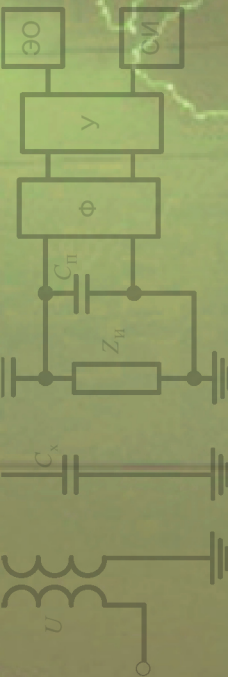


Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт энергетики и электротехники  
Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

А.А. Кувшинов  
В.П. Тараканов

# ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Практикум



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет», 2016

ISBN 978-5-8259-0919-6

УДК 621.311  
ББК 30.82+31.279

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор Саратовского государственного  
технического университета им. Ю.А. Гагарина *С.Ф. Степанов*;  
д-р техн. наук, профессор Тольяттинского государственного  
университета *В.К. Шакурский*.

Кувшинов, А.А. Диагностика технического состояния электрооборудования в системах электроснабжения : практикум / А.А. Кувшинов, В.П. Тараканов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. – 1 оптический диск.

Практикум содержит теорию и контрольные задания для практических и самостоятельных занятий по курсу «Организация эксплуатации, ремонт и диагностика электрооборудования».

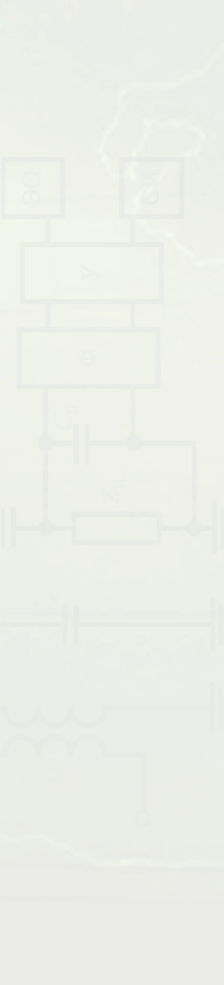
Предназначен для магистрантов направления 140400.68 (13.04.02) «Электроэнергетика и электротехника», обучающихся по магистерской программе «Режимы работы электрических источников питания подстанций, сетей и систем».

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; ПИП 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; Adobe Acrobat Reader.

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет», 2016



Редактор *Г.В. Данилова*  
Технический редактор *З.М. Малявина*  
Корректор *Е.В. Ахмадуллина*  
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*  
Художественное оформление,  
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*


Дата подписания к использованию 25.11.2016.

Объем издания 5 Мб.

Комплектация издания:

компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-50-14.



Издательство Тольяттинского  
государственного университета  
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,  
тел. 8 (8482) 53-91-47, [www.tltsu.ru](http://www.tltsu.ru)

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 5  |
| Практическое занятие 1. ХАРАКТЕРИСТИКА<br>ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК КАК ОБЪЕКТОВ<br>ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ..... | 7  |
| Практическое занятие 2. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ<br>ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК .....   | 13 |
| Практическое занятие 3. АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ .....   | 18 |
| Практическое занятие 4. СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО<br>ДИАГНОСТИРОВАНИЯ .....                           | 24 |
| Практическое занятие 5. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА<br>ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ .....              | 34 |
| Практическое занятие 6. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА<br>ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ .....           | 55 |
| КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ И ПРИМЕРНЫЕ ОТВЕТЫ<br>ПО ТЕМАМ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ .....                     | 82 |
| Библиографический список .....  | 90 |

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что высоковольтное электрооборудование (силовые трансформаторы, высоковольтные выключатели и средства защиты от перенапряжения) является важнейшим узлом распределительной сети. Самым дорогим элементом на любой подстанции является преобразователь напряжения – силовой трансформатор. Большинство этих преобразователей напряжения в течение многих лет работают при различных климатических условиях и подвергаются внешним и внутренним воздействиям электромагнитной и механической природы.

Мировой опыт показывает, что экономический ущерб от случайной аварии мощного силового трансформатора, связанный только с остановкой промышленных предприятий из-за отсутствия питающего напряжения, исчисляется миллионами долларов, не говоря уже о весьма крупных затратах, необходимых для восстановления работоспособности дорогостоящего оборудования.

Статистические исследования, проведённые за рубежом, показывают, что вероятность отказа масляного трансформатора составляет 0,0062 аварии в год. Другими словами, это означает, что в энергосистеме, состоящей из 160 масляных трансформаторов, возможна по крайней мере одна авария в год. С другой стороны, характерной тенденцией современной электроэнергетики являются нарастание степени изношенности основного силового электрооборудования и недостаточные темпы его обновления.

В последние два десятилетия в электроэнергетике широко применяется диагностика высоковольтного электрооборудования с помощью приборов, изготовленных на современной микроэлектронной базе. На их основе появилось множество приборов инфракрасной техники, различные модификации хроматографических устройств, множество разновидностей осциллографов и регистраторов, легко сопрягаемых с персональным компьютером, и т. д.

Одним из перспективных направлений ускоренной и автоматизированной диагностики является использование микропроцессорных устройств и цифровых методов обработки результатов измерений и испытаний, которые не нашли ещё широкого и повсе-

местного применения в практической деятельности инженерных служб в электроэнергетике.

Важный и достаточно объективный метод диагностики высоковольтного оборудования – обследование под рабочим напряжением электрооборудования в инфракрасном диапазоне с помощью тепловизора. За последние десятилетия с помощью приборов инфракрасной техники в энергосистемах были обнаружены десятки тысяч развивающихся дефектов.

Всё шире используются методы и аппаратура для контроля частичных разрядов на силовых и измерительных трансформаторах, электродвигателях и генераторах. Электронно-оптические методы и цифровая аппаратура занимают особое место при контроле электроразрядных и тепловых процессов благодаря дистанционности и оперативности процесса измерения, а также высокой информативной способности.

Другой часто применяемый метод диагностики маслонаполненного электрооборудования – хроматографический метод определения растворённых газов в диэлектрической жидкости.

Разработка новых методов контроля (при которых измеряются различные данные и параметры, характеризующие состояние силовых трансформаторов, высоковольтных выключателей и средств защиты от перенапряжения) и диагностики электрооборудования (без вскрытия баков высоковольтных аппаратов), при которых обрабатываются полученные данные с целью нахождения дефектов и прогнозирования возможных аварий, является, безусловно, актуальной задачей.

## **Практическое занятие 1**

### **ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК КАК ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

**Цель практического занятия** — формирование у магистрантов следующих компетенций:

- готовность к проверке технического состояния и остаточного ресурса электрооборудования;
- способность организации профилактических осмотров и опытной проверки электроэнергетического и электротехнического оборудования.

#### **Краткие теоретические сведения: основные понятия технической диагностики**

**Техническая диагностика** — область знаний, которая охватывает теорию, методы, алгоритмы и средства определения состояния технического объекта.

**Объект диагностирования (ОД)** — оборудование, система, прибор, блок, подвергаемые диагностированию. Любой объект диагностирования состоит из отдельных структурных элементов. Под структурным элементом понимают часть объекта диагностирования, которую при диагностировании нельзя разделить на более мелкие элементы. Например, проходной изолятор может рассматриваться как объект диагностирования, состоящий из одной структурной единицы, а воздушная линия — как минимум из трех структурных единиц (опора, провод, изолятор).

**Задачи диагностирования.** При диагностировании могут решаться следующие задачи:

- контроль работоспособности, который заключается в проверке соответствия значений диагностических признаков требованиям технической документации и определении на этой основе вида технического состояния объекта диагностирования в данный момент времени;
- поиск места и определение причины возникновения дефекта;
- прогнозирование изменения состояния объекта диагностирования, которое заключается в изучении характера изменения диагностических параметров под влиянием внешних и внутренних

воздействий и предсказании на этой основе значений диагностических параметров в будущий момент времени.

**Техническое состояние** – состояние объекта диагностирования, которое характеризуется в определенный момент времени и при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией. Выделяют два вида технических состояний: работоспособное и неработоспособное.

*Работоспособность* – состояние, при котором значения диагностических признаков, характеризующих способность объекта диагностирования выполнять заданные функции, соответствуют установленным требованиям.

*Неработоспособность* – состояние, при котором значения хотя бы одного диагностического признака, характеризующего выполнение объектом заданных функций, не соответствуют установленным требованиям.

Причиной потери работоспособности является *дефект*. Различают дефекты одиночные, кратные (несколько одновременно), логические (нарушение алгоритмов) и физические (элементы, связи между элементами).

Возможны дефекты, при которых объект сохраняет работоспособность за счет избыточности (структурной, временной, информационной). Например, в гирлянде изоляторов воздушной линии появились нулевые элементы, т. е. возник дефект, но объект не потерял работоспособности. В этом случае снизился запас прочности и, следовательно, возросла вероятность отказа в дальнейшем.

**Диагностический признак** – параметр или характеристика, несущие информацию об изменении состояния объекта диагностирования.

*Параметр* – физическая величина (сила тока, напряжение, мощность, частота и т. д.).

В качестве диагностических параметров могут использоваться индуктивность и резонансная частота обмоток силовых трансформаторов и электрических машин, сопротивление изоляции элементов электроустановок, интенсивность частичных разрядов, температура, вибрация, ток несимметрии, мощность потерь, уровень напряженности электромагнитного поля и др. Обычно на диагностические параметры накладывают ограничения с одной или с двух сторон:



$$\Pi_i > \Pi_i(\text{н});$$

$$\Pi_i < \Pi_i(\text{в});$$

$$\Pi_i(\text{н}) < \Pi_i < \Pi_i(\text{в}),$$

где  $\Pi_i$  – диагностический параметр;  $\Pi_i(\text{н})$ ,  $\Pi_i(\text{в})$  – нижняя и верхняя границы допустимых значений диагностического параметра.

Например, сопротивление изоляции  $R_{\text{и}} > 300 \text{ МОм}$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta < 0,02$ , ток нагрузки силового трансформатора  $I_{\text{ном}} < I < 1,25I_{\text{ном}}$ .

*Характеристика* – зависимость одной физической величины от другой.

Существуют статические и динамические характеристики.

Статическая характеристика показывает, что величина не зависит от времени (частоты). Например, внешняя характеристика  $U = f(I)$ .

Динамическая характеристика показывает зависимость физической величины от времени (частоты). Например, амплитудно-частотная характеристика  $A = f(\omega)$ , переходная  $h(t)$  характеристика.

Существует несколько критериев количественной оценки отклонения текущей характеристики от номинальной:

– критерий среднего отклонения

$$\Delta_1(x) = \int_{x_{\text{min}}}^{x_{\text{max}}} [f_{\text{т}}(x) - f_{\text{н}}(x)] dx,$$

где  $f_{\text{т}}(x)$ ,  $f_{\text{н}}(x)$  – текущая и номинальная характеристики объекта диагностирования;  $x_{\text{max}}$ ,  $x_{\text{min}}$  – длительность интервала, на котором оценивается отклонение.

Недостатком данного критерия является одинаковая чувствительность как к величине абсолютного отклонения, так и к длительности интервала оценки:

– критерий среднеквадратичного отклонения

$$\Delta_2(x) = \sqrt{\int_{x_{\text{min}}}^{x_{\text{max}}} [[x_{\text{max}}, x_{\text{min}}] - f_{\text{н}}(x)]^2 dx};$$

– критерий равномерного приближения

$$\Delta_3(x) = \max [f_{\text{т}}(x) - f_{\text{н}}(x)],$$

оценивающий максимальное отклонение на интервале  $[x_{\text{max}}, x_{\text{min}}]$ . Если максимальное отклонение мало, то на всем интервале оценки текущая  $f_{\text{т}}(x)$  и номинальная  $f_{\text{н}}(x)$  характеристики будут мало отличаться друг от друга.

Условие работоспособности записывается в виде неравенства

$$\Delta_i(x) < \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – допустимое отклонение;  $i = 1, 2, 3$  – вид критерия оценки.

Если указанное неравенство выполняется для всех точек рассматриваемой характеристики, то объект диагностирования признается работоспособным.

**Диагностирование** – процесс определения технического состояния объекта диагностирования. Различают рабочее и тестовое диагностирование.

При *рабочем диагностировании* техническое состояние объекта оценивается по выходным параметрам при рабочих воздействиях.

При *тестовом диагностировании* техническое состояние объекта оценивается по реакции на специальное тестовое воздействие.

**Алгоритм диагностирования** – совокупность предписаний, определяющих последовательность действий при проведении диагностирования.

**Средства диагностирования** – аппаратура, программы и ремонтно-эксплуатационная документация, позволяющая оценить техническое состояние объекта диагностирования.

**Отказ** – событие, заключающееся в нарушении работоспособности оборудования. В табл. 1 представлена классификация отказов.

Таблица 1

Классификация отказов

| Классификационный признак              | Вид отказа   |
|--|--|
| Характер изменения параметра до отказа | Внезапный<br>Постепенный                               |
| Степень потери полезных свойств        | Полный<br>Частичный                                    |
| Восстанавливаемость полезных свойств   | Необратимый<br>Обратимый                               |
| Связь с другими отказами               | Зависимый<br>Независимый                               |
| Наличие внешних признаков              | Явный<br>Неявный (скрытый)                             |
| Причины возникновения                  | Конструкционный<br>Технологический<br>Эксплуатационный |

## Индивидуальные практические задания

Индивидуальное практическое задание предусматривает подготовку ответов на контрольные вопросы и решение задачи.

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте отличия и сходства понятий «диагностика» и «диагностирование».
2. Что представляют собой «диагностирующий параметр» и «диагностическая характеристика»?
3. Приведите примеры диагностических параметров.
4. Приведите примеры диагностических характеристик.
5. Дайте определение понятия «работоспособность».
6. Какие основные задачи решаются при диагностировании?
7. Как определяется расстояние между текущей и номинальной диагностическими характеристиками?
8. Как формулируется условие работоспособности по значениям диагностических параметров?
9. Как записывается условие работоспособности для диагностических характеристик?
10. Какие различают виды отказов?

*Задача.* Составить таблицу диагностических параметров для контроля работоспособности следующих видов электрооборудования.

1. Опорные и проходные изоляторы.
2. Линейные изоляторы.
3. Высоковольтные изоляторы.
4. Компенсирующие конденсаторы.
5. Токоограничивающие реакторы.
6. Дугогасящие реакторы.
7. Силовые двухобмоточные трансформаторы.
8. Силовые трансформаторы с расщепленной обмоткой.
9. Автотрансформаторы.
10. Измерительные трансформаторы тока.
11. Измерительные трансформаторы напряжения.
12. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.
13. Асинхронные двигатели с фазным ротором.

14. Синхронные генераторы.
15. Воздушные выключатели.
16. Масляные выключатели.
17. Элегазовые выключатели.
18. Вакуумные выключатели.
19. Разъединители и короткозамыкатели.
20. Разрядники и ограничители перенапряжений.

## Практическое занятие 2

### МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

**Цель практического занятия** — формирование у магистрантов следующих компетенций:

- способность к организации профилактических осмотров и текущего ремонта электрооборудования;
- готовность к составлению заявок на оборудование и запасные части и подготовке технической документации на ремонт.

#### **Краткие теоретические сведения: характеристика задачи прогнозирования**

Термин *прогноз* происходит от греческого слова *prognosis*, что означает предвидение, предсказание о развитии чего-либо, основанное на определенных данных, например, прогноз погоды, прогноз состояния технического объекта.

**Прогнозирование** — составление прогноза развития, становления, распространения чего-либо, например, науки, отрасли производства, процесса, надежности на основании изучения тщательно отобранных данных.

При решении задач прогнозирования находят применение два понятия:

1) **интерполяция** (лат. *interpolation* — изменение) — означает определение промежуточных значений функции по некоторым известным ее значениям;

2) **экстраполяция** (лат. *extra + poliren* — сверх + гладкий) — характеризует определение значений функции за пределами интервала, где известны ее значения.

В технической диагностике обычно говорят о прогнозировании состояния объекта диагностирования (ОД) на основе данных об изменениях, происходящих в объекте с течением времени под влиянием внешних воздействий и внутренних необратимых физико-химических превращений.

Причины отказов в большинстве случаев следующие: деформация и механическое разрушение материалов, нарушение электрической прочности (пробой), тепловые разрушения элементов (пе-

регорание, расплавление), износ поверхностей деталей. При этом прогнозирование рассматривается как одна из задач, решаемых в ходе оценивания состояния ОД.

При решении этой задачи имеем дело со *случайными процессами*, представляющими изменения случайной величины при изменении неслучайного параметра. Случайные величины – значения диагностических признаков, неслучайный параметр – время.

Для решения задачи прогнозирования все время существования технического объекта разделяется на два интервала:  $T_1$  – интервал наблюдения за состоянием объекта, в нем осуществляется измерение значений параметров и интерполяция функции их изменения;  $T_2$  – интервал, в котором осуществляется прогнозирование (экстраполяция функции, полученная на интервале  $T_1$ ).

Чем больше  $T_1$ , тем достовернее прогноз, поскольку с увеличением  $T_1$  возрастает объем информации о прогнозируемом процессе. Однако увеличение интервала наблюдения приводит к дополнительным затратам, связанным с выполнением длительного эксперимента или дополнительной обработкой данных, характеризующих состояние объекта. В связи с этим на практике при прогнозировании состояния ОД стараются по возможности сократить величину  $T_1$ . Интервал наблюдения может предшествовать использованию объекта или совпадать с использованием объекта по назначению.

По назначению прогнозирование подразделяется на индивидуальное (для конкретного объекта) и групповое (для партии однотипных объектов); по времени прогнозирования – на локальное (время прогноза незначительное) и глобальное (до потери работоспособности).

Задача прогнозирования изменения состояния объекта может быть решена методами экстраполяции или классификации. При экстраполяции реализуется принцип переноса на будущее тенденций прошлого. При этом изменение состояния ОД определяется значениями детерминированных или вероятностных характеристик состояния объекта на основе данных, получаемых на интервале наблюдения.

Процедура прогнозирования включает анализ результатов наблюдения, построение аналитического выражения, связывающего

результаты наблюдения (интерполяцию) и, соответственно, экстраполяцию с помощью полученного выражения. При экстраполяции в ходе прогнозирования предполагается, что условия работы объекта, которые отмечались при наблюдении, и в дальнейшем остаются неизменными или изменяются по известному закону.

При прогнозировании изменения состояния ОД, несмотря на его вероятностный характер, методами экстраполяции решаются как детерминированные, так и вероятностные задачи.

При классификации необходимо обнаружить общие черты в различных объектах, систематизировать их и отнести к классу известных. В этом случае приходится решать две задачи: во-первых, построить множество классов, которые характеризуются определенной совокупностью признаков и соответствуют набору диагностических параметров конкретного объекта; во-вторых, оценить признаки по полученным результатам и отнести объект прогнозирования к тому или иному классу.

При решении первой задачи требуется большой объем статистических данных, полученных в период использования объектов. Возможность формирования классов во многом определяется удачным выбором набора диагностических признаков. Эти признаки должны достаточно точно характеризовать процессы, приводящие к потере работоспособности объекта, и их оценка с требуемой точностью не должна представлять больших трудностей.

Успех в решении второй задачи во многом определяется искусством распознавания, т. е. отнесением ОД по результатам оценки к известному классу, характеризующему определенной тенденцией изменения состояния ОД с течением времени.

