (параметра) m не только его оценку M', но и его точность, то есть, требуется определить, к каким ошибкам может привести замена показателя (параметра) m его точечным (дискретным, оценочным) "средним" значением M'. С этой целью в математической статистике используются доверительные интервалы.

Доверительным интервалом показателя M называется случайный интервал $M_н ... M_в$, который накрывает истинное значение M с задаваемой

вероятностью *P* (обычно *P = 0.9...0.95*). Показатели $M_н$ и $M_в$ принято называть ***доверительными границами,*** а вероятность *P-**доверительной вероятностью***.

Для большинства законов распределения имеются специальные статистические таблицы (таблицы коэффициентов доверительных границ), позволяющие по заданным доверительной вероятности *P*и объему располагаемой информации (число испытаний, событий *m*) определить нижнюю и верхнюю доверительные границы$M_н$ и $M_в$.

15.2.1 Доверительные границы при нормальном и логнормальном распределении

Пусть при *n* опытах получен ряд значений $x_1, x_2,...,x_i,...,x_n$, тогда оценка среднего значения показателя *X′* может быть определена по формуле

$$X' = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i.$$

Тогда нижняя доверительная граница $X_н$ определяется по формуле

$$X_H = X' - z \cdot \frac{\sigma}{n^{0,5}},$$

а верхняя доверительная граница $X_в$ - по формуле

$$X_B = X' + z \cdot \frac{\sigma}{n^{0,5}},$$

где σ - среднеквадратическое отклонение показателя *X′*, определяемое по формуле

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - X')^2\right]^{0.5},$$

где *z* - коэффициент доверительных границ, для доверительной вероятности *P*. Обычно задаются значением *P = 0.9...0.95*.; x_i - значение показателя при *i*-ом опыте (замере).

Окончательная запись статистического значения оцениваемого показателя *X* в общем случае может быть представлена в следующем виде:

$$X = X_H \ldots X_B.$$

Доверительные границы при логнормальном распределении определяются аналогично, с той лишь разницей, что исходная выборка должна содержать значения натуральных логарифмов [то есть $ln(x_i)$], а в данных формулах вместо значений x должны стоять значения *ln(x)*.

15.2.2 Доверительные границы при распределении Пуассона

Пусть при n опытах получен ряд значений $x_1, x_2,...,x_i,...,x_n$, тогда оценка среднего значения показателя X' может быть определена по формуле

$$X' = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i.$$

В качестве показателя X' в практических задачах могут выступать: число отказов M', наработка на отказ или наработка до отказа T', интенсивность отказов или параметр потока отказов λ'.

Если перечисленные показатели надежности определяются для простейшего Пуассоновского потока отказов, то доверительные границы показателей определяются следующим образом:

- для числа отказов:

- нижняя доверительная граница $M_H = \frac{M'}{R_1}$,

- верхняя доверительная граница$M_B = \frac{M'}{R_2}$.

- для наработки на отказ:

-верхняя доверительная граница $T_B = T' \cdot R_1$,

-нижняя доверительная граница $T_H = T' \cdot R_2$.

- для интенсивности отказов (параметра потока отказов):

- нижняя доверительная граница $\lambda_H = \frac{\lambda'}{R_1}$,

- верхняя доверительная граница $\lambda_B = \frac{\lambda'}{R_2}$.

Если производится n опытов и в m из них имеет место событие, вероятность появления которого подчиняется закону Пуассона, то при $m = 0$ нижняя доверительная граница равна $X_H = 0$,

а верхняя доверительная граница равна $X_B = R_0$.

Коэффициенты доверительных границ R_1, R_2, и R_o (при заданном числе опытов n и заданной доверительной вероятности P. Обычно задаются значением $P = 0.9...0.95$).

15.2.3 Доверительные границы при экспоненциальном распределении

Пусть при n опытах получен ряд значений $x_1, x_2,...,x_i,...,x_n$, тогда оценка среднего значения показателя x' может быть определена по формуле

$$X' = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i,$$

нижняя доверительная граница показателя $X_н$ - по формуле

$$X_H = R_3 \cdot X', \quad (15.1)$$

а верхняя доверительная граница показателя $X_в$ - по формуле

$$,X_B = R_1 \cdot X' \quad (15.2)$$

где коэффициенты доверительных границ R_1 и R_3 (при заданном числе опытов n и заданной доверительной вероятности P. Обычно задаются значением $P = 0.9...0.95$).

