

## Глава первая

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

### 1.1. СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

**Основные понятия.** Надежность оборудования определяется его конструкцией и качеством изготовления. Однако в ходе эксплуатации из-за процессов старения материалов и внешних воздействий надежность оборудования снижается. Создание электрооборудования, показатели надежности которого за весь период эксплуатации не станут ниже допустимых, – задача достаточно трудная и в значительном числе случаев экономически нецелесообразная. Поэтому в ходе эксплуатации оборудования необходимо проведение работ по поддержанию требуемого технического состояния.

Различают несколько основных видов технического состояния: исправность и неисправность, работоспособность и неработоспособность, правильное и неправильное функционирование. Исправным является объект, полностью отвечающий всем техническим требованиям. Работоспособным является объект, у которого техническим требованиям соответствуют лишь свойства, характеризующие способность выполнения заданных функций. Несоответствие между реальными и требуемыми свойствами объекта является дефектом. При возникновении дефекта исправный объект становится неисправным; при этом возможны два состояния – работоспособное и неработоспособное. Переход в работоспособное состояние называется повреждением; переход в неработоспособное – отказом.

В условиях эксплуатации необходимо обеспечивать как минимум работоспособное состояние. Это возлагается на систему технического обслуживания (ТО) и ремонтов. Основное содержание ТО – контроль за состоянием оборудования и собственно обслуживание, т. е. поддержание исправности или работоспособности (чистка, смазка, регулировка и т. п.). Задача ремонта – восстановление исправности или работоспособности.

Исследование технического состояния оборудования является предметом технической диагностики, цель которой – изучение про-

явлений (признаков) различных технических состояний, разработка методов их определения, а также принципов построения и использования систем диагностирования.

Методами диагностики производится разбиение (классификация) всей совокупности объектов на группы в соответствии с принятыми градациями состояния. Для рассматриваемых объектов установить один обобщенный показатель состояния нельзя. Поэтому основной задачей диагностирования является своевременное обнаружение и поиск дефектов, т. е. определение их наличия, характера и местонахождения. Это производится путем соответствующих испытаний (элементарных проверок).

Алгоритм (правила) диагностирования, определяющий объем, последовательность и взаимосвязь испытаний объекта, устанавливается исходя из его диагностической модели. Модель строится на основании изучения конструкции оборудования данного типа и опыта его эксплуатации. При этом классифицируются выявленные и возможные дефекты, устанавливаются наблюдаемые признаки их появления и методы выявления этих признаков. Признаки дефектов, как правило, проявляются в изменениях наблюдаемых параметров (характеристик) объекта. Поэтому необходимо установление диагностических параметров и их количественной или качественной связи с наличием и степенью развития дефекта.

Значения диагностических параметров, определенные при испытаниях, характеризуют техническое состояние объекта в данный момент времени. Для отнесения объекта к соответствующей группе состояний необходимо установить предельные значения параметров; эти значения и являются признаками дефекта. При периодическом контроле необходимо также учитывать скорость развития дефекта, чтобы неработоспособное состояние не наступило ранее следующего контроля. Поэтому браковочное значение параметра обычно ниже предельного, устанавливаемого как граница работоспособного состояния объекта.

Диагностирование может быть функциональным (на объект поступают только рабочие воздействия) и тестовым (при подаче специальных воздействий). Соответственно строятся и средства диагностирования: для функционального диагностирования это в основном измерительные устройства; для тестового диагностирования, кроме того, необходим источник тестовых воздействий.

**Системы контроля.** Эксплуатационный контроль оборудования является системой определения его технического состояния. На основании полученных при контроле данных принимается решение о

допустимости дальнейшей эксплуатации оборудования или о необходимости и объеме ремонта. Система эксплуатационного контроля должна обеспечить выявление и идентификацию дефектов (собственно диагностирование), а также прогнозирование их развития.

Необходимый объем испытаний определяется исходя из конструкции оборудования и возможных его дефектов. Как правило, основным при этом является опыт эксплуатации. Периодичность контроля определяется скоростью развития дефектов, устанавливаемой рядом повторяемых испытаний или на основании других данных. Основным при принятии решения о дальнейшей эксплуатации объекта являются результаты диагностирования и прогнозирования, ибо при этом выявляются характер дефекта и опасность его развития.

В дальнейшем терминном контроль будем определять всю совокупность процедур, необходимых для принятия решения по обеспечению нормальной эксплуатации оборудования.

В наибольшей степени перечисленным требованиям соответствует контроль по прогнозирующему параметру. Предполагается, что имеется наблюдаемый параметр объекта, который прогнозирует его отказ, т. е. между вероятностью наступления отказа в определенном интервале времени после момента контроля и значением параметра имеется стохастическая связь. Достоверность прогнозирования зависит от того, насколько тесна эта связь.

Создание системы контроля оборудования, основанной на прогнозе надежности, возможно лишь в случае, если для каждого вида оборудования будут выявлены прогнозирующие параметры, определены их предельно допустимые значения и разработаны методы их измерения в условиях эксплуатации. Пока таких данных еще нет.