В зависимости от используемого *математического аппарата* различают три вида прогнозирования:

- 1) аналитическое, основанное на степенных рядах и уравнениях регрессии;
- 2) вероятностное, основанное на теории вероятности;
- 3) статистическая классификация, основанная на теории распознавания образов.

В первом случае используют наиболее распространенные методы прогнозирования: степенных полиномов, обобщенного пара-

метра, градиентные, моделирования. Во втором – статистической экстраполяции, вероятностных неравенств, планирование экспериментов, на основе «марковских» процессов. В третьем – на основе обучения и без обучения.

Решение задачи прогнозирования для конкретного ОД позволяет:

- выявить элементы (блоки) объекта, работоспособность которых существенно изменится в ближайший интервал времени, и, следовательно, своевременно подготовить запасные или резервные элементы для замены;
- обосновать количество запасных блоков или элементов и объем запасных частей на весь период использования объекта;
- определить сроки проведения профилактических работ, направленных на повышение работоспособности объекта.

## Тесты

1. Раскройте содержание понятий интерполяции и экстраполяции:

- а) интерполяция – определение промежуточных значений функции по некоторым ее известным значениям; экстраполяция – определение значений функции за пределами интервала, где известны ее значения
- б) интерполяция – определение значений функции за пределами интервала, где известны ее значения; экстраполяция – определение промежуточных значений функции по некоторым ее известным значениям
- в) интерполяция – определение значений функции по ее известным значениям за пределами рассматриваемого интервала; экстраполяция – определение значений функции за пределами интервала, где известны ее значения

2. Что такое случайный процесс?

- а) изменение случайной величины при изменении случайного параметра
- б) изменение случайной величины при изменении неслучайного параметра
- в) изменение неслучайного параметра при изменении случайной величины



**3. Какие процессы можно прогнозировать?**

- а) имеющие колебательный характер без тренда
- б) предполагающие внезапные отказы
- в) обладающие свойством монотонности и плавности

**4. Чем отличается локальный прогноз от глобального?**

- а) при локальном прогнозируется работоспособность одного ОД, при глобальном – группы ОД
- б) при локальном прогнозируется работоспособность одного ОД до отказа, при глобальном – группы ОД до отказа

## **Практическое занятие 3**

### **АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ**

**Цель практического занятия** — формирование у магистрантов следующих компетенций:

- способность к разработке планов, программ и методик проведения испытаний электротехнических и энергетических устройств и систем;
- готовность к составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний.

#### **Краткие теоретические сведения: основные разновидности алгоритмов поиска дефектов**

Решение задачи поиска возникшего дефекта, в отличие от задачи контроля работоспособности, как правило, требует более длительного анализа ОД или его модели. При этом степень детализации объекта определяется заданной глубиной поиска дефекта, т. е. указанием части объекта (структурной единицы) с точностью, до которой решается задача. Таким образом, если задана глубина поиска дефекта, то объект диагностирования может быть представлен множеством из  $n$  взаимосвязанных частей — структурных единиц (СЕ).

Поиск дефекта или состояния, в котором находится объект, выполняют по алгоритму, включающему определенную совокупность проверок.

*Проверкой* называют оценивание состояния структурной единицы. Каждая проверка требует определенных затрат. При построении алгоритма поиска дефекта стараются выбрать такую последовательность проверок, которая позволяет найти дефект с наименьшими затратами. Для построения алгоритмов поиска дефектов могут быть использованы функциональные схемы. Сигналы в схемах электрооборудования проходят по сигнальным цепям двух видов: последовательные и разветвленные.

В связи с тем что современные электрические системы содержат сотни компонентов, проверка каждого из них с целью поиска дефекта потребует значительных временных затрат. Масштабы задачи поиска можно уменьшить в несколько раз, если проверять не каждый элемент, а лишь выходной сигнал каждой схемы (каскада).

Однако проведение этого числа проверок тоже является делом весьма трудоемким. Разбив рассматриваемые схемы на СЕ, можно сократить число проверок, доведя до приемлемого уровня (их может быть несколько десятков, число определяется заданной глубиной поиска дефектов).

Поскольку каждая проверка делит пространство состояний на две части (включающая и не включающая искомое состояние), в результате выполнения последовательности проверок поиск приводит к определенному состоянию, соответствующему обнаружению СЕ, которая отказала. Алгоритм выполнения проверок при поиске дефекта может быть представлен в виде графа (дерева), где вершинами являются проверки  $\pi$ , а ветви указывают направление перехода в зависимости от результата проверки, конечные вершины – обнаруживаемые дефекты.

После того как выполнена первая проверка, возможны только два результата: удовлетворительная (+) и неудовлетворительная (–) работа проверяемой СЕ. При последнем структурная единица либо совсем не работает, либо работает с ухудшенными характеристиками. В любом случае полученный результат укажет на следующую проверку.

Алгоритмы поиска дефектов могут быть трех видов: последовательные, параллельные и комбинированные.

При *последовательном* алгоритме каждая проверка выделяет в пространстве поиска один дефект. Удовлетворить это условие можно для ОД, представленного в виде последовательной схемы соединения СЕ. При этом на вход подается сигнал, а по выходному сигналу каждой СЕ можно определить ее состояние. Установить наличие в ОД дефекта можно двумя путями: от начала к концу и от конца к началу. Проиллюстрируем алгоритм поиска дефекта в неработоспособном объекте (на выходе отрицательный результат проверки) на примере ОД, представленного на рис. 3.1, а.

Первый алгоритм поиска (от начала к концу) представлен на рис. 3.1, б. Необходимо выполнить первую проверку  $\pi_1$  в точке А, поскольку она позволит исключить из рассмотрения сразу один элемент СЕ1. Если результат проверки отрицательный, то дефект в данном элементе СЕ1. Если сигнал в допустимых пределах, т. е. результат проверки  $\pi_1$  положительный, то проверку  $\pi_2$  следует вы-

полнить в точке  $B$ , которая позволит определить состояние СЕ2. При отрицательном результате проверки  $\pi_2$ , если дефект СЕ2 положительный, то необходимо выполнить проверку  $\pi_3$  в точке  $C$ . Если результат проверки отрицательный, то дефект – в СЕ3, в противном случае – дефект в СЕ4.

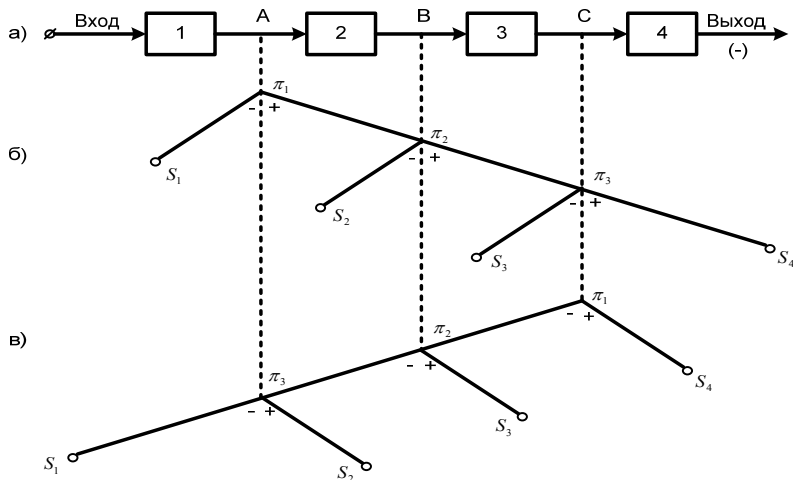


Рис. 3.1. Последовательный алгоритм поиска дефектов

Второй алгоритм поиска (от конца к началу) представлен на рис. 3.1, б. Если результат проверки  $\pi_1$  в точке  $C$  положительный, то дефект в СЕ4, если отрицательный, то следующую проверку  $\pi_2$  необходимо выполнить в точке  $B$ . При положительном результате дефект в СЕ3, при отрицательном выполняют проверку  $\pi_3$ . По результатам этой проверки отыскивают дефект либо в СЕ1, либо в СЕ2.

Число проверок  $N$  для обнаружения всех дефектов ОД определяют соотношением  $N = n - 1$ ;  $n$  – число СЕ объекта.

При параллельном алгоритме поиска объект разбивают каждой проверкой на две равные или почти равные части, если соответственно в ОД четное или нечетное число СЕ. Так, для ОД из четырех СЕ (рис. 3.2) при реализации параллельного алгоритма поиска первую проверку  $\pi_1$  выполняют в точке  $B$ . Если результат отрицательный, то следующую проверку  $\pi_2$  выполняют в точке  $A$ , в результате чего определяют место нахождения дефекта; СЕ1, если результат от-

рицательный, или СЕ2, если положительный. В противном случае назначают проверку  $\pi_3$  в точке С, позволяющую определить дефект в СЕ3 или СЕ4.

Число проверок  $N$ , необходимых для нахождения всех дефектов через число  $CE$ , можем определить по формуле

$$N = [\log_2 n]; [ ] - \text{целая часть.}$$

Например, при  $n = 4$  требуется две проверки, при  $n = 8$  – три проверки.

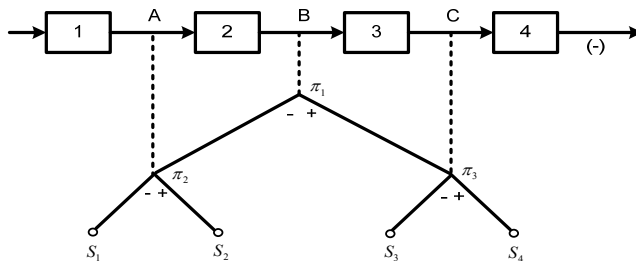


Рис. 3.2. Алгоритм параллельного поиска дефектов

При *комбинированном* алгоритме поиска имеет место сочетание последовательного и параллельного алгоритмов (рис. 3.3).

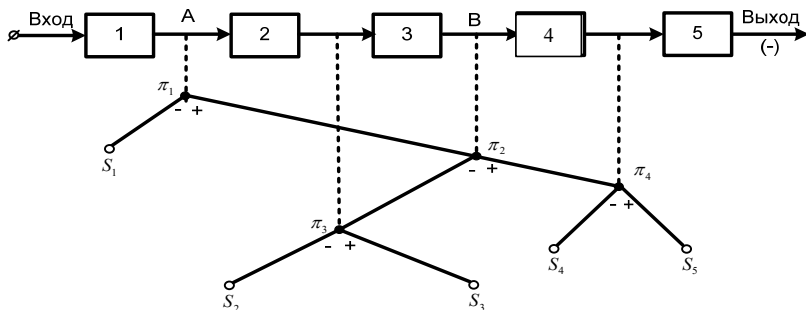


Рис. 3.3. Комбинированный алгоритм поиска дефектов

По алгоритму поиска дефекта в виде дерева можно определить суммарную длину ветвей достижения искомого дефекта:

$$L_i = \sum_{j=1}^p l_{ij},$$

где  $l_{ij}$  – длина  $i$ -й ветви;  $j$  – число ветвей от начала поиска до искомого дефекта. Например, для графа, представленного на рис. 3.3:

$$L_i = \sum_{j=1}^p l_{ij}, p = 2.$$

Если в качестве  $l_{ij}$  рассматривать время  $\tau_{ij}$ , то, воспользовавшись формулой для  $L_j$ , можно определить время  $\tau_{ij}$ , затрачиваемое на поиск 1-го дефекта:

$$\tau_{ij} = \sum_{j=1}^p \tau_{ij}.$$

Алгоритмы поиска дефектов могут быть построены на основе анализа функциональной схемы объекта или использования показателей, характеризующих надежность СЕ.

### Тесты

**1. Что нужно сделать, чтобы составить таблицу дефектов?**

- а) выполнить моделирование дефектов и испытания
- б) провести анализ диагностической модели и испытания
- в) выполнить моделирование дефектов или анализ диагностической модели

**2. Как представить алгоритм поиска дефектов в виде графа?**

- а) вершины – элементы, ветви – проверки
- б) вершины – проверки, ветви – направления движения по результатам проверки
- в) вершины – проверки, ветви – обнаруживаемые дефекты

**3. Назовите основные свойства последовательного алгоритма поиска дефектов:**

- а) последовательное выполнение проверок
- б) обнаружение каждой проверкой одного дефекта
- в) последовательное разбиение ОД на равные части

**4. Что необходимо иметь для построения алгоритма поиска дефектов способом «время – вероятность»?**

- а) время поиска каждого дефекта, вероятности отказов
- б) функциональная схема, время поиска каждого дефекта и вероятность безотказной работы
- в) функциональная схема и вероятность безотказной работы

5. Укажите последовательность действий при анализе таблицы чувствительности функций передачи для построения алгоритма поиска дефектов:

- а) ранжирование строк по чувствительности, ранжирование параметров, к которым функция передачи параметров наиболее чувствительна
- б) ранжирование параметров по чувствительностям к ним функций передач
- в) ранжирование параметров по чувствительностям к ним функций передач, ранжирование функций передач к выбранным параметрам

6. Как можно сократить число проверок для обнаружения всех дефектов при анализе таблицы состояний?

- а) заполнить таблицу по правилу «проверка обнаруживает дефект – 0, не обнаруживает – 1» и исключить наименее информационную проверку
- б) заполнить таблицу попарного сравнения проверок по правилу «различают дефект – 1, не различают – 0» и выбрать наиболее информативную
- в) то и другое

7. Определите правильную последовательность действий при использовании метода распознавания образа:

- а) составить таблицу неработоспособных состояний по результатам моделирования дефектов; построить образы дефектов в координатах рассматриваемых параметров; определить расстояние между текущим состоянием и образом; поставить диагноз
- б) выбрать совокупность диагностических параметров; составить образы рассматриваемых дефектов; определить расстояние от текущего состояния до образов; поставить диагноз
- в) составить таблицу неработоспособных состояний по результатам моделирования дефектов; выбрать совокупность диагностических параметров; построить образы в координатах диагностических параметров; определить расстояние до образов дефектов; поставить диагноз

## Практическое занятие 4

### СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Цель практического занятия – формирование у магистрантов следующих компетенций:

- способность к опытной проверке электротехнического и энергетического оборудования;
- готовность формулировать технические задания и использовать средства технического диагностирования.

#### Краткие теоретические сведения: типовые структуры систем диагностирования

Средства технического диагностирования (СТД) оценивают состояние объекта. Они включают программные средства (ПСД), ремонтно-эксплуатационную документацию (РЭД) и аппаратурные (технические) средства (рис. 4.1).

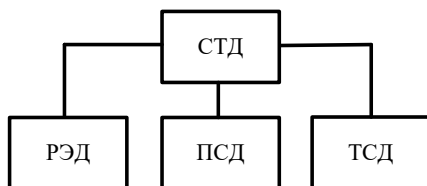


Рис. 4.1. Виды средств диагностирования

К **программным средствам** диагностирования относят пакеты программ, используемые для диагностирования ЭВМ.

**Ремонтно-эксплуатационная документация** включает таблицы дефектов, методики поиска дефектов, ремонтные схемы, схемы электрических межсоединений, принципиальные электрические схемы.

*Ремонтные схемы* представляют собой наглядные пособия, в которых указаны основные сигнальные цепи, изображен вид сигналов в различных контрольных точках и приведено структурное разбиение системы устройства на функциональные узлы (ФУ). Последние делят на функциональные элементы (ФЭ) с указанием выполняемых ими функций.



Ремонтные схемы разрабатываются для ФУ, входящих в систему или устройство. В некоторых случаях для всего устройства приводят одну общую ремонтную схему.

Полезным видом технической документации для поиска дефектов в системе является *схема электрических межсоединений* (рис. 4.2). С ее помощью можно определить место в схеме системы, наиболее доступное для проверок. На схеме электрических межсоединений изображены кабельные соединения между отдельными ФУ системы. Для удобства чтения схемы на нее наносят условные обозначения ( $x_1, x_2, x_3$ ) кабельных разъемных соединений.

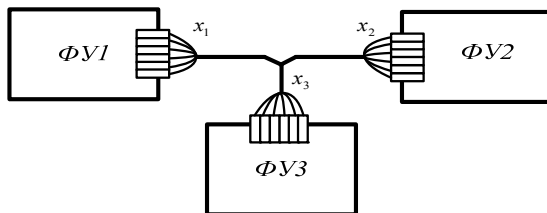


Рис. 4.2. Схема электрических межсоединений

При проверке узлов, не показанных на ремонтных схемах, а также для определения подлежащей восстановлению ветви в локальной неработоспособной схеме (каскаде) крайне полезны *принципиальные электрические схемы*. Для поиска причины отказа ОД с помощью принципиальных электрических схем необходимы таблицы режимных параметров (напряжения, токи и т. п.). Кроме того, здесь же указывают условия, при которых следует выполнять измерения.

Технические средства диагностирования (ТСД) представляют собой приборы или устройства, предназначенные для решения различных задач, возникающих при определении состояния ОД. Состав и принцип построения ТСД определяются решаемыми задачами диагностирования, степенью воздействия на оборудование, степенью встраивания, способами получения информации, способами обработки информации о состоянии оборудования, степенью автоматизации, степенью универсальности и подвижности.

В зависимости от решаемых задач диагностирования можно выделить следующие виды ТСД:

- средства контроля работоспособности;
- средства поиска дефектов;
- средства прогнозирования изменения состояния;
- средства контроля работоспособности и прогнозирования изменения состояния;
- средства контроля работоспособности и поиска дефектов;
- средства контроля работоспособности и прогнозирования изменения состояния, поиска дефектов.

По степени *воздействия на оборудование* ТСД делят на активные и пассивные. Пассивные ТСД выполняют анализ информации о состоянии оборудования, для чего воспринимают, обрабатывают и оценивают диагностические признаки. Активные ТСД воздействуют на оборудование, подавая на входы, отведенные для целей диагностирования, сигналы, стимулирующие реакцию оборудования, которая затем оценивается. В их состав входят генераторы тестов.

*Конструктивно* ТСД могут полностью или частично относиться к объекту (встроенные) или выполняться отдельно от конструкции объекта (внешние).

По способу *получения информации* о состоянии оборудования ТСД делят на средства для определения состояния по совокупности признаков ТСД-П и для оценки состояния по сигналам ТСД-С. В первом случае обрабатывают информацию, снимаемую в контрольных точках, специально предусмотренных в оборудовании. Во втором случае для возможности оценки реакции на рабочем выходе в состав ТСД включают эквивалентную модель, а диагноз устанавливают путем сравнения реакции оборудования и модели на одинаковые входные воздействия по разностному сигналу.

По способу *обработки информации* ТСД могут быть последовательного, параллельного и параллельно-последовательного действия. ТСД последовательного действия осуществляют последовательный прием, измерение, контроль и обработку информации. Они отличаются простотой, использованием минимального числа преобразователей, средств измерения и контроля. Однако при этом способе результат формируется по отдельному признаку после ка-

ждой проверки. На постановку общего диагноза требуется значительное время.

ТСД параллельного действия осуществляют одновременно измерение и контроль всех параметров, что сокращает время формирования общего диагностического признака, по которому осуществляется оценка и прогнозирование состояния оборудования. Их обычно используют при жестких ограничениях на время диагностирования. ТСД параллельно-последовательного действия осуществляют одновременный прием и обработку информации по нескольким каналам. При этом анализ результатов выполняется после реализации группы проверок, т. е. измерения или контроля группы признаков. Подобные средства сложнее ТСД последовательного действия, но более эффективны.