Тогда статистическое значение показателя X может быть представлено в следующем виде:

$$X = X_H \ldots X_B.$$

15.2.4 Анализ параметров методом доверительных интервалов

Метод применяется главным образом для оценки результатов эксплуатации или испытаний группы изделий, когда в нормативах заданы, например, минимально допустимая наработка на отказ $T_{доп}$, максимально допустимое количество отказов $M_{доп}$, максимально допустимая интенсивность отказов $\lambda_{доп}$ или какой либо иной показатель надежности.

Ожидаемое значение наработки на отказ $T_о$ или ожидаемое значение отказов $M_о$ (или $\lambda_о$) неизвестно, однако при этом должен быть известен закон распределения отказов.

Сущность метода заключается в том, что по результатам проводимых испытаний определяется средняя величина (T' или M' или λ'). Затем, по коэффициентам, определяемым для заданной доверительной вероятности и соответствующего закона распределения, вычисляются нижняя и верхняя доверительные границы соответствующего показателя (например, $T_н$ и $T_в$), после чего проводится анализ взаимного положения доверительных границ и норматива.

При этом возможны три случая:

1. Если $T_н \geq T_{доп}$ или $M_н \leq M_{доп}$ или $\lambda_н \leq \lambda_{доп}$ - требования нормативов подтверждены.

При $M \neq 0$ (отказы есть) доверительные границы $T_н$ и $T_в$, $M_н$ и $M_в$, $\lambda_н$ и $\lambda_в$ определяются по формулам (8.1, 8.2).

При $M = 0$ (отказов нет) верхняя доверительная граница $T_в$ не определяется, а нижняя доверительная граница $T_н$ определяется по формуле

$$T_H = \frac{T_{\text{СУМ}}}{R_0},$$

где $T_{сум}$ - суммарная наработка всех n изделий, определяемая по формуле

$$T_{\text{СУМ}} = \sum_{i=1}^{n} t_i,$$

t_i - наработка i-го изделия; R_o - коэффициент определяемый по таблице 8.2;

2. Если $T_в < T_{доп}$ или $M_в > M_{доп}$, или $\lambda_в > \lambda_{доп}$ – требования нормативов не подтверждены;

3. Если $T_н < T_{доп} < T_в$ или $M_н > M_{доп} > M_в$, или $\lambda_н > \lambda_{доп} > \lambda_в$ - информации для определенного вывода (первый или второй случаи) недостаточно. Накопление данных по эксплуатации или испытанию изделий необходимо продолжить.

Расчет среднего значения соответствующего показателя надежности по имеющимся результатам эксплуатации (испытаний) выполняется по формуле среднего арифметического. Например, для средней наработки на отказ T' формула имеет вид

$$T' = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} t_i,$$

где n - количество наблюдаемых изделий;

На рисунке 15.6 представлена графическая иллюстрация метода оценки надежности по результатам эксплуатации (испытаний) методом доверительных интервалов.

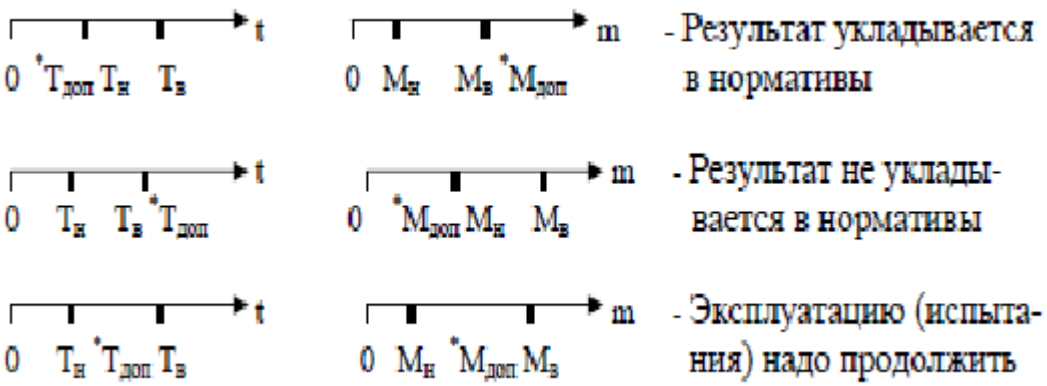


Рисунок 15.6- Варианты взаимного расположения норматива и доверительных границ

Обозначения:

$T_{доп}$ - минимально допустимая наработка на отказ;

$T_{н}(T_{в})$ - нижняя (верхняя) доверительная граница наработки на отказ;

$M_{доп}$ - максимально допустимое число отказов;

$M_{н}(M_{в})$ - нижняя (верхняя) доверительная граница числа отказов.

Если метод используется для оценки результатов испытаний, то при этом необходимо учитывать и план проведения испытаний. Обычно испытания проводят по одному из двух вариантов планов:

-первый план - с ограниченной продолжительностью испытаний (с ограниченной суммарной наработкой изделий $T_{сум}$);

-второй план - с ограниченным суммарным количеством отказов $M_{сум}$.

При первом плане после достижения установленной суммарной наработки среднее время наработки на отказT' может быть определено по формуле

$$T_{\text{СР}} = \frac{\text{Т}_{\text{СУМ}}}{\text{М}_{\text{СУМ}}},$$

где $M_{сум}$ - суммарное количество отказов за установленную суммарную наработку всех наблюдаемых изделий.

При втором плане испытания проводят до тех пор, пока не накопится заданное число отказов $M_{сум.}$

15.3 Стратегии эксплуатации, обслуживания и ремонта устройств по состоянию

В настоящее время проводятся исследования и проводятся эксперименты по расширению внедрения принципа технической эксплуатации (ТЭ) узлов, блоков, агрегатов и элементов конструкций «по техническому состоянию».

При этом продолжительность ТЭ для элементов определяется по предельной величине контролируемых параметров работоспособного состояния, а объем и периодичность работ зависит от значения контролируемого параметра. При этом плановыми работами являются только работы по контролю технического состояния. Внеплановые работы по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР), определяются по результатам контроля, т.е. основная цель перехода на принципы ТЭ «по техническому состоянию»:

- повышение безотказности;
- снижение затрат на ТЭ.

Стратегия ТОиР по состоянию с контролем параметров представляет собой совокупность правил по определению режимов и регламента диагностирования изделий и принятию решений о необходимости их

обслуживания, замены или ремонта на основе информации о фактическом техническом состоянии. При данной стратегии ТОиР изделия и системы эксплуатируются (используются) до предотказного состояния.

Для выявления предотказного состояния изделий может использоваться принцип назначения упреждающих допусков на диагностические параметры. При этом под упреждающим допуском понимают совокупность значений параметров, заключенным между предельным η_2 и предотказовымη_1 уровнями параметра. Выход параметра за предельный уровень означает отказ. Достижение предотказового уровня означает необходимость выполнения профилактических работ или замены изделий (рисунке 15.7).

Реализация стратегий ТОиР по состоянию с контролем параметров требует установления количественных связей между значениями упреждающих допусков $\Delta\eta = \eta_2 - \eta_1$ на каждый из контролируемых параметров изделия и периодичностью их проверок $\Delta t = t_2 - t_1$. Очевидно, что при заданных случайном процессе $\eta(t)$, предельном уровне η_2 и допустимой вероятности отказа каждому фиксированному значению упреждающего допуска $\Delta\eta$соответствует конкретная величина периодичности проверок Δt.

При этом чем больше эти величины, тем меньше затраты на проверки (реже проверки) и больше затраты на замену и ремонт (чаще замены), и наоборот. Оптимальный вариант выбирается из условия обеспечения минимальных суммарных удельных затрат C_{min} на проверку, замену и ремонт изделия.

Для каждого из изделий находятся функции вида $C = f(\Delta t)$, которые используются при решении задачи группировки операций технического обслуживания, в том числе и операций диагностирования, в оптимальные формы регламента для ЛА в целом.