Первые партии вводов 500 кВ из-за неудачной конструкции и недостатков технологии имели высокую повреждаемость; в основном наблюдались тепловые пробои [1]. Такой характер развития дефекта связан с ростом диэлектрических потерь; диагностический параметр —  $\operatorname{tg} \delta$  изоляции. Можно предположить, что  $\operatorname{tg} \delta$  является прогнозирующим параметром. Корреляционная связь между значением  $\operatorname{tg} \delta$  и остаточным сроком службы ввода оказалась достаточно тесной [2], что определило высокую эффективность контроля. Повреждаемость вводов после отбраковки по результатам испытаний существенно уменьшилась (рис. 1.1). Показатель эффективности контроля, определенный как отношение средних значений эмпирических плотностей распределения отказов до и после отбраковки,  $\eta \approx 4$ .

Для вводов 110 кВ использовать в качестве прогнозирующего только параметр  $\operatorname{tg} \delta$  нельзя; корреляционная связь его значения со сроком службы недостаточна, что подтверждается и уменьшением показателя эффективности контроля ( $\eta \approx 2$ ). В этом случае для диагностирования необходимо использование также и других параметров.

Диагностирование дает данные о состоянии объекта в момент контроля, т. е. дает точечную оценку. Для прогнозирования необходимо

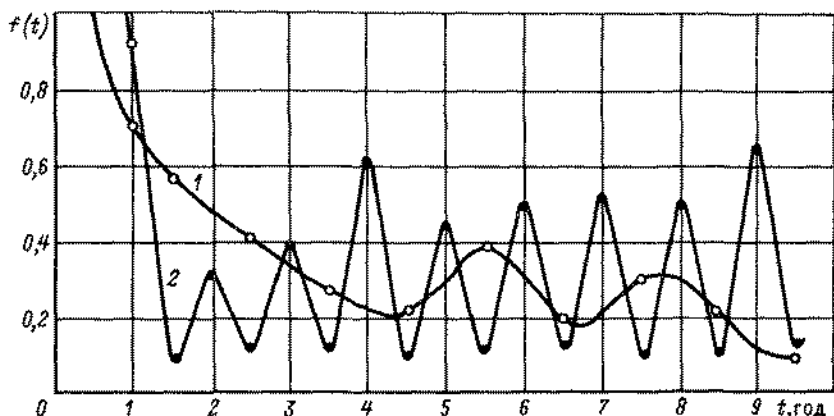


Рис. 1.1. Эмпирическая плотность распределения отказов вводов [2]:  
 1 — вводы 110 кВ ( $f \cdot 10^{-3}$ ); 2 — вводы 500 кВ ( $f \cdot 10^{-2}$ )

знание процесса изменения технических характеристик. Проводя диагностирование достаточно часто или используя данные за длительный период, можно накопить сведения, необходимые для оценки хода и тенденций изменения параметров объекта, и при осторожной их экстраполяции получить информацию для прогнозирования. Это и используется в практике эксплуатационного контроля, так как заключение о техническом состоянии оборудования всегда делается не только по значениям контролируемых параметров, но и с учетом характера их изменения.

Достоверность оценки надежности оборудования по результатам диагностирования не всегда достаточна. Для некоторых видов оборудования пределы значений диагностических параметров, характеризующие зону работоспособности, с достаточной достоверностью не установлены. Отказ современного мощного оборудования часто сопряжен с большими экономическими потерями. Поэтому реально реализуемая система эксплуатационного обслуживания оборудования высших классов напряжения ориентирована на поддержание практически неизменного технического состояния, хотя это требует повышенных трудозатрат и не является экономически оптимальным. При этом ТО и ремонты проводятся в заданные сроки независимо от их реальной необходимости.

Соответственно построена система контроля: с жестко регламентированным объемом и периодичностью испытаний и узкими допусками на изменение значений параметров. Кроме того, традиционная система контроля не включает в себя ряд новых методов диагностики, позволяющих обнаружить дефекты, ранее не выявляемые.

Переход к новой стратегии технического обслуживания оборудования – по его состоянию – требует значительного повышения эффективности контроля. На систему диагностики при этом возлагается еще одна задача – определение необходимости отключения объекта. Следовательно, современная система диагностики должна в первую очередь быть системой раннего выявления развивающихся дефектов.

Для создания эффективной системы эксплуатационного контроля электрооборудования необходимо:

- обобщить и проанализировать опыт эксплуатации, выявить дефекты, приводящие к отказам, причины их возникновения и ход развития;

- определить наблюдаемые характеристики (параметры) оборудования, изменение которых связано с возникновением и развитием дефектов;

- выявить связи между значениями параметров и техническим состоянием оборудования; установить предельные значения параметров, характеризующие переход объекта в другой класс технических состояний;

- разработать методы измерения этих параметров в условиях эксплуатации, выявить источники помех, определить реально выявляемые изменения параметров (чувствительность метода измерения);

- исходя из взаимосвязи изменений совокупности наблюдаемых параметров и технического состояния оборудования, определить объем и периодичность испытаний, а также их последовательность (алгоритм контроля);

- установить критерии браковки, учитывающие всю совокупность наблюдаемых изменений технического состояния, оценку их тенденций и условий эксплуатации.