По степени *автоматизации* ТСД делят на ручные, автоматизированные и автоматические. Технические средства, требующие активного участия человека-оператора при их использовании, относятся к ручным. Это все используемые в процессе диагностирования измерительные приборы: осциллографы, генераторы синусоидальных, импульсных сигналов и др. ТСД, при использовании которых роль человека-оператора при постановке диагноза значительна, относятся к автоматизированным. Технические средства, функционирующие с участием человека-оператора, роль которого сводится к выполнению отдельных, достаточно простых операций (включение, переключение, выключение), считаются автоматическими.

Условной границей между этими ТСД может быть доля времени, затрачиваемого на выполнение операций автоматически  $\tau_a$ , в общем времени диагностирования  $\tau_d$ , т. е.  $K_a = \tau_a / \tau_d$ . Если время на автоматическое выполнение операций не более  $0,1 \tau_d$ , то ТСД ручные, а если не менее  $0,9 \tau_d$ , то ТСД автоматические. При коэффициенте  $0,1 < K_a < 0,9$  ТСД автоматизированные.

По степени *универсальности* ТСД разделяют на специализированные и универсальные. Специализированные ТСД предназначены для диагностирования однотипных объектов, универсальные — для диагностирования объектов различного назначения и конструктивного исполнения.

Универсальные ТСД могут быть использованы для оценивания состояния оборудования после изготовления и в период эксплуатации. Такие ТСД часто строятся с применением ЭВМ. В этом случае переход от одного типа оборудования к другому осуществляется путем смены внешней программы диагностирования без изменения структуры технического средства.

Универсальные ТСД, как правило, проектируются с «открытыми входами» под унифицированные сигналы первичных измерительных преобразователей. Такие средства отличаются гибкостью, возможностью ввода новых программ диагностирования. Следует заметить, что универсальные ТСД достаточно сложны и дорогостоящи, а для их обслуживания требуются специалисты высокой квалификации.

Так, универсальными средствами диагностирования являются ТСД, предназначенные для анализа вибрационных полей вращающихся механизмов или определения металлических включений в смазочном масле. К специализированным же относят ТСД для диагностирования энергетических установок или систем автоматического управления ими, измерения электромагнитных полей.

В зависимости от степени *подвижности* ТСД могут быть выполнены переносными, передвижными и стационарными. Стационарные ТСД чаще всего размещают на диагностических станциях, испытательных и контрольных центрах. Передвижные ТСД монтируют на самоходных или несамоходных транспортных средствах. Конструкция переносных должна быть удобна для перемещения персоналом.

В общем виде структурная схема ТСД представлена на рис. 4.3.

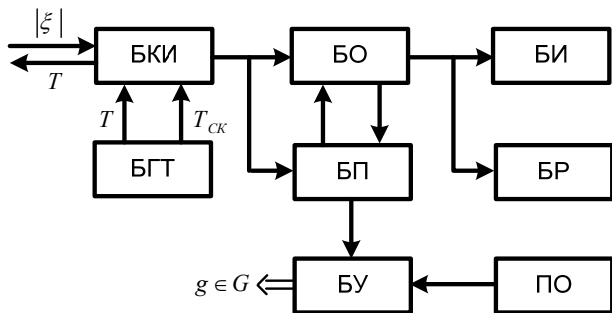


Рис. 4.3. Обобщенная структурная схема ТСД

Оценку состояния при рабочем диагностировании осуществляют по совокупности диагностических признаков, преобразуемых в принятый вид сигналов с помощью датчиков. При этом диагностирование можно выполнять как по результатам измерений, полученных в блоке коммутации и измерений (БКИ), так и непосредственно по сигналам с датчиков в случае допускового контроля и поиска дефектов.

В результате обработки полученных с БКИ измеренных значений диагностических признаков и поступающих с блока памяти (БП) допустимых значений или хранящихся ранее измеренных значений ДП в блоке обработки (БО) формируется «диагноз», который фиксируется в блоке индикации (БИ), включающем схемы управления и световую (звуковую) индикацию, и в блоке регистрации (БР) в виде печатающего устройства или принтера.

При тестовом диагностировании предполагают воздействие на объект с помощью тестов  $T$ , формируемых в блоке генерирования тестов (БГТ) и коммутируемых при необходимости коммутатором тестов в БКИ.

Управление работой ТСД обеспечивает организацию процесса диагностирования, заключающуюся в согласовании во времени работы отдельных частей ТСД, переключении режимов работы, управлении потоками диагностической и управляющей информации.

Управление может осуществляться вручную с пульта оператора (ПО), автоматически по командам блока управления или по программе, хранящейся в памяти. Каждой отдельной проверке соответствует группа команд, выполнение которых обеспечивает образование необходимых соединений в БКИ, требуемую настройку БГТ, выдачу диапазонов измерительных схем и допусков схем сравнения.

В качестве устройств индикации используются различные табло, цифровые индикаторные приборы, электронно-лучевые трубки, которые позволяют визуально оценивать и анализировать контролируемые параметры и характеристики различной физической природы. Это позволяет человеку-оператору принимать решения о состоянии объекта. Регистрирующие устройства, как правило, фиксируют дату диагностирования, номер объекта, шифр операции, номер оцениваемого признака, его измеренное значение и обоб-

ценную оценку состояния объекта: работоспособен или неработоспособен, место дефекта и т. д.

Процессом диагностирования управляет человек, который с пульта оператора включает и выключает средства диагностирования, выбирает режим диагностирования, обеспечивает самоконтроль.

**Показатели технических средств диагностирования.** ТСД выбирают или разрабатывают в процессе проектирования систем диагностирования. Эффективность ТСД оценивается совокупностью показателей, основными из которых являются показатели надежности, метрологические и массогабаритные.

*Надежность* ТСД характеризуют показатели: вероятность безотказной работы  $P_T(t)$  и правильного функционирования  $P_\Phi$ , коэффициент готовности  $K_T$ .

Величины вероятности безотказной работы рассчитывают по различным формулам в зависимости от закона распределения отказов элементов.

Для экспоненциального закона

$$P_T(t) = e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов ТСД.

Вероятность правильного функционирования ТСД

$$P_\Phi = K_T P_T(t).$$

Коэффициент готовности представляет собой вероятность того, что ТСД окажутся работоспособными в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование их по назначению не предусмотрено. Он характеризует как безотказность, так и ремонтпригодность ТСД и рассчитывается по формуле

$$K_T = T_T / (T_T + T_B),$$

где  $T_T$  – наработка на отказ ТСД;  $T_B$  – среднее время восстановления ТСД.

*Метрологические показатели* характеризуют точность измерения ТСД, которая влияет на инструментальную достоверность. Точность можно определить так называемой мерой точности:

$$\gamma = 1/\sigma(\varepsilon) \cdot \sqrt{2\pi},$$

где  $\sigma(\varepsilon)$  – среднеквадратичная погрешность.

При постановке диагноза могут возникнуть случайные и систематические погрешности, обусловленные погрешностями измерительного тракта ТСД и нестабильностью метода измерения. Систематические погрешности, характер которых известен, учитываются при выборе допуска на параметры. Случайные погрешности всегда будут вносить неопределенность при оценке результата диагностирования. Иногда следует учитывать и динамическую погрешность измерения, влияние которой весьма существенно при изменении переменной величины.

*Массогабаритные показатели* ТСД можно охарактеризовать величиной компактности:

$$W = G/V,$$

где  $G$  – масса;  $V$  – занимаемый объем.

Требования минимально возможной стоимости, малой массы, габаритов являются общими для любых технических средств.

**Человек-оператор.** Третьим элементом в системе диагностирования является человек-оператор (ЧО).

Основными средствами приема информации у ЧО являются зрение и слух. В обычной жизни по зрительному каналу человек получает 80 % всей информации. Условно все поле зрения глаза человека разбивают на три зоны:

- 1) зона наиболее четкого видения (20 %);
- 2) зона ясного видения (220° по вертикали, 300° по горизонтали), когда при неподвижном глазе можно опознать предмет, не различая деталей;
- 3) зона периферийного зрения, где предметы не опознаются.

Через слуховой канал человек воспринимает около 15 % информации.

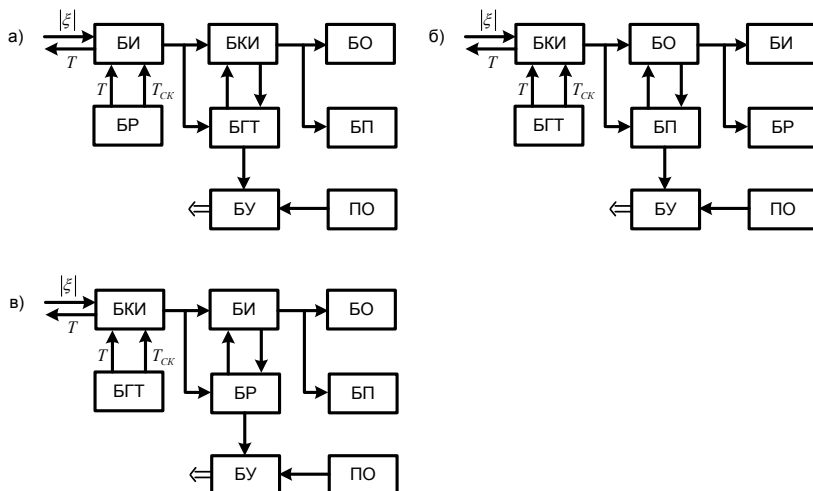
Показатели, характеризующие ЧО, позволяют сформулировать ряд требований, которые должны быть учтены при проектировании ТСД для повышения надежности функционирования всей системы диагностирования технического объекта.

## Тесты

1. Охарактеризуйте электростанцию как ОД:

- а) непрерывный, непрерывного использования, периодического диагностирования, единое целое, восстанавливаемый
- б) дискретный, периодического использования, непрерывного диагностирования, единое целое, невосстанавливаемый
- в) гибридный, непрерывного использования, непрерывного диагностирования, совокупность структурных единиц, восстанавливаемый

2. Как выглядит обобщенная структурная схема ТСД?



3. Какие из блоков, представленных в ряду БИ, БР, БП, БКИ, БГТ, БО, БУ, ПО, вносят наибольший вклад в погрешность, влияющую на достоверность диагноза?

- а) БП, БКИ, БГТ
- б) БКИ, БП, БО
- в) БО, БКИ, БГТ

4. В каких блоках ТСД учитываются требования ЧО?

- а) БУ, БП, БР
- б) БИ, БР, ПО
- в) ПО, БИ, БП



## 5. Что такое структура СД?

- а) набор элементов и связей
- б) устойчивая упорядоченность в пространстве и во времени ее элементов и связей
- в) устойчивая упорядоченность в пространстве ее элементов и связей

## **Практическое занятие 5**

### **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ**

**Цель практического занятия** — формирование у магистрантов следующих компетенций:

- готовность эксплуатировать, проводить испытания и ремонт технологического оборудования электроэнергетической и электротехнической промышленности;
- способность самостоятельно выполнять исследования для решения научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и методов исследования свойств материалов и готовых изделий.

#### **Методические рекомендации по выполнению практических заданий**

##### *Методы диагностирования внешней изоляции*

Основными элементами внешней изоляции являются изоляторы как одиночные, так и составные: колонки, гирлянды. По назначению изоляторы делят на опорные, подвесные и проходные. Опорные изоляторы подразделяют на стержневые и штыревые. Опорные *стержневые* изоляторы применяют в закрытых и открытых распределительных устройствах для крепления на них токоведущих и контактных деталей. Опорные стержневые изоляторы наружной установки отличаются большим количеством ребер, чем изоляторы внутренней установки. Ребра служат для увеличения длины пути утечки с целью повышения разрядных напряжений изоляторов при дожде и в условиях увлажненных загрязнений. Изоляторы на напряжения 35...110 кВ состоят из сплошного фарфорового стержня, армированного чугунами фланцами.

Опорные *штыревые* изоляторы применяют для наружных установок в тех случаях, когда требуется высокая механическая прочность и не могут быть применены опорные стержневые изоляторы.

Изолирующая деталь опорных штыревых изоляторов на напряжения 6...10 кВ выполняется одноэлементной, а на напряжение 35 кВ — двух- или трехэлементной.

Основная причина отказов опорных штыревых изоляторов — **пробой** и **перекрытие** от действия грозовых и внутренних перенапряжений и высокой температуры, которая обусловлена электрической дугой. К характерным дефектам штыревой изоляции относят трещины, некачественную армировку, импульсный пробой от токов молнии.

Подвесные изоляторы в электроустановках 35 кВ и выше используют тарельчатого и стержневого типов. Эти изоляторы широко применяются на воздушных линиях электропередачи высших классов напряжения.

Требуемого уровня выдерживаемых напряжений достигают соединением необходимого количества изоляторов в гирлянду.

Наиболее частой причиной отказа тарельчатых изоляторов является пробой фарфора (стекла) между шапкой и стержнем, однако механическая прочность изолятора при этом не нарушается и падения провода на землю не происходит. Это существенное достоинство тарельчатых изоляторов.

Характерными дефектами подвесных изоляторов являются некачественное изготовление, наличие сколов под шапкой изоляторов, трещины, некачественная армировка, загрязнения проводящими включениями, снижение напряжения перекрытия вследствие загрязнения поверхности.

*Проходные* изоляторы применяют для изоляции токоведущих частей при прохождении их через стены, потолки и другие элементы конструкций распределительных устройств и аппаратов.

Основными причинами отказов проходных изоляторов служат недостаточная электрическая прочность узла «фланец — токоведущая часть», наличие трещин, разрушение глазури. Отказы изоляторов по типам изоляции распределяются следующим образом: фарфоровые — 25 % от общего числа, стеклянные — 75 %.

Основное количество фарфоровых изоляторов (90...99 %), отказывающихся в эксплуатации, становятся неработоспособными в результате механических повреждений или электрического пробоя. В условиях эксплуатации вследствие загрязнения, старения, наличия воздушных полостей и ряда других причин электрическая прочность изоляции с течением времени уменьшается, что приводит к перекрытию или пробую изоляторов.

Для диагностирования состояния внешней изоляции используют следующие методы:

- 1) контроль сопротивления изоляции;
- 2) контроль тока утечки, проходящего через изоляцию (контроль проводимости);
- 3) контроль распределения напряжения вдоль изоляционных элементов (гирлянды, колонки);
- 4) регистрация инфракрасного (ИК) излучения – тепловизионный метод;
- 5) контроль оптического излучения по поверхности изоляции;
- 6) диагностирование изоляции на основе регистрации частичных разрядов и высокочастотных электромагнитных излучений;
- 7) анализ виброграмм опорной изоляции – вибрационный метод.

### Контроль сопротивления изоляции

Значительное снижение сопротивления изоляции  $R_{из}$  происходит из-за пробоя изоляции с образованием сквозных каналов большой проводимости, увлажнения всего объема изолятора (открытая пористость фарфора), снижения поверхностного сопротивления под действием загрязнения и увлажнения. Контроль сопротивления изоляции предполагает сравнение измеренного значения с допустимыми  $R_{доп}$  и проверку условия работоспособности  $R_{из} > R_{доп}$ .

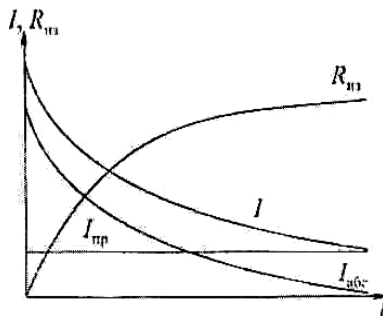


Рис. 5.1. Характер изменения тока через изоляцию и сопротивления изоляции  $R_{из}$

При контроле сопротивления изоляции устанавливают минимально допустимое значение, определяемое практикой на основе большого числа измерений. В частности, минимально допустимое значение сопротивления изоляции для опорных стержневых изоляторов составляет 300 МОм на каждый элемент.

В общем случае сопротивление изоляции  $R_{из}$  определяется через приложенное напряжение  $U$  и протекающий ток  $I$  зависимостью  $R_{из} = U/I$ .

Суммарный ток  $I$  через изоляцию при подаче постоянного напряжения имеет следующие составляющие (рис. 5.1):

$$I = I_c + I_{abc} + I_{пр},$$

где  $I_c$  – ток заряда геометрической емкости  $C_1$  (из-за кратковременности  $I_c \sim 0$ );  $I_{abc} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{T}}$  – ток абсорбции;  $I_{пр} = \frac{U}{Rl}$  – ток сквозной проводимости.

Изменение суммарного тока  $I$  во времени имеет вид:

$$I = \frac{U}{Rl} + \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{T}},$$

где  $T = R \cdot C_2$  – постоянная времени ( $T < 1$  мин), а сопротивление изоляции

$$R_{из} = \frac{U}{I} = \frac{Rl}{1 + \frac{Rl}{R} \exp\left(-\frac{t}{T}\right)}.$$

Полученное значение  $R_{из}$  сопоставляют с данными предыдущих измерений или заводскими данными, оно должно быть более 300 МОм.

Контроль изоляции методом измерения сопротивления  $R_{из}$  заключается в сопоставлении измеренных и начальных (заводских или предыдущих результатов проверок) величин.

Ток абсорбции, ток сквозной проводимости, а следовательно, и сопротивление изоляции зависят от температуры, поэтому результаты измерений надо приводить к базовой температуре +20 °С. Однако линейные и подстанционные изоляторы обладают сравнительно малой емкостью, и поэтому при измерении их сопротивления абсорбционные явления не учитываются.

Измерение сопротивления изоляции как наиболее простой метод применяют для быстрой оценки состояния изоляционной конструкции. Следует иметь в виду, что величина сопротивления изоляции не может служить окончательным критерием работоспособности изоляторов. По значению сопротивления изолятора нельзя определить наличие пробоя или трещины.

#### *Диагностирование гирлянды изоляторов на основе тока утечки*

Через любую изоляционную конструкцию в виде гирлянды изоляторов в нормальном режиме ее работы протекает ток, значение которого определяется состоянием поверхности самих изоляторов. При наличии дефектных изоляторов значение тока, проходящего через изоляционную конструкцию, будет отличаться от значения тока при отсутствии дефектных изоляторов.

При использовании этого метода для отыскания отказавших изоляционных элементов необходимо устройство, имеющее высокую чувствительность и обеспечивающее возможность измерить малые токи в изоляционной конструкции при воздействии рабочего напряжения. В эксплуатационной практике в качестве измерительного устройства используют прибор-штангу.

Прибор-штанга предназначен для регистрации тока утечки через изолятор (рис. 5.2) и работает на принципе намагничивания стального сердечника током утечки. Сердечник помещают в дроссель  $L$ , который включают последовательно с диодом  $VD_1$  и проверяемым изолятором (рис. 5.2, а). Диод  $VD_2$  шунтирует положительную полуволну входного тока.

Затем сердечник вынимают из дросселя и размагничивают в специальном устройстве: по кривой намагничивания сердечника на величину тока утечки. Человек-оператор сравнивает значение тока утечки  $I_{ут}$  с допустимым  $I_{ут. доп}$ , проверяет условие работоспособности  $I_{ут} < I_{ут. доп}$  и принимает решение о состоянии проверяемого изолятора. Для повышения чувствительности прибора в схему вводят усилитель на транзисторе  $VT$  (рис. 5.2, б).