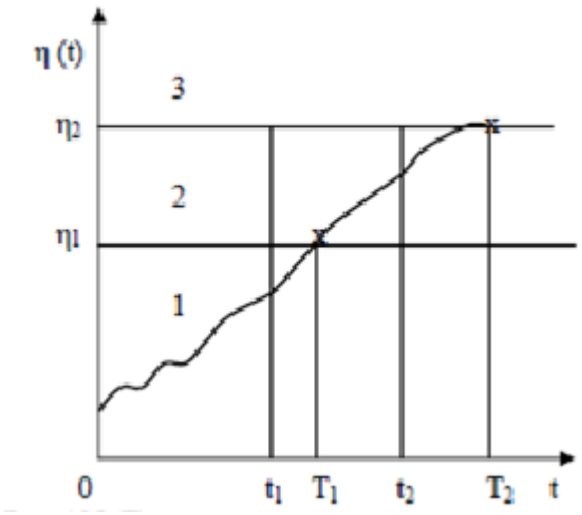


Рисунок 15.7- Принцип назначения упреждающих допусков: 1-область исправного и работоспособного состояния; 2-область неисправного, но

работоспособного состояния; 3- область неисправного и неработоспособного состояния; t_1 и t_2 – моменты первой и второй проверок; T_1 и T_2 – моменты пересечения реализацией случайного процесса $\eta(t)$ уровней η_1 и η_2.

Область применения стратегии обслуживания и ремонта с контролем параметров целесообразно огранить системами и изделиями, которые по соображениям безопасности не могут быть допущены к эксплуатации до отказа, а по экономическим соображениям – к эксплуатации по выработке установленного межремонтного ресурса. К ним относятся дорогостоящие системы и изделия с высокой функциональной значимостью, имеющие недостаточную степень резервирования и вместе с тем обладающие высоким уровнем эксплуатационной технологичности и контролепригодности.

Оперативный контроль технического состояния должен обеспечивать: сигнализацию о наличии отказа, о работоспособном состоянии, о необходимости проведения предупредительных работ для обеспечения экстремума выбранного критерия качества; краткосрочное прогнозирование работоспособности на заданный интервал времени в случае сигнализации о необходимости проведения предупредительных работ; поиск съемного функционального элемента, подлежащего замене; оценку технического состояния изделия в интересах сбора информации об их поведении.

При внешней простоте такого подхода его реализация наталкивается на ряд существенных трудностей. Это относится, прежде всего, к выбору совокупности параметров и определению областей работоспособности для каждого из выбранных параметров. Значительные трудности возникают и при аппаратурной реализации данной стратегии, обусловленные необходимостью применения большого числа разнородных первичных преобразователей и коммутаторов.

Характерная особенность рассматриваемой стратегии ТОиР - отсутствие межремонтных ресурсов изделий. Решение о продолжении эксплуатации до следующей проверки или о необходимости замены (регулировки) изделия принимается по результатам непрерывного или периодического контроля параметров, определяющих техническое состояние.

Необходимые условия для применения стратегии ТОиР по состоянию с контролем параметров вытекает из требований по безопасности движения, регулярности отправлений и экономичности эксплуатации.

Безопасность движения на железной дороге достигается в результате обеспечения заданного уровня безотказности конструкции повышенной живучести, оценки и прогнозирования уровня работоспособности при эксплуатации, обнаружения отказов и неисправностей на ранних стадиях их развития, индикации отказов и предотказовых состояний, использования средств технического диагностирования.

Регулярность отправлений достигается за счет быстрого обнаружения возникших отказов и неисправностей, создания потребных уровней

эксплуатационной технологичности (контролепригодности, доступности, легкосъемности, взаимозаменяемости), позволяющих оперативно восстановить работоспособность системы или изделия.

Экономическая эффективность эксплуатации достигается выбором оптимальной стратегии ТОиР, обеспечивающей экстремальные значения целевой функции (минимум удельной стоимости ТОиР и максимум коэффициента использования) при заданном уровне надежности функциональных систем и изделий.