Повреждения по характеру их развития можно разбить на следующие основные группы:

- повреждения, при которых переход из исправного (работоспособного) состояния в неработоспособное (отказ) происходит очень быстро (мгновенный отказ);

- локальные повреждения (дефекты), которые развиваются до отказа в течение нескольких суток или месяцев;

- повреждения (дефекты) с длительным периодом развития до нескольких лет, которые можно рассматривать как процесс ускоренного старения.

В первом случае контроль с целью выявления дефектов невозможен. Это область действия защиты сети от развития повреждений.

При быстро развивающихся локальных дефектах необходимы автоматизированные системы диагностики, обеспечивающие непрерывный или достаточно частый контроль. В третьем случае достаточен периодический контроль.

**Контроль оборудования без отключения.** Большинство методов контроля оборудования без вывода его из работы, под напряжением развито сравнительно недавно. Не все они широко применяются в системе диагностики, хотя уже ясно, что использование таких методов существенно повышает эффективность контроля и открывает возможность его автоматизации. Кроме того, снижаются трудозатраты на проведение испытаний и улучшаются условия труда персонала.

Контроль оборудования без отключения можно вести, проводя анализы периодически отбираемых проб, а также измеряя характеристики объекта в процессе его функционирования. Развитие получили методы измерений характеристик изоляции оборудования при рабочем напряжении на нем, а также контроль проб изоляционного масла.

Повышение эффективности контроля обеспечивается за счет увеличения частоты испытаний, так как при этом повышается вероятность своевременного обнаружения дефектов, а также появляется возможность выявления зависимостей наблюдаемых параметров от времени, температуры и т. п., которые обладают большей информативностью по сравнению с точечными оценками. Кроме того, используется ряд эксплуатационных факторов, позволяющих повысить чувствительность методов контроля (например, обнаружение увлажнения изоляции путем измерений при повышенной температуре, выявление частичных разрядов при рабочем напряжении и т. п.).

Снижение трудоемкости контроля обеспечивается применением стационарных схем измерений и отсутствием необходимости в подготовке объекта к испытаниям. Улучшение условий труда определяется снижением объема работ, проводимых в зоне высокого напряжения на месте установки оборудования, а также безопасностью стационарных измерительных систем.

Автоматизация измерений и анализов обеспечивает не только снижение объема работ персонала и возможность непрерывного контроля. Принципиальным отличием такой системы контроля является возможность передачи соответствующему устройству значительной части функций собственно диагностики, т. е. функций идентификации дефектов и оценки технического состояния объекта. Такими возможностями обладают диагностические системы на базе ЭВМ. Эти системы могут проводить измерения и математическую обработку полученных данных с целью снижения помех, анализ результатов измерений

и сравнение их с нормами. При необходимости автоматическая система диагностики меняет тактику (алгоритм) контроля (периодичность измерений, способ оценки их результатов) и выдает оператору сообщение вместе с протоколом, содержащим данные для принятия решений по эксплуатации данного объекта.

Возможны два способа организации контроля оборудования под напряжением:

ранняя диагностика, т. е. выявление признаков ухудшения технического состояния, вызывающих изменения значений контролируемых параметров;

сигнализация предельных состояний, т. е. выявление признаков ухудшения технического состояния, являющихся опасными с точки зрения надежности оборудования.

Оба способа взаимно дополняют друг друга, обеспечивая возможность выявления тенденций и скорости изменения диагностических параметров, а также своевременное получение сигнала об опасности отказа оборудования. Это позволяет лучше планировать ремонты оборудования и при необходимости производить срочное отключение объектов, находящихся в предаварийном состоянии.

## 1.2. ДОСТОВЕРНОСТЬ КОНТРОЛЯ

**Ошибки контроля.** Целью контроля в общем случае является определение технического состояния объекта и прогноз его изменения, а также выявление дефектов и определение их характера. В результате должна быть установлена возможность дальнейшей эксплуатации объекта или необходимость его ремонта (восстановления).

Ошибки контроля связаны с достоверностью метода диагностики и ошибками испытаний (измерений).

Применяемые методы диагностики не обеспечивают полной достоверности оценки состояния объекта. Результаты измерений включают в себя ошибки, определяемые погрешностями приборов и влиянием помех. Поэтому всегда существует вероятность получения ложного результата контроля:

исправный объект будет признан негодным (ложный дефект или ошибка первого рода);

неисправный объект будет признан годным (необнаруженный дефект или ошибка второго рода).

Графически формирование результата при таком контроле показано на рис. 1.2, где заштрихованные площади соответствуют вероятностям получения недостоверных результатов (ошибок первого и второго рода).