**Область применения метода:** отыскание дефектного изолятора в гирлянде.

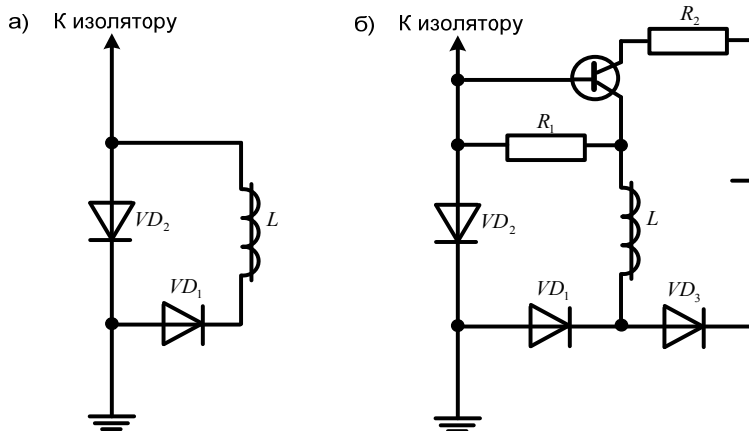


Рис. 5.2. Принципиальная схема магнитного регистратора тока утечки:  
а – без усилителя; б – с усилителем

### Диагностирование изоляторов на основе анализа распределения напряжения на гирлянде

Переменное напряжение распределяется по изоляторам гирлянды неравномерно. С увеличением числа изоляторов в гирлянде неравномерность возрастает.

Распределение напряжения по изоляторам гирлянды длиной  $L$  можно определить с помощью схемы замещения, показанной на рис. 5.3. Для этой схемы  $C$  – собственная емкость изолятора;  $C_1$  – емкость изолятора по отношению к заземленным элементам конструкции (опора, заземленный трос);  $C_2$  – емкость изолятора по отношению к проводу;  $R$  – сопротивление утечки по поверхности изолятора.

Распределение фазного напряжения  $U_{(i)}$  зависит только от емкостей  $C$ ,  $C_1$  и  $C_2$ . При отсутствии емкостей  $C$  и  $C_2$  напряжение распределяется по изоляторам линейно. В реальных условиях  $C = 50...70$  пФ,  $C_1 = 4...5$  нФ,  $C_2 = 0,5...1$  пФ, поэтому ток, протекающий через емкости изоляторов, не остается постоянным.

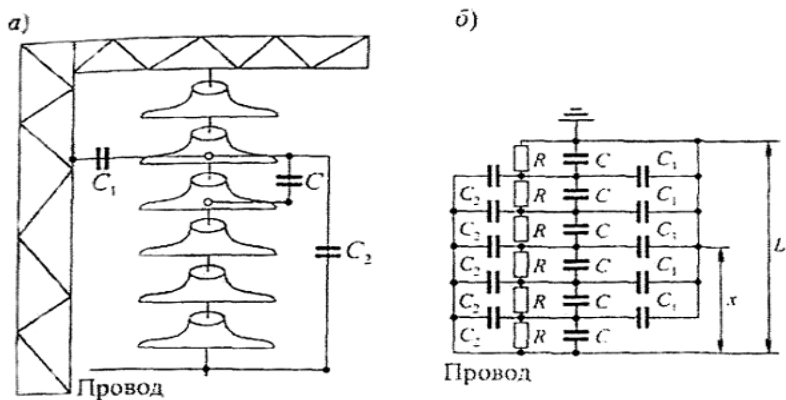


Рис. 5.3. Гирлянда изоляторов (а) и схема замещения гирлянды (б)

В реальных условиях на распределение напряжения вдоль гирлянды оказывают влияние как емкости  $C_1$ , так и емкости  $C_2$ . При этом изоляторы, расположенные в средней части гирлянды, оказываются менее нагруженными, чем изоляторы у концов гирлянды. Вследствие того что  $C_1 > C_2$ , наибольшее падение напряжения приходится на изоляторы, ближайšie к проводу (рис. 5.4).

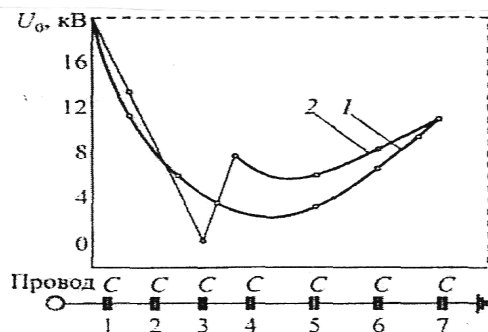


Рис. 5.4. Распределение падений напряжения  $U_0$  вдоль гирлянды:  
 1 — при нормальном состоянии изоляторов;  
 2 — при дефектном 3-м изоляторе

На линиях и подстанциях периодически осуществляется проверка состояния изоляторов в гирляндах и колонках. Проверку



проводят с помощью киловольтметра, расположенного на штанге (рис. 5.5).

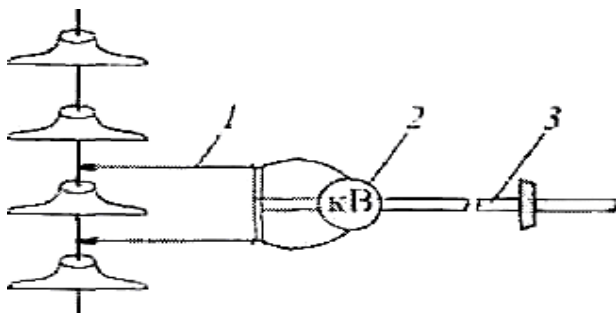


Рис. 5.5. Измерение распределения напряжения вдоль гирлянды с использованием измерительной штанги: 1 – шуп; 2 – прибор (киловольтметр); 3 – штанга

В результате получают кривую распределения напряжения по элементам гирлянды (табл. 2).

Таблица 2

Распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов

| Падение напряжения                         | Изоляторы |    |     |     |     |     |      |
|--|-----------|----|-----|-----|-----|-----|------|
|  | 1         | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7    |
| На нормальной гирлянде, кВ                 | 19        | 14 | 6   | 3,5 | 4,5 | 7,5 | 11,5 |
| На гирлянде с дефектным 3-м изолятором, кВ | 19        | 10 | 1,5 | 7,3 | 7,7 | 9   | 11,5 |

Сравнивая кривые распределения напряжения вдоль гирлянды (рис. 5.4) при нормальном состоянии изоляторов и при наличии дефектов, определяют расположение дефектного изолятора.

Данному методу присущи следующие недостатки: большая погрешность, значительная трудоемкость, высокие требования к квалификации персонала, повышенная опасность при выполнении работ, связанная с гальваническим способом измерения.

**Область применения метода:** изоляция воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше; натяжные гирлянды шинных мостов открытых распределительных устройств подстанций 35 кВ и выше.

### *Диагностирование изоляции на основе инфракрасного излучения*

Повышенный нагрев изоляторов и их элементов при функционировании происходит за счет потерь энергии на переходном сопротивлении контактов, увеличения токов утечки и диэлектрических потерь в изоляции.

Применительно к изоляции линий, находящихся под напряжением, тепловое излучение  $P_1$  вследствие диэлектрических потерь определяется:

$$P_1 = U^2 \omega \operatorname{Ctg} \delta,$$

а вследствие токов утечки  $I_{\text{ут}}$  по поверхности изолятора  $P_2$ :

$$P_2 = U I_{\text{ут}} = U^2 / R_{\text{из}},$$

где  $U$  – падение напряжения на изоляторе;  $\omega$  – угловая частота;  $C$  – емкость изолятора;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь при рабочей температуре;  $R_{\text{из}}$  – активное сопротивление изолятора, МОм.

Диэлектрические потери в изоляторах создают температурный перепад между изолятором и окружающей средой, а также температурный перепад между изоляторами в гирлянде при наличии дефектных изоляторов.

Для выявления дефектных изоляторов в гирлянде сравнивают температуру дефектного изолятора с температурой соседних изоляторов (верхнего и нижнего). В табл. 3 приведен перепад температур нагрева изоляторов подвесной гирлянды на напряжение 110 кВ.

Таблица 3

Перепад температур (К) нагрева изоляторов гирлянды на напряжение 110 кВ

| Номера изоляторов | Все изоляторы работоспособные | Дефектные изоляторы |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   |                               | 1                   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
| 1...2             | 0,880                         | 0,348               | 0,350 | 0,880 | 0,880 | 0,860 | 0,880 | 0,890 |
| 2...3             | 0,191                         | 1,191               | 0,273 | 0,191 | 0,191 | 0,191 | 0,191 | 0,191 |
| 3...4             | 0,417                         | 0,417               | 0,417 | 0,558 | 0,279 | 0,417 | 0,417 | 0,417 |
| 4...5             | 0,579                         | 0,579               | 0,400 | 0,784 | 1,099 | 0,696 | 0,579 | 0,579 |

Регистрация теплового (инфракрасного) излучения и последующее сравнение с нормированными значениями для электрооборудования могут служить основой диагностирования состояния

изоляции. Для диагностирования тепловизионным методом применяют пирометры и тепловизоры.

Пирометр позволяет измерять поток излучения части поверхности объекта, перекрывающей его поле зрения (измерительное поле зрения). При наличии сведений об излучающей способности этой поверхности по данным измерений может быть определена ее температура. Пирометр (рис. 5.6, *a*) состоит из оптической системы 1, приемника теплового излучения 2 и индикатора 3, показывающего температуру нагрева объекта.

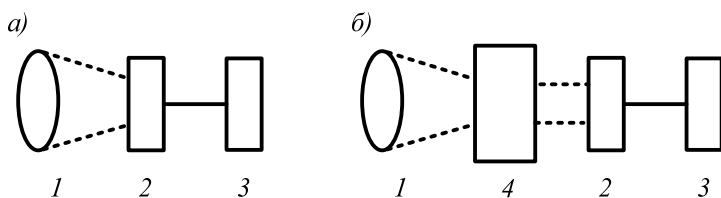


Рис. 5.6. Структурная схема устройств теплового контроля:  
*a* – пирометр; *б* – тепловизор

Оптическая система обеспечивает получение изображения объекта в плоскости приемника. Объективы изготавливаются из материалов, прозрачных в контролируемой области излучения. В спектральной области излучения, соответствующей диапазону температур контролируемого электрооборудования, применяют объективы из бария, кремния и т. п. Приемник преобразует тепловое излучение в электрический сигнал, пропорциональный потоку излучения, который отображается на индикаторе.

Тепловизор – устройство для оценки тепловых полей объектов. Современные тепловизоры, кроме получения видимого изображения нагретых объектов по их тепловому излучению, позволяют измерить их тепловые (температурные) поля, т. е. получить количественную характеристику теплового состояния. Тепловизор обеспечивает возможность панорамного обзора всего оборудования, например, распределительного устройства, и позволяет достаточно быстро выявлять элементы с повышенным тепловыделением.

Тепловизор (рис. 5.6, б), принцип действия которого – последовательный просмотр контролируемой поверхности объекта узким сканирующим лучом, кроме упомянутых выше элементов структурной схемы пирометра, имеет узел сканирования 4. Сканирование обеспечивает просмотр поля обзора с помощью раstra и осуществляется обычно оптико-механическим устройством, поочередно проецирующим на активную поверхность приемника излучения малый участок поверхности объекта.

Все поле зрения (кадр) при этом разделяется построчно на достаточно большое количество малых областей (мгновенных полей зрения), каждой из которых на выходе приемника соответствует видеосигнал, воспроизводимый на экране индикатора в виде теплового поля.

Следует учитывать, что приборы, основанные на измерении теплового излучения, определяют температуру только очень тонкого слоя поверхности. Дефекты внутри изоляции могут быть выявлены лишь тогда, когда они создают изменения температуры поверхности объекта, достаточные для измерения. Поэтому для решения задач диагностирования необходимо выявить связь между процессами, возникающими при развитии дефекта внутри объекта, и процессами на его поверхности, т. е. определить тепловой образ дефекта на его поверхности.

Оценку полученных данных о тепловом состоянии изоляторов выполняют путем сравнения результатов измерений (в °С) с допустимыми значениями. Это дает возможность выявлять объекты с повышенным нагревом. Определение вида дефекта и оценка его опасности пока невозможны.

Метод регистрации инфракрасного излучения хотя и является дистанционным, что весьма практично, исключает необходимость постоянных подъемов на опоры и удобен с точки зрения безопасности, но обладает рядом недостатков: с его помощью невозможно определять вид дефекта и прогнозировать дальнейшее его развитие. Этот метод подвержен влиянию различных климатических условий регионов, имеет большую инструментальную погрешность, а также непригоден для выявления внутренних дефектов во внешней изоляции.

**Область применения метода:** открытые соединения токоведущих частей электрооборудования (контактные соединения шин, воздушные линии, кабели, разъемные контакты коммутационной аппаратуры). Выявляются дефекты, приводящие к увеличению переходного сопротивления контакта.

#### *Диагностирование изоляторов на основе оптического излучения*

Большинство видов электрического разряда сопровождается оптическим излучением достаточно высокой степени интенсивности. Максимум спектра излучения всех электрических разрядов (искра, поверхностные частичные (ПЧР), коронные (КР) разряды) лежит в ультрафиолетовой области спектра, на частоте 280...400 нанометров по шкале электромагнитных волн. Физическая сущность метода контроля гирлянд изоляторов с целью определения наличия и количества нулевых изоляторов в гирляндах основана на зависимости силы света поверхностного частичного разряда на изоляторе от величины напряжения на нем.

При напряжении  $U$  выше порогового значения, соответствующего возникновению ПЧР, силу света  $Y$  определяют по формуле

$$Y = Y_0 C U^5,$$

где  $Y_0$  – чувствительность силы света схемы регистрации;  $C$  – коэффициент.

Установлено, что ПЧР на всех типах изоляторов возникают прежде всего в кольцевой зоне на границе «цементная армировка – изолирующая деталь». На границе армировки напряженность электрического поля имеет наибольшее значение, так как проводимость цемента достаточно высока и потенциал стержня выносится на край армировки. Кроме того, на границе армировки образуются кольцевые трещины, обусловленные различием температурных коэффициентов цемента и изолирующей детали «фарфор или стекло».

Напряженность поля в трещинах повышена, и поэтому они являются инициаторами разрядов. При росте напряжения на изоляторах сила света ПЧР возрастает как следствие роста разрядов, увеличения их числа и разветвления. При увлажнении изоляции напряжение возникновения ПЧР снижается, а сила света возрастает на 5 порядков по сравнению с нормальными условиями. При увлаж-

нении загрязненной изоляции интенсивность оптического излучения ПЧР увеличивается еще больше. Поэтому контроль подвешной изоляции желательно проводить в условиях увлажнения изоляции.

Для высоковольтного оборудования отсутствие поверхностных разрядных процессов служит необходимым, а иногда и достаточным признаком его работоспособности. Однако исключить возникновение разрядов на поверхности изолятора полностью невозможно из-за целой совокупности внешних факторов. Интенсивность разрядов увеличивается по мере снижения изоляционных характеристик изолятора, что, в свою очередь, можно использовать для диагностирования распределительных сетей.

В качестве приемника оптического излучения применяют фотоэлектронные умножители (ФЭУ) – приборы, преобразующие оптическое излучение в электрические сигналы. Установлена зависимость выходного сигнала умножителя, регистрирующего свечение поверхностных частичных разрядов на отдельном изоляторе от величины приложенного напряжения, степени загрязнения и увлажнения изоляции.

На основе ФЭУ для контроля высоковольтной изоляции разработаны электронно-оптические дефектоскопы. Изображение ПЧР на контролируемом объекте формируется входным объективом на фотокатоде электронно-оптического усилителя яркости. Через окуляр на экране усилителя яркости можно наблюдать изображение ПЧР, которое при необходимости можно зафиксировать на фотопленку с помощью фотоустановки.

Регистрация оптического излучения, как и метод регистрации инфракрасного излучения, является дистанционным методом проверки изоляции и позволяет выполнить экспресс-оценку ее состояния. Кроме всех недостатков, присущих методу регистрации инфракрасного излучения, данный метод обладает намного меньшими возможностями по селекции полезного сигнала.

**Область применения метода:** диагностирование изоляции линии и открытых распределительных устройств напряжением 110 кВ и выше, особенно эффективен на линиях сверхвысоких напряжений (330 кВ и выше).

### *Диагностирование изоляторов на основе регистрации частичных разрядов и высокочастотных электромагнитных излучений*

Во внешней изоляции в процессе эксплуатации могут возникнуть газовые включения, воздушные полости, трещины. Так как диэлектрическая проницаемость воздуха в несколько раз ниже, чем у твердых диэлектриков, напряженность поля в газовой среде может значительно превышать напряженность поля в основной твердой изоляции при приложении к изоляции рабочего напряжения. Более низкая электрическая прочность газового включения по сравнению с твердой изоляцией облегчает процесс возникновения ионизации и разрядных процессов. Последние получили название частичных, поскольку образованию сплошного сквозного разряда препятствует наличие участков полноценного твердого диэлектрика.

Основным источником сигналов является коронный разряд. Как известно, короной называют неполный разряд в воздухе, возникающий в местах, в которых из-за резко неравномерного распределения электрического поля создаются условия для ионизации. При этом разряд охватывает лишь небольшую зону вблизи электродов с большой кривизной (выступы провода, острия).

Коронные разряды развиваются в виде коротких импульсов ионизации, которые проходят за  $10^{-8}$ ... $10^{-7}$ с. При отрицательном напряжении на коронирующем электроде единичный импульс ионизации, который вызван лавиной, распространяющейся с катода, прерывается возникшим пространственным зарядом, вслед за ним возникает другой импульс. Получается последовательность импульсов одинаковой амплитуды. Частота их следования определяется напряжением и геометрией коронирующих электродов.

По данным экспериментальных исследований установлено ориентировочное значение импульсного тока, генерируемого дефектными изоляторами. Параметры тока: амплитуда около 2,5 мА, среднее время нарастания импульса составляет соответственно 10 и 80 наносекунд.

Импульс тока имеет вид, представленный на рис. 5.7, и достаточно хорошо описывается полученным экспериментально выражением:

.

$$i(t) = 1,7 \cdot I_M \left[ \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{сп}}}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{фр}}}\right) \right].$$

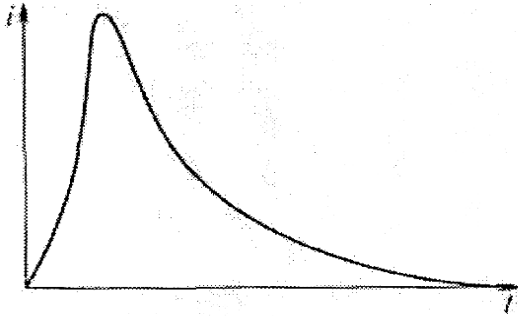


Рис. 5.7. Форма импульса тока

При положительном напряжении корона носит стримерный характер, т. е. единичные импульсы следуют друг за другом, образуя сливающиеся лавины электронов, движущихся по направлению к объемному заряду.

Хотя амплитуда импульсов короны при положительном полупериоде напряжения значительно превышает амплитуду импульсов при отрицательном, среднее значение сигналов от короны на электродах в отрицательном полупериоде промышленной частоты больше, чем в положительном.

