

### 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.

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 магнитопровод	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 магнитопровод	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.

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.

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, наличия 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 наличием в нем продуктов разложения материалов конструкции. 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.

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, перегревы, 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 постоянному току	Ослабление контактного давления, повреждение или загрязнение контактных поверхностей, ослабление болтовой затяжки соединений токоведущих частей
	Повреждения активных делителей 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

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 времен включения и отключения, а также одновременности замыкания 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)<sup>1</sup>. 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.

<sup>1</sup> Не рассматриваются методы разрушающих испытаний (например, приложением испытательного напряжения), так как они не соответствуют принципам диагностики