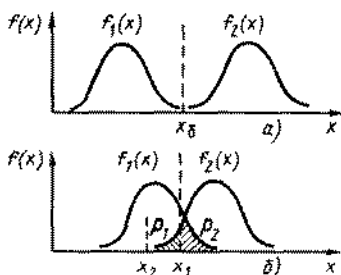
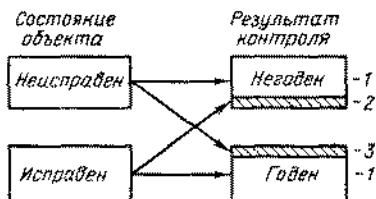


Рис. 1.2. Формирование результата при двухальтернативном контроле:

1 — достоверный результат; 2 — ошибка первого рода (ложный дефект); 3 — ошибка второго рода (необнаруженный дефект)

Рис. 1.3. Возникновение ошибки из-за несовершенства метода контроля

Ошибки контроля приводят к различным последствиям: если ошибки первого рода (ложный дефект) только увеличивают объем восстановительных работ, то ошибки второго рода (необнаруженный дефект) влекут за собой аварийное повреждение оборудования.

Достоверность метода диагностики определяется степенью связи технического состояния объекта с отображающими его параметрами. Как правило, эта связь — вероятностная (стохастическая). Кроме того, существует неоднозначность связи значений контролируемых параметров с состоянием объекта при различных видах дефектов. Все это создает ошибки диагностирования, связанные с несовершенством методов контроля.

На рис. 1.3 в качестве примера приведены распределения плотности вероятностей значения некоторого параметра  $x$  для двух совокупностей объектов одного вида: не имеющих дефектов  $f_1(x)$  и с дефектами  $f_2(x)$ . Предполагается, что параметр  $x$  является прогнозирующим, т. е. имеется достаточно выраженная связь между его значением и вероятностью отказа объекта. В идеальном случае (рис. 1.3, а) по значению параметра  $x$  возможна однозначная классификация объектов (годен или негоден), соответствующая их состоянию (исправен или неисправен). Действительные распределения значений параметра  $x$  для обеих совокупностей объектов имеют общую зону (рис. 1.3, б). При этом возникают ошибки из-за несовершенства метода диагностики. Для браковочного значения параметра  $x_0 = x_1$  вероятность того, что дефект не будет обнаружен, соответствует площади заштрихованного участка  $P_1$ , а вероятность браковки объектов без дефекта — площади участка  $P_2$ . В этом случае вероятности появления ошибок первого и второго рода взаимосвязаны. Уменьшение числа обнаруженных дефектов обеспечивается снижением браковочной нормы до  $x_2$ , но при этом существенно возрастает ложная браковка.

Повысить достоверность диагноза можно, используя для контроля несколько параметров, характеризующих техническое состояние объекта. Каждый из этих параметров дает информацию об определенной характеристике объекта. Их совокупность обеспечивает повыше-



ние вероятности выявления дефектов и возможность более точной оценки их опасности.

Следует указать еще на один источник ошибок диагностирования – использование измеренных значений контролируемых параметров без приведения их к нормальным условиям.

Результаты измерений зависят от условий контроля. Так, например, существует зависимость характеристик изоляции от ее температуры. Температура контакта существенно зависит от значения протекающего тока, а результат измерения, кроме того, и от состояния поверхности. Поэтому для целей диагностирования необходимо результаты измерений привести к одинаковым базовым условиям, к сопоставимому виду.

Эти условия обычно указываются при устаивовлении браковочных нормативов, а в методике измерений должны быть предусмотрены способы приведения результатов к сопоставимому виду (температурный пересчет и т. п.).

Погрешность измерения есть следствие ограниченной точности измерительных устройств (средств измерения), а также погрешностей, вызванных влиянием внешних факторов.

Средство измерений (СИ) обычно состоит из ряда измерительных преобразователей и отсчетного устройства. В ходе преобразований информации возникает погрешность измерения: действительному значению измеряемой величины на входе  $x$  соответствует показание отсчетного устройства на выходе  $y$ .

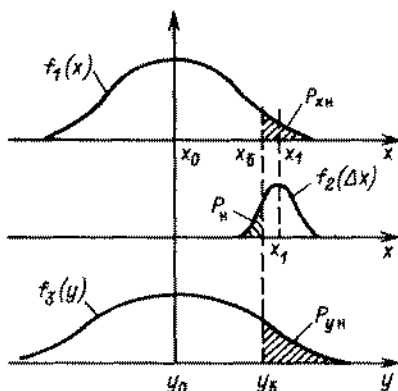
Погрешность измерения (абсолютное ее значение  $\Delta = y - x$  или относительное  $\delta = \Delta/x$ ) имеет две составляющие – систематическую и случайную. Первая вызывается стабильными причинами и ее можно учесть. Вторая составляющая погрешности вызывается нестабильными факторами и имеет вероятностный характер. В дальнейшем, если это специально не оговаривается, будем учитывать лишь вторую составляющую погрешности, рассматривая ее как случайную величину.

В качестве примера влияния погрешностей измерения на достоверность контроля рассмотрим рис. 1.4, где приведено распределение  $f_1(x)$ , включающее в себя параметр  $x$  всех объектов данного типа (с дефектами и с исправной изоляцией). Контролируется объект со значением параметра  $x_1$ , которое превышает браковочный норматив  $x_0$ , т. е. объект исправен и должен быть отнесен к числу годных. Измерение производится с погрешностью, имеющей распределение  $f_2(\Delta x)$ . Поэтому вместо значения параметра  $x$  с нормой будет сравниваться результат измерения  $y$ .

Неисправными считаются объекты, параметр которых  $x$  находится в зоне  $P_{\text{дн}}$ , а по результатам контроля годными будут признаны объекты, значения измеряемого параметра  $y$  которых находятся в зоне  $P_{\text{ук}}$ . Дефект не будет обнаружен, если измеренное значение  $y$  будет меньше браковочного  $y_0 = x_0$ . На рис. 1.4 вероятность  $P_{\text{н}}$  этого события соответствует заштрихованной области под кривой  $f_2(\Delta x)$ .

Рис. 1.4. Возникновение ошибки из-за погрешностей измерений:

$f_1(x)$  — распределение плотности вероятностей значений измеряемого параметра  $x$ ;  $f_2(\Delta x)$  — распределение плотности вероятностей погрешностей измерения для значения параметра  $x_1$ ;  $f_3(y)$  — распределение плотности вероятностей результатов измерений



Для уменьшения вероятности того, что дефект не будет обнаружен, необходимо увеличивать точность измерения. Однако в тех случаях, когда определяющими становятся погрешность метода или внешние влияния (помехи), высокая точность измерительных устройств не повышает эффективность контроля и лишь усложняет процесс измерений. Считается достаточным, если среднее квадратическое отклонение результатов измерения из-за погрешности СИ  $s_y$  не будет превышать одной десятой среднего квадратического отклонения  $s_x$  совокупности контролируемых значений параметра.

Ежегодная отбраковка оборудования из-за ухудшения изоляции по определяющему параметру не превышает обычно 1%, т. е. около 99% значений  $x$  оказывается ниже браковочного норматива  $x_6$ . Исходя из этого оценим в первом приближении необходимую точность эксплуатационных измерений.

Для обычно принимаемого в таких случаях нормального закона распределения 99% значений  $x$  соответствуют значению  $x_6 = 2,33 s_x$ , откуда  $s_y = 0,1 s_x = 4,3 \cdot 10^{-2} x_6$ . Следовательно, достаточная точность в рассматриваемых условиях будет достигнута, если среднее квадратическое отклонение результата измерения в области браковочных значений параметра не будет превышать 4% этого значения. Ориентировочно считают, что наибольшее значение основной погрешности измерительного прибора равно удвоенному среднему квадратическому отклонению результатов измерений. При таком допущении относительная погрешность эксплуатационных измерений контролируемых параметров не должна превышать 8%.

Иногда заводы-изготовители требуют, чтобы значение контролируемого параметра, измеренное при монтаже объекта, было близко к результатам заводского контроля. В этом случае необходима высокая точность измерений, не всегда обеспечиваемая в полевых условиях.

Так, например, при измерении малых значений  $\text{tg } \delta$  изоляции мостом P5026 нормированное значение допускаемой погрешности  $\Delta_{\text{нб}} = \Delta \text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-3}$ . Обычно для изоляции без дефектов  $\text{tg } \delta \approx 5 \cdot 10^{-3}$ . Только за счет погрешности моста возможен результат измерения  $\text{tg } \delta_{\text{из}} = \Delta \text{tg } \delta + \text{tg } \delta_0 = 1,6 \text{ tg } \delta_0$ . Поэтому значимым для контроля следу-

ет считать лишь результат, превышающий заводские данные более чем на 60%. При более жестких браковочных требованиях будут недопустимо велики ошибки контроля.

Существует еще одна возможность ошибок контроля, вызванных ошибками измерения. При эксплуатационном контроле оборудования важно обнаружить изменение контролируемого параметра. Поэтому существенно, чтобы относительная погрешность измерения не выходила из допустимых пределов. В СИ со стрелочным прибором в качестве отсчетного устройства нормируется приведенная погрешность измерения:  $\delta_{н.п} = \Delta / x_n$ , где  $x_n$  – нормирующее значение измеряемой величины, обычно верхний предел шкалы прибора. Относительная погрешность измерения в таких СИ существенно зависит от значения измеряемой величины, ибо  $\delta / \delta_{н.п} = x_n / x$ .

Поэтому даже при достаточно малой нормированной приведенной погрешности СИ надо проверить относительную погрешность; в начале шкалы она будет в десятки раз больше.

**Чувствительность метода измерения.** В эксплуатационной практике точность измерения и определяемая ею чувствительность метода, как правило, ограничивается погрешностями из-за влияния внешних факторов – помех. Возможность влияния таких факторов не всегда даже учитывается при конструировании измерительных устройств.

Помехи специфичны для каждого вида измерений и поэтому рассмотрение способов снижения погрешностей возможно лишь в соответствующих главах книги. Здесь изложим только общие вопросы. Различают помехи, вызванные паразитными токами в схеме измерений и токами влияния.

Паразитными называются токи, возникающие под действием напряжения измерительной установки и протекающие через ее измерительный элемент, минуя объект измерения. Эти токи протекают по так называемым паразитным связям между источником напряжения измерительной установки и элементами измерительного устройства (средства измерения), а также по паразитным связям в измерительном устройстве и в объекте.

Токами влияния называются токи, возникающие под действием рабочего напряжения электрической установки, в которой находится контролируемый объект, и протекающие через измерительный элемент измерительного устройства. К ним относятся токи промышленной частоты и ее гармоник, протекающие по электрическим и электромагнитным связям между элементами измерительной установки (включая объект) и оборудованием, находящимся под рабочим напряжением. Кроме того, токи влияния возникают в измерительной

установке при наличии разности потенциалов между точками заземления ее элементов.

Известны два направления обеспечения необходимой точности измерений в условиях помех: применение помехоустойчивых измерительных устройств (СИ) и создание схем измерений, обеспечивающих их защиту от влияния помех. Помехоустойчивость СИ определяется их конструкцией. Основные возможности снижения погрешностей – в повышении помехозащищенности схем измерений.

Повышение помехозащищенности заключается в обеспечении на входе СИ наибольшего возможного относительного уровня сигнала информации (увеличение отношения сигнал/помеха). Это достигается соответствующей схемой измерений и экранированием – отведением из измерительных цепей токов помех. Возможна также селекция сигнала, например измерение его на частоте, отличающейся от частоты напряжения помехи (частотная селекция), или в периоды времени, когда помеха минимальна (временная селекция). Однако в этих случаях необходимы соответствующие измерительные устройства.

Другая группа способов основана на исключении погрешности из результатов измерений. Это обеспечивается соответствующей методикой производства измерений и обработки их результатов. В тех случаях, когда имеется возможность накопления достаточного массива информации (например, при автоматизации контроля) снижение погрешности измерения от помех, имеющих случайный характер, производится путем математической обработки результатов измерений. Известно достаточное количество методов статистической обработки данных (усреднение, корреляционный анализ и т. п.), обеспечивающих повышение достоверности измерений.

Чувствительность метода измерения – это наименьшее выявляемое изменение параметра, которое может служить для суждения об изменении характеристик объекта. В простейшем случае задача определения чувствительности сводится к установлению порогового значения параметра  $x_n$ , при котором вероятность ошибок контроля первого рода (ложная браковка) не будет превышать заданного допустимого предела.

Погрешности измерений при эксплуатационном контроле определяются в основном остаточным уровнем внешних помех. Следовательно, для определения порога чувствительности метода измерений необходимо установить закон распределения погрешностей измерения и, используя его, вычислить значение  $x_n$ , соответствующее допустимой вероятности ошибки первого рода.

Как правило, закон распределения случайных помех близок к нормальному. Если принять, что вероятность ошибки не должна превышать 1 %, значение  $x_{\Pi} = 2,33 s_{\Pi}$ , где  $s_{\Pi}$  – среднее квадратическое отклонение результатов измерений помех. При  $x_{\Pi} = 3 s_{\Pi}$  вероятность ложной браковки снижается до 0,135 %.

Описанная процедура определения порога чувствительности метода измерений дает лишь грубую оценку, так как реальное распределение результатов измерения помех в области крайних членов распределения обычно отличается от нормального. Однако, как правило, полученная оценка порога чувствительности достаточна для практических целей. При необходимости более осторожного прогноза необходимо рассматривать специально распределение крайних (наибольших) членов выборки.

### 1.3. ДЕФЕКТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

К оборудованию, рассматриваемому в книге, относятся силовые трансформаторы (включая автотрансформаторы и реакторы), коммутационные аппараты (выключатели, разъединители), измерительные трансформаторы тока и напряжения, ограничители перенапряжений.

Перечисленные объекты существенно различаются своими функциями, условиями применения, видом эксплуатационных воздействий и характером типовых дефектов (табл. 1.1). Это определило большое разнообразие применяемых методов и средств диагностики.

Надежность оборудования высокого напряжения в значительной мере определяется работоспособностью изоляции. Основной объем диагностики относится к контролю изоляционных конструкций.

Старение диэлектрика – постепенное его изменение, сопровождающееся ухудшением или полной потерей изоляционных свойств – вызывается рядом процессов, связанных с химическими, тепловыми, механическими и электрическими воздействиями. Эти процессы действуют одновременно и взаимосвязаны; каждый из них может вызвать появление другого.

К химическим процессам ухудшения органических изоляционных материалов относятся окисление и другие химические реакции с агрессивными компонентами окружающей среды, которым благоприятствуют наличие влаги и повышенная температура. Под воздействием нагрева, вызванного внешними причинами и диэлектрическими потерями, возникает износ, сопровождаемый распадом вещества, появлением хрупкости материала, снижением его электрической прочности.

Таблица 1.1. Основные причины повреждений оборудования высокого напряжения

Вид оборудования	Элементы конструкций	Причины повреждений
Трансформаторы, автотрансформаторы, шунтирующие реакторы	Изоляция	Увлажнение, термическое и электрическое разрушение (включая частичные разряды); изменение физико-химических свойств, насыщение газами и загрязнение масла
	Обмотки и магнито-провод	Динамическая неустойчивость при токах короткого замыкания, перегревы, нарушение изоляции элементов (короткозамкнутые контуры)
	Устройства регулирования напряжения	Перегревы, отказы функционирования
Выключатели и разъединители	Контактная система и ее привод	Перегревы, отказы функционирования (разрегулировка)
	Изоляция	Увлажнение, пробой элементов, изменение характеристик масла (для маслонаполненных конструкций), частичные разряды (для КРУЭ)
Вводы и измерительные трансформаторы	Изоляция	Увлажнение, термическое и электрическое разрушение (включая частичные разряды), изменение физико-химических свойств, насыщение газами и загрязнение масла
	Обмотки и магнито-провод	Изменение характеристик, перегревы (в основном из-за витковых замыканий)
Ограничители перенапряжений, разрядники	Шунтирующие и рабочие элементы	Износ, увлажнение
	Искровые промежутки	Изменение разрядных напряжений

Примечание. Внешняя изоляция и механические повреждения элементов конструкции не рассматриваются.

К основным явлениям старения, обусловленного причинами электрического характера, относятся физические и химические изменения органических изоляционных материалов, вызванные ионизационными процессами (частичными разрядами).

Механические воздействия, вызывая нарушения целостности материала (разрывы, расслоения), снижают электрическую прочность изоляционной конструкции.

Изоляционное масло, являясь одним из элементов изоляционной конструкции, выполняет еще роль теплоотводящей и защитной среды. При старении масло окисляется, что приводит к образованию органических кислот, растворимых в масле или создающих осадки

(шлам). Увлажнение снижает его электрическую прочность. Термические воздействия приводят к крекингу.

Старение масла приводит к снижению надежности всей изоляционной конструкции, так как повышенная кислотность способствует старению твердой изоляции, а осаждение шлама увеличивает диэлектрические потери и ухудшает отвод тепла. Влага из масла, переходя в твердый диэлектрик, усиливает в нем процессы разрушения. Наличие в масле пузырьков газа способствует развитию частичных разрядов.

Конечным результатом воздействия перечисленных факторов на изоляционную конструкцию является изменение структуры диэлектриков, их свойств, появление повреждений (дефектов).

К наиболее часто встречающимся причинам повреждения внутренней изоляции оборудования высокого напряжения относятся увлажнение и частичные разряды [3].

Характер последующего развития дефекта при увлажнении изоляции может быть разным: снижение электрической прочности с последующим пробоем, возникновение частичных разрядов, разрушающих твердую изоляцию, тепловой пробой из-за увеличения диэлектрических потерь, перекрытие вследствие перераспределения напряжений и т. п.

Возникновение частичных разрядов не обязательно связано с увлажнением; достаточно наличие местного увеличения напряженности электрического поля. В условиях эксплуатации одной из причин, вызывающих частичные разряды, является появление в толще изоляции газовых пузырей из-за плохой вакуумировки масла, наличие местных перегревов, вызывающих его разложение, и т. п.

Другая группа причин ухудшения органической изоляции связана с тепловыми воздействиями. Процесс разрушения существенно ускоряется при наличии увлажнения. Перегревы изоляции приводят к резкому снижению ее механической прочности, что создает условия для развития повреждений.

В настоящее время нет эксплуатационно пригодных прямых методов определения влажности и степени старения твердой изоляции. Как правило, применяются косвенные методы контроля. Для этого используется ряд параметров изоляции, значения которых определяют процессы, происходящие в диэлектриках: поляризация, абсорбция, ионизация, проводимость. Для диагностирования используются также зависимости их от температуры, приложенного напряжения, времени и т. п. Значительное количество дефектов выявляется по изменению физико-химических свойств изоляционного масла и наличие в нем продуктов разложения материалов конструкции.

**Таблица 1.2. Контролируемые явления и диагностические параметры изоляционных конструкций**

Контролируемое явление	Диагностический параметр
Изменение диэлектрических характеристик	Ток через изоляцию, комплексная проводимость изоляции, диэлектрические потери, емкость
Возникновение частичных разрядов	Импульс напряжения на объекте, ток переходного процесса, импульс давления
Изменение распределения напряжения	Разность потенциалов между элементами, потенциал относительно земли, интенсивность поверхностных разрядов
Изменение физико-химических характеристик изоляционного масла	Электрическая прочность, диэлектрические потери, прозрачность (цвет), содержание механических примесей, температура вспышки, содержание водорастворимых кислот и щелочей, кислотное число, газосодержание, влагосодержание
Образование продуктов разложения изоляции	Горючесть газов в газовом реле (в газовой подушке), состав газов в газовом реле (в газовой подушке), горючесть газов, растворенных в масле, и состав газов, растворенных в масле

**Таблица 1.3. Основные методы диагностирования и выявляемые дефекты силовых и измерительных трансформаторов**

Метод диагностирования	Выявляемые дефекты
Измерение сопротивления изоляции	Сильное увлажнение, загрязнение
Измерение комплексной проводимости, диэлектрических потерь и емкости изоляции	Увлажнение, местное разрушение разрядами, ухудшение характеристик масла
Измерение абсорбционных характеристик изоляции	Увлажнение
Определение физико-химических характеристик масла	Увлажнение, старение, перегрев, загрязнение, термическое разложение материалов
Анализ газов, растворенных в масле	Термическое и электрическое разрушение элементов конструкции
Измерение частичных разрядов	Местные дефекты (включения), изменение распределения напряжения по конструкции, электрическое разрушение
Измерение сопротивления постоянному току токоведущих частей	Повреждения соединений токоведущих элементов и переключателей устройств регулирования напряжения
Измерение потерь холостого хода	Нарушения изоляции элементов магнитопровода
Измерение напряжения короткого замыкания	Деформации обмоток
Измерение частотных характеристик обмоток	Деформации обмоток



**Таблица 1.4.. Основные методы диагностирования и выявляемые дефекты коммутационных аппаратов**

Метод диагностирования	Выявляемые дефекты
Измерение сопротивления постоянно-му току	Ослабление контактного давления, повреждение или загрязнение контактных поверхностей, ослабление болтовой затяжки соединений токоведущих частей Повреждения активных лепестков напряжения дугогасящих устройств Повреждения обмоток электромагнитов управления
Измерение тока и напряжения срабатывания механических приводов	Повышенное трение в узлах объекта, разрегулировка
Измерение скоростных характеристик масляных выключателей	Разрегулировка контактной системы и повышенное трение
Определение временных характеристик работы контактной системы воздушных выключателей	Разрегулировка контактной системы, повышенное трение, поломка пружин
Измерение сопротивления изоляции и ее диэлектрических характеристик	Загрязнение, увлажнение, ухудшение свойств изоляционного масла
Измерение температуры токоведущих частей	Перегревы токоведущих частей

Основные контролируемые явления в изоляции и соответствующие им диагностические параметры приведены в табл. 1.2.

К другой группе нарушений работоспособности оборудования относятся отказы функционирования, а также недопустимые нагревы токоведущих частей.

Отказы функционирования, вызванные механическими дефектами элементов конструкции, характерны для коммутационных аппаратов (выключателей, отделителей, разъединителей и т. п.), а также для устройств регулирования напряжения силовых трансформаторов.

Основным способом оценки работоспособности и выявления дефектов коммутационных аппаратов является комплексное опробование, при котором производятся проверки и измерения, характеризующие готовность оборудования к нормальной работе.

При опробовании выключателя производятся измерения времени включения и отключения, а также разновременности замыкания и размыкания контактов, проверка работы приводов (напряжение срабатывания электромагнитов, работоспособность при нижнем пределе давления воздуха и т. п.). О правильной регулировке и функционировании узлов судят по осциллограмме выполнения рабочих циклов.

Ненормально высокие нагревы токоведущих частей обычно являются следствием дефектов контактных соединений и обнаруживаются путем контроля их температуры.

Разработано значительное количество методов диагностирования, ориентированных на выявление определенных дефектов (табл. 1.3 и 1.4)\*. Некоторые методы дополняют или даже дублируют друг друга. Для более полного диагностирования целесообразно использование всех возможных методов. При этом совпадение результатов, полученных разными методами, позволяет более уверенно идентифицировать дефект.

## Глава вторая

### ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

#### 2.1. КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Рассматриваются характеристики изоляционных конструкций, определяемые процессами в диэлектриках – проводимостью и поляризацией [4–6].

Электропроводность технических диэлектриков определяется наличием в них свободных ионов и характеризуется удельным объемным сопротивлением  $\rho_v$ . При приложении к изоляционной конструкции напряжения через нее протекает ток проводимости. Состояние изоляции характеризуется значением этого тока или обратной ему величиной – сопротивлением изоляции. Процесс поляризации возникает в диэлектрике при помещении его в электрическом поле. При этом на поверхности диэлектрика и в его объеме образуются связанные электрические заряды, изменяющие поле внутри вещества.

Одной из важнейших характеристик изоляции является диэлектрическая проницаемость, которая определяется степенью поляризации диэлектрика. Для изоляционной конструкции вместо диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  удобнее рассматривать пропорциональную ей емкость между электродами  $C$ .

При поляризации происходит перемещение электрических зарядов, на это затрачивается энергия поля. Некоторые процессы поляри-

\* Не рассматриваются методы разрушающих испытаний (например, применением испытательного напряжения), так как они не соответствуют принципам диагностики.