Находят применение контактные и бесконтактные способы обнаружения частичных разрядов (ЧР) в газовых включениях изоляции:

- 1) измерение возможных пульсаций напряжения на проверяемом объекте (контактный);
- 2) измерение тока во внешней цепи (контактный);
- 3) измерение интенсивности электромагнитных волн, излучаемых непосредственно разрядами (бесконтактный).

Измеренное значение напряжения и тока во внешней цепи при наличии воздушных включений в диэлектрике даже при интенсивных частичных разрядах невелико (на уровне 1 % приложенного напряжения), поэтому использование первых двух контактных способов сопряжено с определенными трудностями. Возможности



третьего бесконтактного способа значительно больше, он позволяет создавать автономные приборы, реагирующие на электромагнитные колебания в выбранной полосе частот.

*Контактные способы* диагностирования изоляторов основаны на определении мощности ЧР  $P_{\text{ЧР}}$  и на сравнении полученного значения с установленным пороговым, определяющим появление того или иного дефекта.

Для обнаружения разрядов электромагнитных излучений (ЭМИ) способами измерения напряжения и тока при наличии гальванической связи «изолятор – прибор» используют схемы соединения (рис. 5.8, а, б, в).

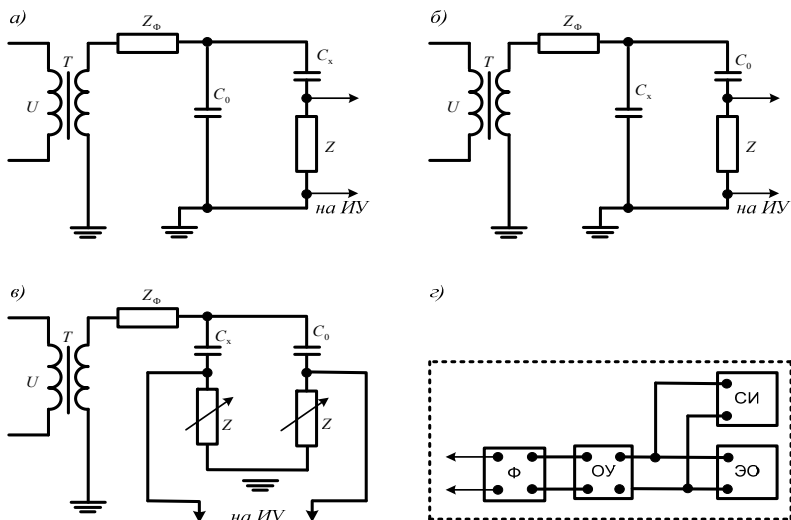


Рис. 5.8. Схемы устройства для измерения характеристик ЧР:  
 а – схема с включением измерительного элемента в ветвь заземления ОД;  
 б – схема с включением измерительного элемента в ветвь заземления соединительного конденсатора; в – мостовая схема;  
 з – схема измерительного устройства

Источник регулируемого высокого напряжения  $U$ , необходимого для возникновения ЧР, через повышающий трансформатор  $T$  и соединительный конденсатор для создания пути замыкания тока ЧР  $C_0$  не должны иметь разрядов, мешающих измерению характеристик

ЭМИ в проверяемом изоляторе  $C_x$ . Измерительный элемент  $Z$  может представлять собой резистор или индуктивность, в зависимости от полосы пропускания входного фильтра прибора.

Схема на рис. 5.8, *а* применяется обычно в тех случаях, когда один из вводов объекта может быть не заземлен. В остальных случаях используют схемы, представленные на рис. 5.8, *б* и *в*. Мостовую схему применяют обычно для уменьшения влияния помех. Проблема помехозащиты наиболее актуальна при регистрации слабых разрядов, особенно в изоляторах с большой емкостью.

Приведенные схемы (рис. 5.8, *а*, *в*) позволяют найти падение напряжения  $\Delta U$ , по которому, зная  $C_x$ , определяют кажущийся заряд:

$$q_{\text{чр}} = \Delta U C_x.$$

Затем по значению  $\Delta U$  в измерительном устройстве (ИУ), включающем фильтр верхних частот ( $\Phi$ ) и операционный усилитель (ОУ) (рис. 5.8, *з*), рассчитывают энергию ЧР  $W_{\text{чр}}$ :

$$W_{\text{чр}} = q_{\text{чр}} U_{\text{чр}} / \sqrt{2},$$

где  $U_{\text{чр}}$  – порог срабатывания счетчика импульсов (СИ) измерительного устройства.

По значению числа импульсов  $N$ , записанных в счетчике, и энергии ЧР определяют мощность  $P_{\text{чр}}$ :

$$P_{\text{чр}} = N W_{\text{чр}}.$$

На экране электронного осциллографа (ЭО) можно наблюдать характер ЧР.

При измерениях электромагнитного излучения в лабораторных условиях основным способом борьбы с помехами является устранение источников помех. Для этого применяют некоронирующую ошиновку, экраны, устраняющие возможность стриммерной короны, надежное заземление всех элементов установки. Для исключения помех на радиостанции выполняют экранирование помещения.

При измерении электромагнитных излучений в условиях эксплуатации источники помех не могут быть устранены. Из результатов измерений могут быть в той или иной мере исключены непериодические помехи (от коммутаций), а также помехи от внешних частичных разрядов, источник которых достаточно удален от изоляционных элементов, путем локализации места разрядов, отключе-

ния оборудования с разрядом. Помехи от ВЧ-источников, которые, как правило, имеют узкий спектр, можно исключить выбором соответствующей полосы частот настройки измерительного устройства.

Способ имеет ряд недостатков: сложность измерительной аппаратуры, необходимость высокой квалификации обслуживающего персонала, перемещение вдоль контролируемой трассы (метод недистанционный).

**Область применения способа:** диагностирование внешней изоляции в электроустановках 6...35 кВ и подстанционного оборудования напряжением 35...220 кВ.

*Бесконтактный способ* диагностирования изоляции по характеристикам ЧР предполагает измерение высокочастотных электромагнитных излучений (ВЧЭМИ) от тока разряда при разрядных процессах. Внешними проявлениями ВЧЭМИ в изоляции являются импульсы напряжения на объекте и ток переходного процесса в цепи, который распространяется по проводам линий электропередачи на значительные расстояния. Ток разряда не может быть непосредственно измерен, однако вызываемые им быстрые изменения электромагнитного поля могут быть отмечены чувствительными приборами. Диагностирование изоляции по характеристикам частичных разрядов предполагает измерение ВЧЭМИ от тока разряда при разрядных процессах.

Для бесконтактного (дистанционного) диагностирования дефектов внешней изоляции используют схему, показанную на рис. 5.9.

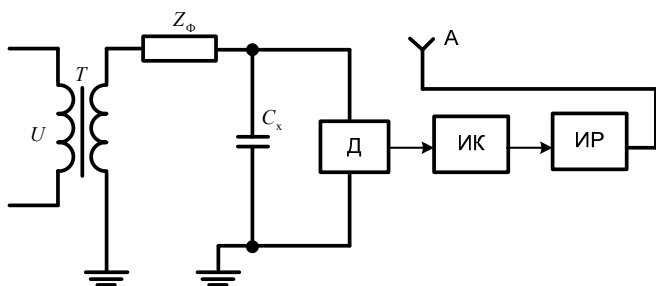


Рис. 5.9. Схема измерения ВЧЭМИ: А – приемная антенна; ИР – измеритель радиопомех; ИК – измерительный комплекс; Д – делитель напряжения;  $C_x$  – изолятор;  $Z_\phi$  – ограничительное сопротивление; Т – трансформатор

Информационно-измерительная система контроля внешней изоляции по регистрации ВЧЭМИ приведена на рис. 5.10.

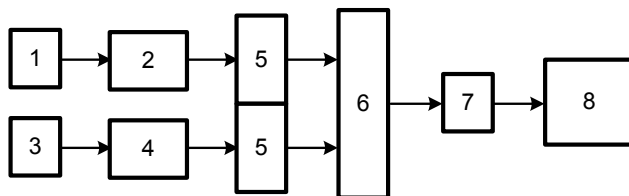


Рис. 5.10. Структурная схема информационно-измерительной системы приема и обработки ВЧ-сигналов

Если от источника сигналов отходят три провода, то между каждой парой будет существовать свое симметричное, а между каждым проводом и землей свое несимметричное напряжение. И то и другое может быть измерено измерителем ВЧ-сигналов в любых точках линии. При этом на антенну воздействуют в основном электрические поля, образующиеся между несущим сигнал проводом и землей за счет распространения несимметричных токов.

### Тесты

1. Укажите верное определение внешней изоляции электроустановок:

- а) изоляция, на электрическую прочность которой не влияют атмосферные условия
- б) изоляция, пробой которой представляет собой необратимое разрушение
- в) изоляция оборудования, присоединенная к шинам подстанции в РУ высокого напряжения

2. Назовите тип изоляторов, для которого характерен отказ из-за недостаточной электрической прочности узла «фланец – теплопроводящая часть»:

- а) опорный
- б) проходной
- в) подвесной

**3. Почему поверхность опорных изоляторов делают ребристой?**

- а) для увеличения механической прочности изолятора
- б) для увеличения длины пути тока утечки
- в) по технико-экономическим причинам

**4. Какой элемент схемы замещения гирлянды изоляторов определяет сопротивление изоляции постоянному току?**

- а) г
- б) R1
- в) R

**5. Какой вид дефекта позволяет определить метод контроля сопротивления изоляции?**

- а) пробой изоляции с образованием каналов большой проводимости
- б) трещины
- в) пробой изоляции без образования каналов большой проводимости

**6. Укажите, какие из перечисленных дефектов выявляются при контроле изоляции по току утечки при постоянном напряжении:**

- а) сосредоточенные дефекты
- б) частичное и сквозное увлажнение изоляции
- в) наличие газовых включений

**7. Какие параметры измеряют с помощью прибора-штанги?**

- а) напряженность электрического поля
- б) сопротивление изоляции
- в) ток утечки

**8. Каким образом выравнивают распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов?**

- а) распределяют провода в фазе
- б) применяют специальную арматуру в виде колец, восьмерок и овалов
- в) уменьшают число изоляторов в гирлянде

**9. Какие методы диагностирования внешней изоляции обладают наибольшей диагностической ценностью и эффективностью?**

- а) измерение тока утечки, распределение напряжения вдоль гирлянды
- б) измерение сопротивления изоляции
- в) измерение оптического излучения (поверхностных разрядов)

**10.** Какие из перечисленных методов являются наиболее эффективными для обнаружения частичных разрядов в газовых включениях?

- а) измерение возможных пульсаций напряжения на измеряемых объектах
- б) измерение тока во внешней цепи
- в) измерение интенсивности электромагнитных волн, излучаемых непосредственно частичными разрядами

**11.** Почему рабочее напряжение на изоляции должно быть ниже, чем напряжение, при котором возникают частичные разряды?

- а) ухудшаются экономические показатели оборудования из-за дополнительных потерь энергии при частичных разрядах
- б) сокращается срок службы изоляции из-за постепенного разрушения ее частичными разрядами
- в) частичные разряды создают помехи для телевидения, связи и радиовещания

**12.** Чем отличается пирометр от тепловизора?

- а) ничем
- б) пирометр измеряет температуру изолятора, тепловизор оценивает тепловое поле изолятора
- в) пирометр оценивает тепловое поле изолятора, тепловизор измеряет температуру изолятора

**13.** В каких случаях можно использовать оптический метод диагностирования изолятора?

- а) при наличии частичных разрядов в газовых включениях изоляции
- б) при наличии поверхностных частичных разрядов
- в) при наличии высокочастотных электромагнитных излучений

**14.** Что является диагностическим признаком при бесконтактном способе диагностирования изоляторов?

- а) число импульсов  $N$
- б) изменение напряженности электромагнитного поля
- в) ток разряда

## **Практическое занятие 6**

### **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ**

**Цель практического занятия** — формирование у магистрантов следующих компетенций:

- способность к испытаниям и сдаче в эксплуатацию электроэнергетического и электротехнического оборудования;
- готовность применять методы и средства автоматизированных систем диагностирования.

#### **Методические рекомендации по выполнению практических заданий**

##### *Основные виды внутренней изоляции и причины их отказов*

В установках высокого напряжения (ВН) используется несколько видов внутренней изоляции. Наиболее широкое распространение получили твердая, маслобарьерная (МБИ), бумажно-масляная (БМИ), газовая и вакуумная изоляции. Эти виды внутренней изоляции обладают разными характеристиками, определенными достоинствами и недостатками, имеют свои области применения.

Внутреннюю изоляцию объединяют некоторые общие свойства:

- 1) необратимость разрушения при пробое;
- 2) влияние на поведение в эксплуатации электрических, механических, силовых и других внешних воздействий;
- 3) сложный характер зависимости электрической прочности (пробивного напряжения  $U_{пр}$ ) от длительности воздействия напряжения  $\tau$ , который объясняется различием физических процессов при пробоях при разных длительностях воздействующего напряжения.

**Твердая изоляция**, в отличие от газообразной и жидкой, после пробоя не самовосстанавливается. Это свойство твердые диэлектрики придают также комбинированной изоляции, в состав которой они входят.

Основными видами дефектов твердой изоляции являются увлажнение, появление сосредоточенных дефектов из-за воздействия частичных разрядов, снижение механической и электрической прочности под воздействием электрических и тепловых полей.

**Маслобарьерная изоляция (МБИ).** Основу МБИ составляет минеральное масло. Для повышения пробивного напряжения маслобарьерной изоляции  $U_{пр}$  применяют твердые диэлектрики. В масляных прослойках устанавливают барьеры из электрокартона, гетинакса и др. Электроды покрывают или изолируют бумагой или лакотканью. Барьеры в масле выравнивают электрическое поле за счет осевших на них зарядов. Они препятствуют образованию проводящих мостиков между электродами.

Основными причинами отказов МБИ являются увлажнение компонентов как твердого, так и жидкого диэлектриков, частичные разряды, перекрытие или пробой барьеров.

**Бумажно-масляная изоляция (БМИ).** Исходными материалами для БМИ служат кабельная или конденсаторная бумага и минеральное масло (трансформаторное, кабельное, конденсаторное). Основу БМИ составляют слои бумаги. БМИ обладает высокой электрической прочностью. В зависимости от качества исходных материалов и технологии изготовления допустимые рабочие напряженности БМИ составляют 120...180 кВ/см, а в маслобарьерной изоляции только 40...60 кВ/см.

Основными причинами отказов БМИ являются увлажнение, разрушение частичными разрядами, тепловой пробой из-за низкой допустимой рабочей температуры (не более 90 °С). Поэтому БМИ требует надежной защиты от попадания влаги. Увлажнение влечет за собой увеличение тангенса диэлектрических потерь, уменьшение степени полимеризации бумаги, ухудшение механических свойств.

**Газовая изоляция.** Применение газовой изоляции дает ряд преимуществ по сравнению с твердыми и жидкими диэлектриками. В частности, газовая изоляция отличается очень малыми диэлектрическими потерями и практически не изменяет своих свойств в процессе эксплуатации. Применение ее приводит к резкому снижению массы конструкции. В ряде случаев конструкция устройства упрощается и становится пожаробезопасной.

В качестве изоляции применяют воздух, азот и шестифтористую серу ( $SF_6$  – элегаз). Из них наибольшей электрической прочностью, превышающей прочность азота и воздуха примерно в 2,5 раза, обладает элегаз.



При увеличении давления электрическая прочность элегаза возрастает почти пропорционально давлению и может быть выше электрической прочности жидких и некоторых твердых диэлектриков. Наибольшее рабочее давление и, следовательно, наибольший уровень электрической прочности элегаза в изоляционной конструкции ограничены возможностью сжижения элегаза при низких температурах.

Элегазовая изоляция может быть использована только в герметичных конструкциях. Практика показала, что надежная герметизация конструкций с элегазом является сложной задачей, требующей пристального внимания. В современных элегазовых аппаратах утечка элегаза не превышает 1 % общей массы в год.

Высокая надежность элегазовой изоляции, как показывает опыт, обеспечивается при условии очень тщательной очистки от загрязнений всех элементов конструкции, соприкасающихся с элегазом.

Элегаз является не только хорошей изолирующей, но и хорошей дугогасящей средой. Ток отключения в элегазе примерно в 10 раз больше, чем в воздухе. Если же учесть, что в элегазе скорость восстановления электрической прочности после погасания дуги почти на порядок выше, чем в воздухе, то мощность отключения в элегазе может быть почти в 100 раз больше, чем в воздухе. По этой причине элегазовые выключатели успешно конкурируют с воздушными.

Область применения элегазовой изоляции: комплектные распределительные устройства на напряжение 110...220 кВ, наибольшее рабочее давление элегаза в которых составляет 0,3 МПа. Азот и элегаз применяются для изоляции конденсаторов, трансформаторов, кабелей и герметизированных распределительных устройств.

Воздух под избыточным давлением в несколько атмосфер используют в основном в измерительных конденсаторах на напряжение до 35 кВ. Ограниченное применение воздуха связано с тем, что при частичных разрядах в воздухе образуется озон, вызывающий коррозию металлов и разрушение твердых диэлектриков.

Основной причиной отказов элегазовой изоляции является наличие примесей и загрязнений, вызывающих частичные разряды в изоляции и снижающих кратковременную электрическую прочность конструкции.

**Вакуумная изоляция.** Промежутки, для которых произведение давления газа на межэлектродное расстояние находится в пределах  $0,01...0,2$  кПа $\times$ см, считают вакуумными. Возникновение разряда в них определяется практически только процессами на электродах.

Под нарушением электрической прочности вакуумной изоляции понимают явления, ограничивающие повышение напряжения на электродах в данной конкретной установке. В одном случае это пробой при быстром повышении напряжения, в других – возникновение изредка импульсов тока при длительном приложении напряжения или появление темновых токов. Отличительной чертой вакуумной изоляции являются очень большие разбросы пробивных напряжений и напряжений появления темновых и импульсных токов (измеренные значения могут отличаться друг от друга в 1,5...3 раза), что объясняется особенностями микроструктуры поверхности электродов и их чистотой (адсорбционные и окисные пленки). Характеристики поверхности зависят от материала и чистоты обработки электродов и могут изменяться при воздействии разрядов.

Уменьшить разброс пробивных напряжений удастся с помощью тренировки электродов, представляющей собой серию пробоев вакуумного промежутка до установления стабильного напряжения. При пробоях вакуумного промежутка происходят нагрев электродов и испарение материала с поверхности. В результате этого поверхность электродов становится более гладкой и очищается от посторонних веществ, что и приводит к повышению и стабилизации пробивного напряжения.

Вакуумную изоляцию используют в установках и приборах, где вакуум является рабочей средой. Ее применяют также в конденсаторах на 20...50 кВ, в выключателях, вакуумных разрядниках и реле.

Недостатком вакуумной изоляции являются конструктивные сложности получения высокого вакуума и сложная технологическая обработка токоведущих частей, плохой теплоотвод от токоведущих частей, износ поверхностей контактов, большой разброс пробивного напряжения.

При проверке внутренней изоляции оценивают следующие диагностические признаки:

- 1) тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ ;
- 2) сопротивление изоляции  $R_{\text{из}}$  и коэффициент абсорбции  $K_{\text{абс}}$ ;
- 3) изменение емкости;
- 4) параметры частичных разрядов в изоляции;
- 5) частотные характеристики;
- 6) содержание газов, растворенных в масле;
- 7) инфракрасное излучение.

**Диагностирование на основе измерения диэлектрических потерь в изоляции**

Рассеяние энергии в диэлектрике при воздействии на него переменного напряжения, или диэлектрические потери, обусловлено двумя процессами: проводимостью и поляризацией, развивающимися с задержкой во времени. Любая поляризация, развивающаяся не мгновенно, а с задержкой во времени, непременно связана с диэлектрическими потерями, даже если отсутствуют токи проводимости.

На рис. 6.1, *a* показана векторная диаграмма токов при приложении к диэлектрику напряжения переменного тока.

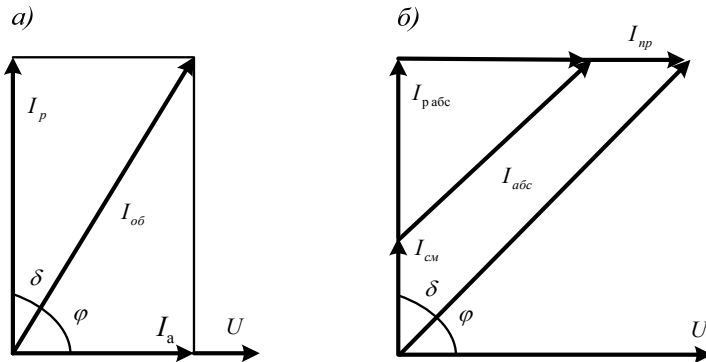


Рис. 6.1. Векторная диаграмма токов в диэлектрике при приложении переменного напряжения: *a* – упрощенная; *б* – полная

Общий ток в диэлектрике  $I_{\text{об}}$  образуется из двух составляющих: реактивной (емкостной)  $I_p$ , опережающей вектор приложенного напряжения на  $90^\circ$ , и активной  $I_a$ , совпадающей с напряжением. Последняя определяется зависимостью

$$I_a = I_p \operatorname{tg} \delta,$$

где  $I_p = I_{p,abc} + I_{cm}$ ;  $I_{p,abc}$  – реактивный ток абсорбции;  $I_{cm}$  – ток смещения, сопутствующий электронной поляризации, протекает в очень малые промежутки времени и может считаться мгновенным.

Вектор  $I_{об}$  опережает вектор  $U$  на угол сдвига фаз  $\varphi$ . Дополнительный угол, дополняющий его до  $90^\circ$ , – угол диэлектрических потерь  $\delta$ . Значение этого угла определяется соотношением  $I_a = I_p \operatorname{tg} \delta$ . Проконтролировать изменение диагностического признака можно косвенным образом через мощность потерь в диэлектрике (рис. 6.1, б):

$$P_a \sim I_p \operatorname{tg} \delta = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta,$$

где  $I_p$  – емкостной ток через диэлектрик;  $U$  – напряжение, приложенное к диэлектрику.

Величина  $\operatorname{tg} \delta$  является важным показателем диэлектрика. Повышенное ее значение свидетельствует об увлажнении, загрязнении и о неоднородности изоляции. Значение тангенса угла диэлектрических потерь дает усредненную объемную характеристику состояния диэлектрика, так как активная составляющая тока, которая вызвана диэлектрическими потерями, связанными с местным дефектом, при измерении относится к общему емкостному току объекта.

Однако измерением  $\operatorname{tg} \delta$  выявляются не все дефекты, приводящие к отказу высоковольтного оборудования, достоверность диагноза состояния изоляции электрооборудования недостаточная. Измерение диэлектрических параметров изоляции высоковольтного оборудования (силовых, измерительных трансформаторов, вводов, конденсаторов связи, силовых кабельных линий) может осуществляться высоковольтным мостом переменного тока типа Р-5026, принципиальная схема которого изображена на рис. 6.2.

Мост состоит из высоковольтного эталонного конденсатора  $C_0$ , практически не имеющего потерь, переменного сопротивления  $R_3$ , переменной емкости  $C_4$  и нуль-индикатора (НИ). Объект диагностирования изображен в виде емкости  $C_x$ .

Питание моста осуществляется при помощи повышающего трансформатора  $T$  при величине тестового напряжения 10 кВ, но не более  $U_{ном}$  оборудования.

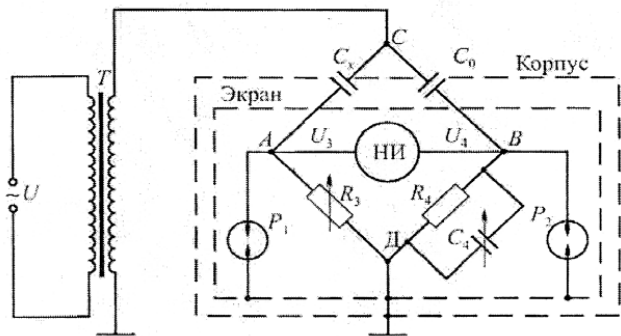


Рис. 6.2. Принципиальная схема моста Р-5026 при нормальной схеме измерения

*Нормальная схема* измерения применяется в случаях, когда проверяемая изоляция  $C_x$  может быть изолирована от земли. По нормальной схеме обычно измеряют межфазную изоляцию трансформатора; все части моста находятся под низким напряжением.

В случае пробоя изоляции защита персонала, выполняющего диагностирование, от высокого напряжения на элементах моста выполняется разрядниками  $P_1$  и  $P_2$ , включенными в точках  $A$  и  $B$ . Для защиты от наведенного напряжения все части моста, находящегося под напряжением, а также эталонный конденсатор экранируются.

Для равновесия моста необходимо, чтобы ток эталонного конденсатора  $C_0$ , разветвляясь в точке  $B$  по ветвям  $R_4$  и  $C_4$ , создавал в этой точке напряжение  $U_4$ , равное по величине и фазе напряжению  $U_3$ . Показателем равновесия моста является нулевое показание нуль-индикатора – приведение стрелки в нулевое положение при регулировании сопротивления  $R_3$  и емкости  $C_4$ , с увеличением при этом чувствительности указателя равновесия.

В зависимости от положения переключателя пределов измеренные значения  $C_x$  определяют по формуле

$$C_x = C_0 NR_4/R_3,$$

где  $C_0$  – емкость образцового конденсатора, пФ;  $N$  – множитель переключателя (1 или 0.1);  $R_3$  – отсчет сопротивления на мосте, Ом;

$$R_4 = 10^4/\pi = 3183 \text{ Ом.}$$

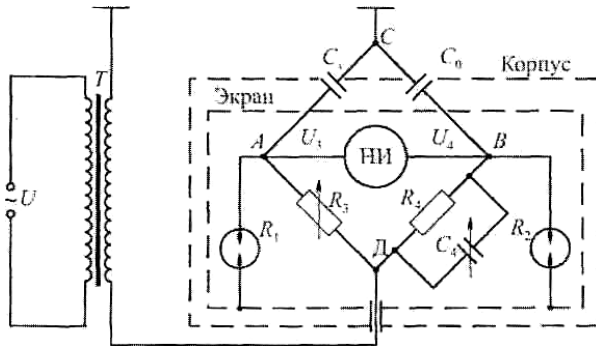


Рис. 6.3. Принципиальная схема моста Р-5026 при перевернутой схеме измерения

Значение  $\operatorname{tg} \delta$  подсчитывают по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = NC_4,$$

где  $C_4$  – регулируемая емкость в плече моста  $R_4$ , пФ.

Из приведенных формул видно, что искомые показатели проверяемого объекта ( $\operatorname{tg} \delta$ ,  $C_x$ ) определяются значениями  $R_3$ ,  $C_4$ ,  $R_4$  в положении равновесия моста.

В большинстве случаев в эксплуатационных условиях проверяемый объект имеет один наглухо заземленный электрод, например, бак трансформатора, корпус ввода и др. В этом случае применяют *перевернутую схему* измерения  $\operatorname{tg} \delta$ , в которой точки заземления Э и подачи высокого напряжения меняются местами (рис. 6.3).

На результаты измерения оказывают влияние электрические и магнитные поля, которые могут внести значительные погрешности, если не принять меры по их устранению.

**Область применения метода:** контроль состояния изоляции силовых, измерительных трансформаторов, конденсаторов, вводов, силовых кабелей 35 кВ.

#### ***Контроль сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции***

Схема замещения неоднородной изоляции показана на рис. 6.4, где использованы обозначения:  $R$  – сопротивление тока утечки;  $r$  – сопротивление включений;  $\Delta C$  – емкость неоднородного диэлектрика;  $C_g$  – геометрическая емкость диэлектрика.

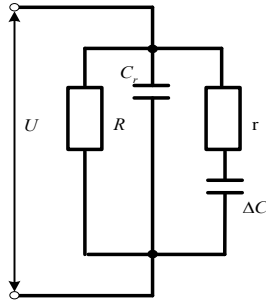


Рис. 6.4. Схема замещения диэлектрика

При неоднородной изоляции ток через нее изменяется во времени по выражению:

$$i(t) = \frac{U}{R} + \frac{U}{r} e^{-t/T},$$

где  $T = r \Delta C$  – постоянная времени.

Сопротивление изоляции в переходном режиме изменяется по закону:

$$R_{из}(t) = \frac{U}{i(t)} = \frac{R}{1 + \frac{r}{R}} e^{-t/T}.$$

При контроле изоляции вся зависимость  $R_{из}(t)$  не определяется. Оценка состояния изоляции осуществляется по значениям сопротивления, измеренным мегомметром через 15 и 60 с ( $R_{15}$  и  $R_{60}$ ) после подачи напряжения. По полученным значениям определяют коэффициент абсорбции  $K_{абс} = R_{60}/R_{15}$ . Если  $K_{абс} > 1,3$ , то изоляция неувлажненная; если  $K_{абс} < 1,3$  – изоляция увлажненная и снимается с эксплуатации.

Определение  $R_{из}$  и  $K_{абс}$  применяется как экспресс-метод оценки состояния изоляции силовых измерительных трансформаторов перед вводом их в эксплуатацию после транспортировки и монтажа. У силовых кабелей 6 кВ и выше измеряют до и после приложения повышенного напряжения.

Измерение сопротивления изоляции – достаточно малоэффективный способ проверки, требует отключения электроустановки на время измерения, весьма трудоемок – необходимо измерить каждый изолирующий элемент. Данный способ контроля при диагностировании внутренней изоляции также обладает высокой погреш-

ностью. По полученным результатам можно судить лишь об общем состоянии изоляции.

**Область применения метода:** выходной контроль при проверке оборудования перед вводом в эксплуатацию.

### *Контроль состояния изоляции по изменению емкости*

Одним из наиболее важных показателей диэлектрика является изменение емкостных параметров, по которым определяется состояние изоляции. Измерение емкости изоляции позволяет обнаружить и местные дефекты. Степень выявляемости дефектов зависит от соотношения между поврежденной и неповрежденной частями изоляции.

Контроль работоспособности изоляции по емкостным параметрам основан на предположении, что емкость объекта при неизменной температуре и частоте изменяется незначительно, т. е.  $C = \text{const}$ . При скачкообразном изменении емкости можно судить о наличии дефектов в изоляции (появляются большие по объему и хорошо проводящие включения) и о шунтировании части изоляции.

Схема замещения изоляции представлена на рис. 6.5.

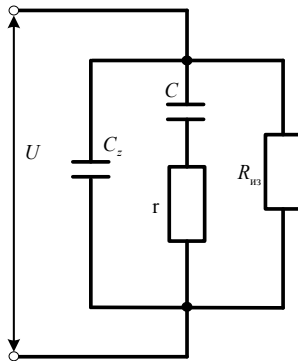


Рис. 6.5. Схема замещения изоляции

В схеме на рис. 6.5 одна ветвь включает емкость  $C_\infty$ , другая ветвь, содержащая емкость  $C = C_o - C_\infty$  и сопротивление включений  $r$ , отражает поляризационные процессы в изоляции. Суммарная емкость схемы равна  $C_\infty + (C_o - C_\infty) = C_o$ . Эта емкость определяет полный заряд, который может накопиться на электродах изоляционной конструкции после завершения поляризационных процессов. Кро-



ме этих ветвей, в схему замещения включено также сопротивление изоляции  $R_{из}$ , обусловленное сквозными токами утечки в изоляции.

Емкость, измеренная на частоте  $f$ , определяется соотношением

$$C_{fT} = C_f \rightarrow \infty + C \frac{1}{1 + (fT)^2},$$

где  $T = r\Delta C$  – постоянная времени.

В эксплуатационных условиях измерение емкости изоляции выполняется при двух частотах:  $f_1 = 2$  Гц и  $f_2 = 50$  Гц. При этом температура должна быть постоянной и находиться в пределах 10...30 °С. Чем ближе друг к другу измеренные значения емкостей  $C_2$  и  $C_{50}$ , тем качественнее изоляция.

Экспериментальным путем установлено, что изоляция недопустимо увлажнена, если  $C_2/C_{50} > 1,3$ .

Измерение емкостей осуществляется с помощью приборов контроля влажности (ПКВ). Схема прибора показана на рис. 6.6.

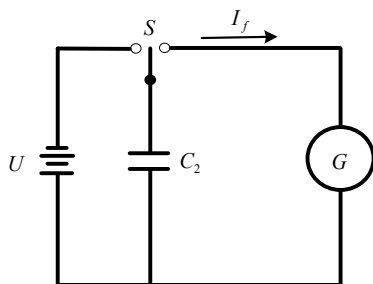


Рис. 6.6. Принципиальная схема прибора контроля влажности

Переключатель  $S$  периодически подключает проверяемую изоляцию к источнику постоянного напряжения  $U$  (при этом емкость изоляции заряжается), а затем к гальванометру  $G$  (емкость разряжается). Средний ток, измеряемый гальванометром, равен  $I_f = UC_{\omega}f$ . Измерения выполняются на частотах 2 и 50 Гц, поэтому соотношение емкостей равно

$$C_2/C_{50} = 50I_2/2I_{50}.$$

Метод оценки состояния изоляции по емкостным параметрам наиболее эффективен для маслобарьерной и бумажно-масляной изоляции. Характерным недостатком метода является невозможность

оценки состояния изоляции между двумя незаземленными электродами. Кроме того, температура при измерениях не должна опускаться ниже  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Все это существенно снижает эффективность метода.

**Область применения метода:** оценка состояния обкладок конденсаторов, обмоток силовых, измерительных трансформаторов по отношению к баку, изоляции кабелей, вводов.

### *Контроль изоляции по параметрам частичных разрядов*

Развитие частичных разрядов (ЧР) в газовых включениях можно представить схемой замещения (рис. 6.7).

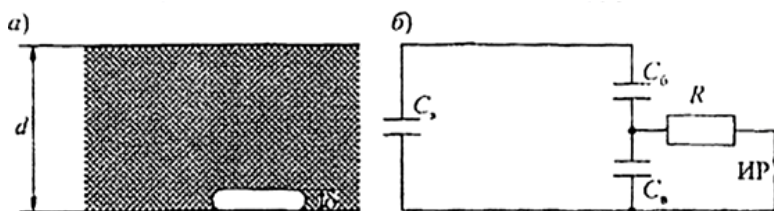


Рис. 6.7. Изоляция с газовым включением (а) и схема ее замещения (б)

На этой схеме  $C_b$  — емкость газового включения;  $C_a$  — емкость участка изоляции, расположенного последовательно с газовым включением;  $C_v$  — емкость остальной части изоляции; ИР — искровой разрядник, который имитирует пробой газового включения;  $R$  — сопротивление канала ЧР в газовом включении;  $d$  — толщина диэлектрика;  $\delta$  — толщина воздушного включения.

Скорость старения и срок службы изоляции зависят от средней мощности  $P_{cp}$  и энергии частичных разрядов  $W_{чр}$ . Эти параметры являются важнейшими для оценки интенсивности ЧР. Однако они очень малы ( $W_{чр} = 10^{-8}$  Дж;  $P_{cp} = 10^{-6}$  Вт), непосредственное их измерение существующими средствами пока невозможно.

Для обнаружения ЧР и измерения их интенсивности разработано несколько методов, основанных на регистрации различных внешних проявлений ЧР. Наибольшее распространение получил электрический метод.

Для практических целей используют кажущийся заряд  $q$  и скачок напряжения  $\Delta U_x$ , пропорциональные  $W_{чр}$ , которые связаны соотношением:

$$\Delta U_x = q/C_x,$$

где  $C_x$  – емкость проверяемого изолятора.

Скачок напряжения  $\Delta U_x$  объясняется тем, что в канале ЧР рассеивается часть энергии, запасенной в электрическом поле изоляции. В момент, предшествующий ЧР, в  $C_x$  запасена энергия:

$$W = C_x U^2/2.$$

Можно приближенно принять, что после погасания ЧР в изоляции остается энергия:

$$W_{\text{чр}} = C_x (U - \Delta U_x)^2/2,$$

где  $U$  – напряжение в момент появления ЧР.

Следовательно,

$$W_{\text{чр}} = C_x U^2/2 - C_x (U - \Delta U_x)^2/2.$$

Учитывая, что  $\Delta U_x \ll U$ , имеем  $W_{\text{чр}} = \Delta U_x U$ .

Мерой интенсивности средней мощности  $P_{\text{ср}}$  служит средний ток ЧР:

$$I_{\text{ср}} = n_f q,$$

где  $n_f$  – число импульсов;  $q$  – кажущийся заряд.

Экспериментально установлено, что значения  $q$  в изоляции составляют от  $10^{-14}$  до  $10^{-6}$  Кл. При ЧР с  $q = 10^{-14} \dots 10^{-16}$  Кл происходит медленное старение изоляции (20 лет и более), при ЧР с  $q = 10^{-9} \dots 10^{-10}$  Кл за короткое время происходит значительное разрушение изоляции. Такие величины недопустимы даже при кратковременных перенапряжениях.

На рис. 6.8 показана схема технических средств для измерения характеристик ЧР в изоляции, где  $T$  – высоковольтный трансформатор;  $C_x$  – емкость проверяемой изоляции;  $C_c$  – конденсатор связи;  $Z_{\text{и}}$  – измерительный элемент (индуктивность  $L$ , сопротивление  $R$ );  $C_{\text{п}}$  – паразитная емкость входных цепей измерительной установки;  $\Phi$  – фильтр;  $У$  – усилитель; СИ – счетчик импульсов; ЭО – электронный осциллограф.

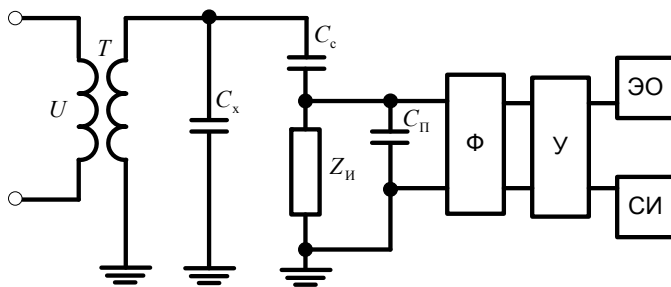


Рис. 6.8. Схема технических средств для измерения характеристик ЧР в изоляции

Скачок напряжения  $\Delta U_x$  на изоляции  $C_x$  вызывает переходной процесс в контуре измерительной установки по цепи  $C_x \rightarrow C_c \rightarrow Z_{и} \rightarrow T$ . Вследствие переходного процесса на измерительном элементе  $Z_{и}$  возникает кратковременный импульс напряжения. Амплитуда импульса напряжения на  $Z_{и}$  пропорциональна значению  $U_x$ . Для рассмотренной схемы скачок напряжения определяется выражением

$$\Delta U_x = \frac{q}{C_x + C_c + C_x \cdot C_n / C_c}.$$

Импульс напряжения  $\Delta U_x$  с элемента  $Z_{и}$  через фильтр поступает на усилитель, а затем на осциллограф для измерения его амплитуды и на счетчик импульсов для измерения числа ЧР в единицу времени. В условиях эксплуатации контроль изоляции с помощью электрического метода регистрации ЧР крайне затруднен из-за очень высокого уровня помех от короны на проводах и арматуре изоляторов.

**Область применения метода:** в стационарных лабораториях для контроля состояния изоляции высоковольтного оборудования после его изготовления или ремонта, а также при проведении научных исследований.

### ***Контроль состояния изоляции трансформатора по частотным характеристикам***

Изоляция всех силовых трансформаторов в процессе эксплуатации подвергается разной степени увлажнения и может находиться в трех состояниях: I – увлажненная выше нормированных значений (влажность в масле  $W > 0,0025\%$ ), II – увлажненная до допустимого предельного состояния (влажность в масле

$W > 0,0018 \%$ ), III – высушенная изоляция (влагосодержание в масле  $W < 0,0010 \%$ ).

Увлажнение внутриобмоточной изоляции трансформатора вызывает увеличение внутриобмоточных емкостей и приводит к уменьшению собственных частот составляющих обмотки (слоя, катушки) трансформатора и коэффициента передачи.

Обмотки трансформатора могут быть представлены слоями, катушками и слоями катушек, с постоянной индуктивностью и переменной емкостью, причем емкость является одним из основных параметров, определяющих состояние изоляции. Отсюда следует, что каждому слою витков, слою катушек или отдельным катушкам соответствуют собственные частоты.

Обмотку силового трансформатора в общем виде можно представить сочетанием элементарных контуров, содержащих элементы  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Аналогично могут быть представлены схемы замещения витков, слоев, катушек. Эти схемы могут содержать различные комбинации из составляющих  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементов в зависимости от частоты напряжения, приложенного к обмотке (или к ее части), и распределяться в последовательности, показанной на рис. 6.9.

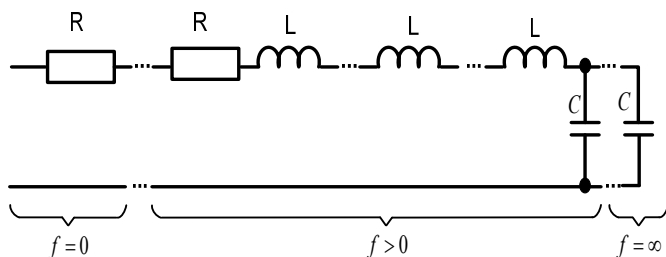


Рис. 6.9. Схема замещения слоя обмотки трансформатора в зависимости от частоты

Схема замещения обмоток трансформатора при исследовании на частотах до  $10^3$  кГц представляется матричной формой, состоящей из элементарных контуров (рис. 6.10).

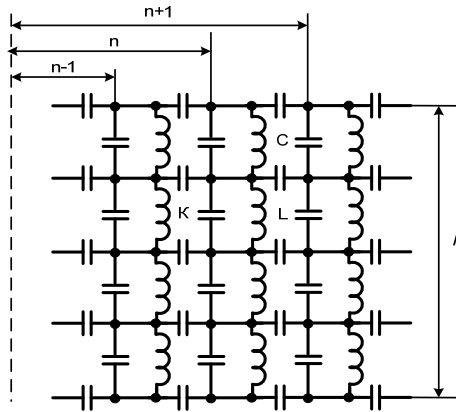


Рис. 6.10. Схема замещения для слоевой обмотки трансформатора:  
 $L$  – витковая индуктивность;  $K$  – витковая емкость;  $C$  – витковая емкость между слоями;  $n$  – число слоев

Значения индуктивности  $L$  и емкостей  $K$  и  $C$  определяются геометрическими размерами конструкции витка, слоя, катушки или в целом обмотки.

Для определения состояния витковой, слоевой изоляции во внутренних объемах обмотки необходимо, чтобы в процессе диагностирования участвовали емкости витковой, слоевой изоляции. Это может быть достигнуто подачей тестового сигнала с частотой менее критической:

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad \omega_{\text{диаг}} < \omega_{\text{кр}} = \frac{1}{\sqrt{LK}}.$$

При равенстве частот приложенного напряжения собственной частоте слоев, катушек или обмотки в них возникает резонанс.

Изменение собственных частот составляющих обмоток (слой, катушка) трансформатора может быть связано либо только с увлажнением или только со старением внутриобмоточной изоляции, независимо для твердой или жидкой, либо с увлажнением и старением одновременно.

Значение амплитуды напряжения  $U$  на разных экстремальных точках также изменяется в зависимости от состояния изоляции. Эти параметры можно использовать как диагностические призна-

ки оценивания состояния внутренней изоляции силовых трансформаторов.

Диагностирование состояния изоляции состоит в периодическом измерении уровней напряжения на выводах обмоток высокого напряжения (ВН) при подключении генератора ВЧ-сигнала к выводам обмотки низкого напряжения (НН) силового трансформатора. Частота высокочастотного сигнала для каждого габарита трансформаторов может быть определена расчетом или экспериментально и равна собственной частоте колебаний высоковольтной обмотки при состоянии изоляции, отвечающей требованиям норм при эксплуатации силового трансформатора.

Реализация частотно-резонансного метода может быть осуществлена тремя способами:

- 1) контроль коэффициента передачи;
- 2) контроль разности напряжений в выключенном состоянии;
- 3) контроль разности напряжений трансформатора при рабочем напряжении.

**Контроль коэффициента передачи.** Критерий оценивания состояния изоляции основан на определении коэффициента передачи  $\kappa = U_2/U_1$  высокочастотного сигнала, поданного на обмотку низкого напряжения  $U_1$  и обмотку высокого напряжения  $U_2$  диагностируемого силового трансформатора.

Структурная схема устройства диагностирования приведена на рис. 6.11, где  $T$  – трансформатор;  $C_1, C_2$  – высоковольтные конденсаторы связи; ФП1, ФП2 – фильтры присоединения; БКИ – блок коммутаций и измерений; БГТ – блок генерации тестов; БО – блок обработки; БИ – блок индикации; ПО – пульт оператора; НН и ВН – низковольтный и высоковольтный выходы соответственно.

Устройство, осуществляющее диагностирование состояния изоляции при снятом рабочем напряжении по коэффициенту передачи, работает следующим образом.

БГТ вырабатывает стабилизированное по амплитуде напряжение синусоидальной формы в частотном диапазоне 40...60 кГц. Человек-оператор с помощью регулировки на пульте оператора устанавливает собственную частоту обмотки трансформатора. Далее высокочастотный сигнал усиливается и через высокочастотный

разделительный трансформатор БКИ амплитудой около 30 В подается с помощью соединительного кабеля на выводы низковольтной обмотки НН проверяемого трансформатора. Со второй первичной обмотки высокочастотного разделительного трансформатора БГТ сигнал амплитудой 3 В подается на мостовой выпрямитель, с выхода которого напряжение отрицательной полярности поступает в БО, выполняющий операцию деления сигналов  $U_2/U_1$ .

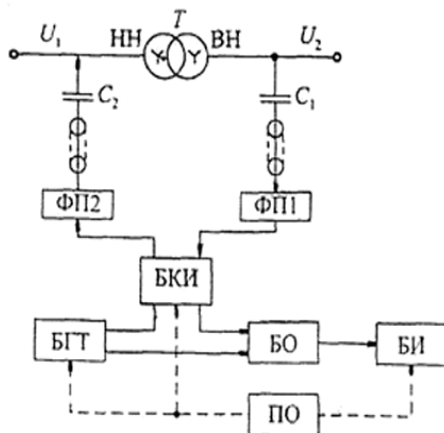


Рис. 6.11. Структурная схема устройства диагностирования

Сигнал с высоковольтного вывода проверяемого трансформатора с помощью соединительного кабеля поступает через активный полосовой фильтр БКИ, который настроен на соответствующую частоту, на диодный мост. Его выход через интегратор подключен на второй вход делителя напряжения БО, на выходе которого формируется постоянное напряжение  $U_{\text{вых}} = U_2/U_1$ . Это напряжение поступает на аналого-цифровой преобразователь БИ и отображается на его цифровом индикаторе.

Человек-оператор сравнивает результат с допустимыми значениями и устанавливает диагноз: «работоспособен – неработоспособен».

Основной недостаток рассматриваемого устройства – сложность логических операций с получаемыми сигналами при оценке их отношений.



**Контроль разности напряжений.** Второй способ оценивания состояния изоляции трансформаторов основан на измерении разности входного и выходного напряжений на его вводах  $\Delta U = |U_2| - |U_1|$ . Частотные  $\Delta U = k(f)$  характеристики при различных состояниях внутренней изоляции силового трансформатора приведены на рис. 6.12.

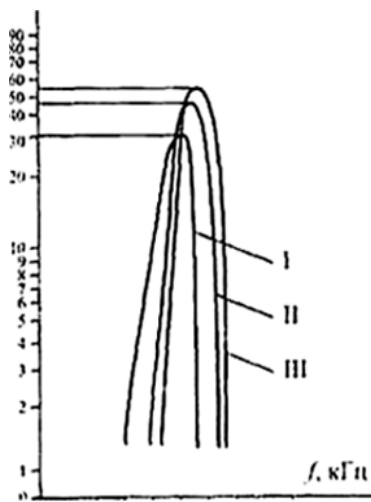


Рис. 6.12. АЧХ  $\Delta U = k(f)$  трансформатора при состояниях: I — увлажненная изоляция; II — изоляция подсушена; III — высушенная изоляция

Способ диагностирования реализуется с помощью устройства, структурная схема которого представлена на рис. 6.11. Тестовый сигнал частотой 54 Гц формируется в блоке генераторов тестов, выход которого через усилитель мощности подключен к блоку коммутации и измерений.

С помощью высокочастотного экранированного кабеля прибор подключен к выводам низковольтной обмотки контролируемого силового трансформатора. Выводы высоковольтной обмотки трансформатора с помощью высокочастотного экранированного кабеля подключены к БКН. Пройдя усилитель с фильтром частоты, сигнал поступает к первому входу дифференциального усилителя блока обработки.

На второй вход дифференциальной схемы подается сигнал с вторичной обмотки разделительного трансформатора. Получен-

ный разностный сигнал поступает на цифровой индикатор блока индикации.

Степень отклонения напряжения от нулевого значения или напряжения небаланса в показаниях схемы индикации будет соответствовать степени ухудшения внутренней изоляции в проверяемом трансформаторе.

**Недостаток** вышеописанного устройства состоит в невозможности контроля состояния изоляции силовых трансформаторов без их вывода из рабочего режима.

**Контроль разности напряжений в рабочем режиме.** Свободным от указанного недостатка является устройство, обеспечивающее диагностирование силовых трансформаторов под рабочим напряжением. В этом случае при диагностировании в рабочем режиме параметры трансформатора соответствуют реальным эксплуатационным параметрам (напряженность электромагнитного поля, температура), а значит, точность определения и прогнозирование состояния электрооборудования увеличиваются.

Устройство работает следующим образом (рис. 6.11). Высокочастотные сигналы с генератора БГТ поступают через соответствующий фильтр присоединения и конденсатор связи по высокочастотному кабелю на обмотку ВН проверяемого трансформатора и одновременно на вход ВН прибора. Сигнал, прошедший через диагностируемый трансформатор, поступает через соответствующий конденсатор связи и фильтр присоединения по высокочастотному кабелю на вход НН прибора.

С входов НН и ВН прибора высокочастотные сигналы поступают на активные фильтры, а с их выходов — на входы резонансных усилителей, где усиливаются, а затем выпрямляются и фильтруются выпрямителями БКИ. Выпрямленные сигналы поступают с них на входы дифференциального усилителя БО. Результирующий сигнал через усилитель подается на цифровой индикатор БИ, показывающий состояние изоляции.

При нормальном состоянии изоляции проверяемого трансформатора напряжение, поступающее на вход цифрового индикатора, равно нулю. При состоянии изоляции контролируемого трансформатора, соответствующем предаварийному состоянию по увлажне-

нию, изменяются численные значения емкостных и активных проводимостей проверяемого трансформатора. При этом изменяется уровень прошедшего через трансформатор сигнала соответствующей частоты. Индикатор выдает информацию о снижении уровня изоляции ниже установленной нормы.

**Область применения метода.** Способ контроля по разности напряжений используется для оценки состояния изоляции как при отключении напряжения, так и под рабочим напряжением. Способ контроля коэффициента передачи можно использовать как для оценки состояния изоляции по изменению емкостных параметров, так и для определения наличия витковых замыканий.

***Метод выявления дефектов в изоляции по анализу газов, растворенных в масле***

В процессе старения изоляция претерпевает ряд физико-химических изменений. При этом выделяются продукты разложения — твердые, жидкие и газообразные вещества. Твердые изоляционные материалы на основе целлюлозы (бумага, картон) при медленном старении выделяют газы, в их числе водород, низкомолекулярные углеводороды, а также окись и двуокись углерода, образующиеся при окислении целлюлозы. Газы образуются также и при старении масла, причем интенсивность газовой выделенности зависит от напряженности электрического поля и от химического состава масла.

Газовыделение зависит от режима работы объекта, продолжительности использования примененных в нем материалов и ряда других факторов. Продукты разложения материалов накапливаются в изоляционном масле или в надмасляном пространстве оборудования; их можно обнаружить при анализе проб масла. Методы, основанные на выявлении продуктов разложения (старения) конструкционных материалов, получили широкое применение при диагностировании силовых трансформаторов.

В состав газов, растворенных в масле нормально работающих силовых трансформаторов, входят метан  $\text{CH}_4$ , этан  $\text{C}_2\text{H}_6$ , этилен  $\text{C}_2\text{H}_4$ , ацетилен  $\text{C}_2\text{H}_2$ , пропан  $\text{C}_3\text{H}_8$ , пропилен  $\text{C}_3\text{H}_6$ , водород  $\text{H}_2$ , окись углерода  $\text{CO}$  и двуокись углерода  $\text{CO}_2$ . Исходная концентрация газов в масле определяется по формуле

$$A_m^0 = A_r (B + V_r/V_m),$$

где  $A_r$  – равновесная концентрация газа, извлеченного из масла в объеме надмасляного пространства;  $B$  – коэффициент растворимости газа в масле;  $V_r$  – объем надмасляного пространства;  $V_m$  – объем пробы масла, мл.

В табл. 4 приведены данные о содержании газов в масле нормально работающих мощных силовых трансформаторов.

Таблица 4

Концентрация газов, растворенных в масле

| Оборудование                            | Концентрация газов, мкл/л |     |                 |                 |                               |                               |                               |
|---|---------------------------|-----|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|   | H <sub>2</sub>            | CO  | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
| Трансформаторы напряжением 110...500 кВ | 100                       | 200 | 6000            | 100             | 10                            | 100                           | 50                            |
| Трансформаторы напряжением 750 кВ       | 30                        | 200 | 3000            | 20              | 10                            | 20                            | 10                            |
| Реакторы напряжением 750 кВ             | 100                       | 200 | 3000            | 30              | 10                            | 10                            | 20                            |

В трансформаторах, расширители которых имеют сообщение с воздухом, парциальное давление газов ниже, чем в герметизированных, так как газы непрерывно удаляются. По мере приближения к месту дефекта концентрация этих газов растет.

В трансформаторах с азотной защитой выделившиеся газы постепенно скапливаются над поверхностью масла. В трансформаторах с пленочной защитой выделившиеся газы в основном растворены в масле. Состав газов, сигнализирующих о дефекте, и их концентрация зависят от конструктивных особенностей трансформатора, индивидуальных особенностей дефекта и места взятия пробы. Анализ газов, растворенных в масле, обеспечивает раннее выявление дефектов. Диагностирование по содержанию растворенных в масле газов включает выявление объектов с дефектами, оценку скорости развития дефектов и определение их характера и опасности.

На первом этапе из всей совокупности диагностируемых трансформаторов выделяется группа, имеющая признаки развивающихся дефектов. Одним из наиболее часто применяемых признаков является концентрация диагностических газов. Устанавливаются соответствующие нормы – граничные значения этих концентра-

ций, на основании которых и осуществляется выявление элементов ЭУ с дефектами.

Обычно нормы определяются статистически как верхняя (с определенной вероятностью) граница значений концентраций газов всей совокупности используемых трансформаторов без явных признаков каких-либо дефектов. Следовательно, нормы являются лишь условной границей между степенями работоспособности трансформаторов. Превышение допустимых концентраций газов, растворенных в масле, обычно означает переход трансформатора в группу повышенного риска, что свидетельствует о необходимости более тщательного и частого контроля.

Анализ газов, выделяющихся при разрушении электрической изоляции, выполняется с целью выявления их состава и определения концентраций.

Простейшим методом контроля является определение общего газосодержания масла (объем растворенных в нем газов).

В практике энергосистем применяется газоадсорбционная хроматография, основанная на разделении анализируемой смеси при помощи различных адсорбентов – пористых веществ с сильно развитой поверхностью. Процесс газовой хроматографии состоит из двух этапов: разделения анализируемой смеси на компоненты (качественный анализ) и определения их концентраций (количественный анализ).

Структурная схема хроматографической установки приведена на рис. 6.13.

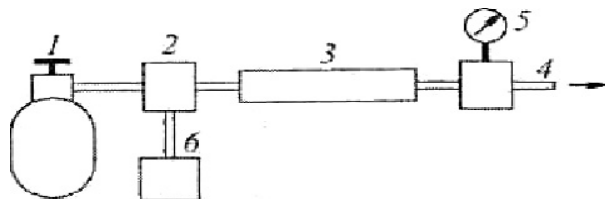


Рис. 6.13. Структурная схема хроматографической установки

После выделения из масла анализируемая смесь газов (проба) вводится в поток газа-носителя, который с постоянной скоростью

пропускается через разделительную колонку, содержащую адсорбент. Различия в физико-химических свойствах отдельных газов смеси вызывают различия в скорости их продвижения через адсорбент. Поэтому на выходе разделительной колонки будут последовательно появляться составляющие анализируемой пробы в смеси с газом-носителем.

Свойства газов, выходящих из разделительной колонки, определяются детектором, сигнал которого регистрируется специальным устройством (обычно самопишущим потенциометром или ПЭВМ).

Примерный вид хроматограммы приведен на рис. 6.14.

Последовательность (время) вывода из разделительной колонки конкретных газов известна для данных условий анализа. Это дает информацию о составе анализируемой смеси. Для получения количественных показателей определяют площадь пиков хроматограммы, которая на основании данных калибровки приводится к значениям концентрации соответствующих газов.

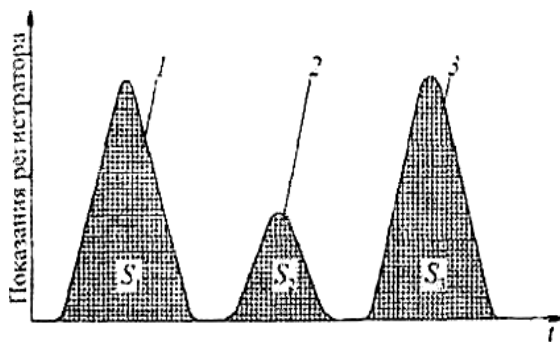


Рис. 6.14. Хроматограмма смеси трех газов: 1, 2, 3 – составляющие газы

Чувствительность анализа, т. е. наименьшие выявляемые концентрации газов, определяет и чувствительность метода диагностирования. Даже при определении лишь состава растворенных газов необходимо убедиться, что порог чувствительности анализа обеспечивает выявление концентраций характерных газов, свидетельствующих о наличии развивающихся дефектов.

Появлением газа в масле трансформатора считается значение концентрации, превышающее пороговую чувствительность.

Концентрация анализируемых газов оценивается площадями  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  соответственно.

Измеренные концентрации газов могут быть использованы для расчета отношений концентраций и скорости их нарастания лишь в случае, если их значения в 5...10 раз превышают порог чувствительности метода анализа.

**Область применения метода:** оценка состояния маслобарьерной изоляции трансформаторов напряжения, тока, высоковольтных вводов и маслонаполненных высоковольтных аппаратов.

### Тесты

1. Укажите, какие дефекты внутренней изоляции выявляются при контроле по тангенсу диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ):

- а) сосредоточенные
- б) неоднородность изоляции
- в) распределенные в объеме изоляции

2. Как изменяются емкость  $C$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  неоднородного диэлектрика с увеличением его температуры?

- а)  $\text{tg}\delta$  и  $C$  увеличиваются
- б)  $\text{tg}\delta$  увеличивается,  $C$  не изменяется
- в)  $\text{tg}\delta$  не изменяется,  $C$  увеличивается

3. Какие факторы влияют на точность измерения  $\text{tg}\delta$  в условиях эксплуатации?

- а) атмосферные условия
- б) емкостные связи с работающим оборудованием
- в) фаза тестового напряжения

4. Каковы признаки появления теплового старения твердых диэлектриков?

- а) снижение их механической прочности
- б) увеличение рабочей температуры
- в) уменьшение электрической прочности

5. Какое из приведенных условий однозначно определяет отсутствие заряда абсорбции в двухслойной изоляции?

- а)  $R_1 C_1 > R_2 C_2$
- б)  $R_1 C_1 = R_2 C_2$
- в)  $R_1 C_1 < R_2 C_2$

6. Укажите, какие дефекты изоляции выявляются методами контроля, использующими явление абсорбции:

- а) сосредоточенные, вызванные механическими повреждениями изоляции
- б) распределенные, изменяющие степень однородности диэлектрика
- в) равномерное увлажнение изоляции

7. Для какой изоляции проявляется зависимость емкости  $C$  от частоты приложенного напряжения?

- а) для равномерно увлажненной
- б) с однородной структурой
- в) с неоднородной структурой

8. Как объяснить отрицательный знак при измерении тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  в условиях эксплуатации?

- а) наличием емкостной связи объекта диагностирования с другими источниками напряжения
- б) генерированием энергии в диэлектрике
- в) неправильно выбранной схемой измерения  $\text{tg}\delta$

9. Почему рабочее напряжение на изоляции должно быть ниже, чем напряжение, при котором возникают частичные разряды?

- а) ухудшаются экономические показатели оборудования из-за дополнительных потерь энергии при частичных разрядах
- б) сокращается срок службы изоляции из-за постепенного ее разрушения частичными разрядами
- в) частичные разряды вызывают недопустимое повышение температуры

10. Укажите среди нижеследующих соотношений допустимые значения коэффициентов, при которых изоляция трансформатора считается нормальной при диагностировании ее методом «емкость – частота»:



- а)  $C2/C50 > 1,3$
- б)  $C2/C50 < 0,1$
- в)  $C2/C50 < 1,3$

**11.** Какие из перечисленных дефектов выявляются в изоляции по току утечки при постоянном напряжении?

- а) сосредоточенные дефекты
- б) частичное и сквозное увлажнение изоляции
- в) наличие газовых включений

**12.** Какого вида дефекты в изоляции обнаруживаются по зависимости емкости от частоты?

- а) сосредоточенные
- б) распределенные
- в) сквозное увлажнение

**13.** Какие энергетические параметры вычисляются, а какие измеряются при регистрации частичных разрядов во внутренней изоляции?

- а) кажущийся заряд ( $q$ , Кл), энергия частичного разряда ( $W$ , Дж)
- б) мощность частичного разряда ( $P$ , Вт), ток частичного разряда ( $I$ , мА)
- в) число импульсов ( $n$ )

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ И ПРИМЕРНЫЕ ОТВЕТЫ ПО ТЕМАМ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**

**1. Дайте определения следующих понятий: техническая диагностика, диагностирование, диагноз.**

Техническая диагностика — область знаний, охватывающая теорию, методы, алгоритмы и средства оценки состояния технических объектов.

Диагностирование — процесс определения состояния технических объектов. Различают рабочее, при котором на объект подаются все необходимые для работы воздействия; тестовое, при котором состояние объекта определяется по его реакции на специальные тестовые воздействия.

Диагноз — результат диагностирования. Объект, состояние которого оценивается, называется объектом диагностирования.

**2. Дайте определения следующих понятий: работоспособность, штатное функционирование; неработоспособность, нештатное функционирование.**

Работоспособность — состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих выполнение им заданных функций, находятся в установленных пределах. В этом случае объект функционирует штатно.

Неработоспособность — состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего выполнение заданных функций, не соответствует установленным требованиям. При этом если объект выполняет часть заданных функций, то он функционирует нештатно.

**3. Дайте определения следующих понятий: отказ, виды отказов; дефект, виды дефектов.**

Отказ — событие, заключающееся в переходе объекта из работоспособного состояния в неработоспособное. Различают полный, частичный и перемежающийся отказы. *Полный* — когда неработоспособный объект не выполняет ни одной из заданных функций. *Частичный* — когда неработоспособный объект выполняет часть заданных функций. *Перемежающийся* — когда объект то работоспособен, то неработоспособен.

Дефект – причина отказа. Различают отказ элемента сложного объекта, появление новых связей между элементами (например, короткое замыкание), отсутствие связи между элементами (например, обрыв).

#### **4. Назовите задачи диагностики и их сочетания.**

Техническая диагностика решает три задачи: контроль (проверка) работоспособности, поиск дефектов и прогнозирование изменения состояния объекта.

Контроль работоспособности (КР) – сравнение текущего состояния объекта, характеризуемого значением диагностического признака, с областью работоспособности, определяемой граничными значениями диагностических признаков (допуском). В качестве диагностических признаков используют параметры (физические величины) и характеристики (зависимости одной физической величины от другой). Различают: качественный (допусковый) и количественный (определение степени работоспособности) контроль.

Поиск дефектов (ПД) – определение причины отказа или резкого снижения запаса работоспособности. Реализуется с помощью алгоритмов поиска.

Прогнозирование изменения состояний (ПИС) – предсказание времени безотказной работы объекта или вероятности, с которой объект будет работоспособным в установленный момент времени.

На практике возможны следующие сочетания задач:

КР и ПД – для восстанавливаемых объектов;

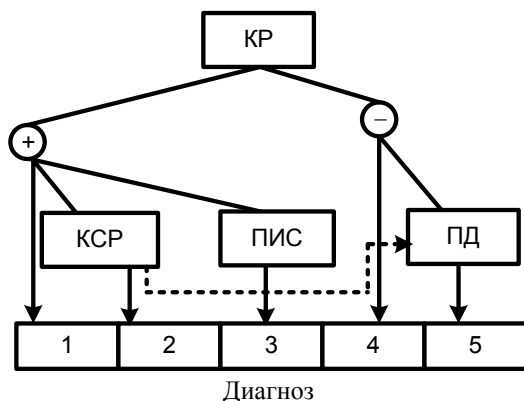
КР и ПИС – для высоконадежных объектов;

КР, ПД и ПИС – для сложных, восстанавливаемых, высоконадежных объектов.

#### **5. Определите процедуру диагностирования и виды диагнозов.**

В общем случае процедуру решения задач технической диагностики можно представить как показано на нижеприведенном рисунке (Процесс постановки диагноза).

На рисунке приняты обозначения: КР – контроль работоспособности; КСР – контроль степени работоспособности; ПИС – прогнозирование изменения состояния; ПД – поиск дефектов; «+» – положительный результат контроля (работоспособен); «-» – отрицательный результат контроля (неработоспособен) при резком снижении запаса работоспособности.



При этом возможны следующие виды диагноза:

- 1) «работоспособен», «годен», «да»;
- 2) степень работоспособности – 70 %;
- 3) время безотказной работы – 300 ч;
- 4) «сгорел резистор R15», «пробит конденсатор С4»;
- 5) «неработоспособен», «негоден», «нет».

#### 6. Приведите основные положения технической диагностики.

1. Допущение о том, что рассматривается конечное множество состояний  $S$ , включающее подмножество работоспособных  $S_p$  и подмножество неработоспособных  $S_n$  состояний.

2. Диагностирование объекта предполагает анализ всего множества  $S$ , если отсутствует информация о состоянии объекта, или подмножества  $S_p$  ( $S_n$ ), если такая информация имеется.

3. В неработоспособном объекте дефект имеется всегда, в работоспособном объекте дефекты могут быть, если имеется избыточность (например, резервирование).

4. В процессе диагностирования в общем случае участвуют объект диагностирования (ОД), средства технического диагностирования (СТД) и человек-оператор (ЧО), которые образуют систему диагностирования (СД).

#### 7. Охарактеризуйте метод диагностирования изоляции на основе инфракрасного излучения.

Применительно к изоляции линий, находящихся под напряжением, диэлектрические потери в изоляторах создают температурные

перепады между изолятором, окружающей средой и изоляторами в гирлянде при наличии дефектных изоляторов. Максимум теплового излучения изоляторов занимает полосу спектра электромагнитных колебаний от 9 до 13 мкм, т. е. находится в средневолновой области инфракрасного диапазона.

Оценив тепловое равновесие при рассеивании энергии в окружающую среду изолятором во время нагрева его диэлектрическими потерями и токами утечки, можно рассчитать температуру перегрева каждого изолятора для гирлянд, без дефектных изоляторов при нормальном распределении напряжения по изоляторам и для гирлянд с одним дефектным изолятором при разном расположении этого изолятора.

Метод предполагает регистрацию теплового (инфракрасного) излучения и последующее сравнение его с нормированными значениями. Для диагностирования тепловизионным методом применяют пирометры и тепловизоры.

#### **8. Определите сущность метода контроля гирлянд изоляторов на основе оптического излучения.**

Физическая сущность метода контроля гирлянд изоляторов с целью определения наличия и количества нулевых изоляторов в гирляндах основана на зависимости силы света поверхностного частичного разряда (ПЧР) на изоляторе от величины напряжения на нем.

Установлено, что ПЧР на всех типах изоляторов возникают прежде всего в кольцевой зоне на границе «цементная армировка — изолирующая деталь». На границе армировки напряженность электрического поля имеет наибольшее значение, так как проводимость цемента достаточно высока и потенциал стержня выносится на край армировки. Кроме того, на границе армировки образуются кольцевые трещины, обусловленные различием температурных коэффициентов цемента и изолирующей детали (фарфор или стекло).

Напряженность поля в трещинах повышена, и поэтому они являются инициаторами разрядов. При росте напряжения на изоляторах сила света ПЧР возрастает как следствие роста разрядов, увеличения их числа и разветвления. При увлажнении изоляции напряжение возникновения ПЧР снижается, а сила света возрастает на 5 порядков по сравнению с нормальными условиями. При увлажнении загрязненной изоляции интенсивность оптического излуче-

ния ПЧР увеличивается еще больше. Поэтому контроль подвесной изоляции желательно проводить в условиях увлажнения изоляции.

Используется прибор «Филин-6М», основу которого составляют фотоэлектронные умножители.

### **9. Охарактеризуйте метод диагностирования изоляторов на основе регистрации частичных разрядов.**

Методами обнаружения частичных разрядов (ЧР) в газовых включениях изоляции могут быть: измерение интенсивности электромагнитных волн, излучаемых непосредственно разрядами (гальванический метод), и регистрация высокочастотных электромагнитных излучений (бесконтактный метод).

Основным источником сигналов является коронный разряд. Коронные разряды развиваются за  $10^{-8} \dots 10^{-7}$  с. Параметры тока: амплитуда около 2,5 мА, среднее время нарастания и спада импульса составляет соответственно 10 и 80 наносекунд.

Измерив падение напряжения  $\Delta U$  и  $C_x$ , определяют кажущийся заряд  $q_{\text{ЧР}}$ :

$$q_{\text{ЧР}} = \Delta U C_x$$

По значению  $\Delta U$  рассчитывают энергию ЧР  $W_{\text{ЧР}}$ :

$$W_{\text{ЧР}} = q_{\text{ЧР}} U_{\text{ЧР}} / \sqrt{2},$$

где  $U_{\text{ЧР}}$  – порог срабатывания счетчика импульсов (СИ) измерительного устройства.

Контактный способ предполагает измерение напряжения и тока при наличии гальванической связи «изолятор – прибор». Бесконтактный способ требует измерения высокочастотных электромагнитных излучений от тока разряда при разрядных процессах путем регистрации возникающего электромагнитного поля.

### **10. Определите метод диагностирования изоляторов на основе регистрации высокочастотных электромагнитных излучений (ВЧЭМИ).**

Внешними проявлениями ВЧЭМИ в изоляции являются импульсы напряжения на объекте и ток переходного процесса в цепи, который распространяется по проводам линий электропередачи на значительные расстояния. Ток разряда не может быть измерен непосредственно, однако вызываемые им быстрые изменения электромагнитного поля могут быть зафиксированы чувствительными приборами.

В основу метода диагностирования изоляции по характеристикам частичных разрядов может быть положено измерение ВЧЭМИ от тока разряда при разрядных процессах. Этот метод позволяет выявить опоры с дефектными изоляторами, генерирующими различные виды разрядов: поверхностные разряды по трещине, разряды в воздушных полостях.

Существует взаимосвязь между состоянием изоляционного элемента и параметрами ВЧЭМИ: средней мощности излучения  $P$ , действующего значения напряженности поля  $E$ , напряжения на линии  $U$  и числа импульсов  $N$ , которые могут служить диагностическими признаками. Сравнивая дефектограммы, полученные по результатам измерений ВЧЭМИ на линиях без дефектов и при наличии дефектных элементов, можно сделать вывод о степени развития дефекта на изоляции ЛЭП.

В измерительных установках, применяемых для регистрации ВЧЭМИ, осуществляется электромагнитная связь измерительного элемента с измеряемым сигналом. Это позволяет проводить измерения разрядов под рабочим напряжением без отключения оборудования, что открывает широкую возможность использования таких установок при измерениях без снятия напряжения.

### **11. Охарактеризуйте метод контроля состояния изоляции трансформатора по частотным характеристикам.**

Увлажнение и старение внутриобмоточной твердой или жидкой изоляции трансформатора вызывает увеличение внутриобмоточных емкостей и приводит к уменьшению собственных частот составляющих обмотки (слоя, катушки) трансформатора и коэффициента передачи.

Значение амплитуды напряжения на разных экстремальных точках также изменяется в зависимости от состояния изоляции. Эти параметры можно использовать как диагностические признаки оценивания состояния внутренней изоляции силовых трансформаторов.

Для определения состояния витковой и слоевой изоляции во внутренних объемах обмотки необходимо, чтобы в процессе диагностирования участвовали емкости витковой  $K$  и слоевой  $C$  изоляции. Это может быть достигнуто подачей тестового сигнала с частотой менее критической.

При равенстве частоты приложенного напряжения  $\omega_{\text{диаг}}$  собственной частоте  $\omega_c$  слоев, катушек или обмотки в них возникает резонанс.

Диагностирование состояния изоляции состоит в периодическом измерении уровней напряжения на выводах обмоток высокого напряжения (ВН) при подключении генератора ВЧ-сигнала к выводам обмотки низкого напряжения (НН) силового трансформатора. Частота высокочастотного сигнала для каждого габарита трансформаторов может быть определена расчетом или экспериментально и равна собственной частоте колебаний высоковольтной обмотки при состоянии изоляции, отвечающей требованиям норм эксплуатации силового трансформатора.

## **12. Определите метод выявления дефектов в изоляции по анализу газов, растворенных в масле.**

В процессе старения изоляция претерпевает ряд физико-химических изменений. При этом выделяются продукты разложения – твердые, жидкие и газообразные вещества. Твердые изоляционные материалы на основе целлюлозы (бумага, картон) при медленном старении выделяют газы, в их числе водород, низкомолекулярные углеводороды, а также окись и двуокись углерода, образующиеся при окислении целлюлозы.

Газовыделение зависит от режима работы объекта, продолжительности использования примененных в нем материалов и ряда других факторов. Продукты разложения материалов накапливаются в изоляционном масле или в надмасляном пространстве оборудования; их можно обнаружить при анализе проб масла.

Анализ газов, растворенных в масле, обеспечивает раннее выявление дефектов. Диагностирование по содержанию растворенных в масле газов включает выявление объектов с дефектами, оценку скорости развития дефектов и определение их характера и опасности. Простейшим методом контроля является определение общего газосодержания масла (объем растворенных в нем газов).

В практике энергосистем применяется газоадсорбционная хроматография, основанная на разделении анализируемой смеси при помощи различных адсорбентов – пористых веществ с сильно развитой поверхностью. Процесс газовой хроматографии состоит из двух этапов: разделения анализируемой смеси на компоненты (ка-



ческий анализ) и определения их концентраций (количественный анализ).

По результатам анализа газов строят хроматограммы. Последовательность (время) вывода из разделительной колонки конкретных газов известна для данных условий анализа. Это дает информацию о составе анализируемой смеси. Для получения количественных показателей определяется площадь пиков хроматограммы, которая на основании данных калибровки приводится к значениям концентрации соответствующих газов.

## Библиографический список

1. Калявин, В.П. Надежность и диагностика элементов электроустановок : учеб. пособие / В.П. Калявин, Л.М. Рыбаков. – СПб. : Элмор, 2009. – 336 с.
2. Михеев, Г.М. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования / Г.М. Михеев. – М. : Додэка–XXI, 2008. – 304 с. – (Серия «Электротехника и энергетика»).
3. Техническая диагностика, повреждаемость и ресурсы силовых и измерительных трансформаторов и реакторов / В.Г. Гольдштейн, А.Ю. Хренников. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 320 с.
4. Рыбаков, Л.М. Методы и средства обеспечения работоспособности электрических распределительных сетей 10 кВ : научное издание / Л.М. Рыбаков. – М. : Энергоатомиздат, 2004. – 421 с.
5. Баширов, М.Г. Диагностика электрических сетей и электрооборудования промышленных предприятий : учеб. пособие для вузов / М.Г. Баширов, В.Н. Шикунов. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2004. – 220 с.
6. ПУЭ. – 7-е изд. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
7. Давиденко, И.В. Системы диагностирования высоковольтного маслонаполненного силового электрооборудования / И.В. Давиденко, В.Н. Осатов. – Екатеринбург : УГТУ – УПИ, 2003.
8. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В.В. Ключев [и др.] ; под ред. В.В. Ключева. – М. : Машиностроение, 2003. – 636 с.
9. Сви, П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П.М. Сви. – М. : Энергоатомиздат, 1992.