Необходимые и достаточные условия назначения принципа ТЭ по техническому состоянию с контролем параметров:

1. Назначается для изделий, отказы которых не влияют на безопасность движения.

2. Для изделий, отказы которых имеют постепенную природу проявления и выявляются заданными средствами контроля технического состояния.

3. Высокая контролепригодность изделий АТС и ЭНС.

4. Обязательное наличие методов и средств контроля технического состояния и его прогнозирование.

5. Межремонтный ресурс не назначается.

6. Наработка на отказ изделий АТС и ЭНС имеет существенный разброс.

7. Необходимость наличие методик обоснования назначения и корректировки допусков на наработку изделий АТС и ЭНС. В настоящее время в зарубежных странах (США, Англия) оборудование отправляется в капитальный ремонт только по состоянию, а не из-за выработки установленного ресурса.

Переход на принцип «по техническому состоянию» требует значительного совершенствования качества выполнения работ по контролю технического состояния.

Рекомендованная литература: [6]

Контрольные вопросы

1.Понятие о прогнозировании технического ресурса устройств по результатам диагностирования.

2.Назовите принцип статистического анализа.

3.Дайте оценку точности контролируемых параметров.

4.Анализ параметров методом доверительных интервалов.

5.Назначение доверительных границ при экспоненциальном распределении.

6.Назовите стратегии эксплуатации, обслуживания и ремонта устройств.

Заключение

«Автоматизированные системы управления с технической диагностикой» рассматриваются при изучении дисциплин «Системы технической диагностики», «Техническая эксплуатация СДКМ», «Диагностика СДКМ» по специальности «Автоматизация и управление». Перечень учебников и учебных пособий, отвечающих известным предъявляемым требованиям и изданных за последние годы по изложенным в пособии вопросам, крайне ограничен.

В учебном пособии достаточно подробно и доступно обобщены материалы по теоретическим основам технической диагностики СДМ автоматизированных систем, нашедшие отражение в различных библиографических источниках за весь период формирования этой области знаний.

В учебном пособии рассмотрены многие вопросы и специальные методы контроля технического состояния автоматического управления, прогнозирования их ресурса, поиска и локализации неисправностей, которые заслуживают особого внимания, например:

– методики технического диагностирования машин по обобщенным и интегральным параметрам с использованием стендов и автоматизации комплексов технической диагностики;

– описание сканеров, анализаторов, цифровых и аналоговых приборов и специальных тестеров, методик их использования в технической диагностике СДКМ;

– автоматизированные технологии технического диагностирования агрегатов, механизмов, узлов и систем СДКМ;

– описание и принципы использования в системах технической диагностики СДМ и автомобилей CAN интерфейсов;

– принципы построения и использования универсальных линий технического контроля машин;

–автоматизированное тестирование и сертификация специалистов-диагностов.

Очень кратко рассмотрены методы оценки точности и достоверности технического диагностирования. Авторы заранее выражают признательность за конструктивные предложения и замечания сотрудникам академии, направленные на улучшение содержания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И.А.Техническая диагностика. – М.: Машиностроение,1978. 240 с.

2. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988.

3. Дмитренко И.Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики. М.: Транспорт, 1986. 144 с.

4. Дмитренко И.Е., Сапожников В.В., Дьяков Д.В. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Учебник для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. И.Е. Дмитренко. М.: Транспорт, 1994. – 263 с.

5. Лесин В.В., Лисовец Ю.П. Основы методов оптимизации. Учебное пособие. - М.: Издательство МАИ, 1998.

6. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог. Учебник для вузов ж.-д транспорта / А.В. Ефимов, А.Г. Галкин. М.: УМК МПС России, 2000 – 512 с.

7. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995.- 488 с.

8. Основы технической диагностики. В 2-х книгах. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза. Под ред. П.П. Пархоменко. М.: Энергия, 1976, 464 с.

9. Пархоменко П.П., Сагомонян Е.С. Основы технической диагностики. Кн.2. Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства. Под ред. П.П. Пархоменко. М.: Энергия, 1981. 320 с.

Учебное пособие

Байкенов Бахытжан Сергеевич
Сагындикова Айгул Журсиновна

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКОЙ