

2. ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: знакомство с методами и средствами диагностики изоляции высоковольтного трансформатора.

1. Теоретические сведения

В процессе эксплуатации в изоляции электрических аппаратов возникают дефекты (увлажнение, загрязнение, возникновение трещин, воздушных включений и т.д.), постепенно приводящие к необратимому ухудшению свойств и характеристик изоляции, т.е. к старению изоляции.

Старение электрической изоляции может быть разделено на следующие четыре категории:

- Химическое – изменение химических свойств и структуры материала, образование новых продуктов под действием влаги, кислорода, озона и т.п.;
- Термическое – изменение свойств материала под действием высоких температур, а также вследствие местных перегревов диэлектрическими потерями;
- Механическое – потеря механической прочности под действием ударов, гололеда, динамических усилий при коротких замыканиях;
- Электрическое – уменьшение электрической прочности под действием длительно приложенного рабочего напряжения, а также от атмосферных и внутренних перенапряжений.

Процесс образования дефектов и разрушения изоляции протекает вначале весьма медленно, но на последних стадиях имеет скачкообразный характер и заканчивается пробоем изоляции.

Для характеристики состояния изоляции составляется схема замещения; отклонение в величинах тех или иных элементов схемы позволяет определить характер возникающих в изоляции дефектов при помощи различных методов профилактических испытаний. Элементарная схема замещения изоляции приведена на рис.1. Она состоит из четырех ветвей, определяющих основные характеристики изоляции.

1. $C_1 - C_0 - C_2$ – ветвь, определяющая емкость изоляции при наличии частичных разрядов; C_0 – емкость воздушного включения; C_2 – емкость той части изоляции, которая пересекается силовыми линиями, проходящими через воздушное включение; C_1 – емкость остальной части изоляции.

2. $C - R$ – ветвь, характеризующая степень неоднородности изоляции, наличие расслоений, увлажнений, загрязнений и т.д. Эта ветвь определяет начальное значение и постоянную времени спада тока абсорбции, а также диэлектрические потери в изоляции.

3. R_1 – ветвь, определяющая сопротивление изоляции постоянному току сквозной проводимости.

4. S – ветвь, определяющая разрядное напряжение изоляции. При приложении напряжения электрического поля в изоляции происходят процессы поляризации, обусловленные смещением электрических зарядов к электродам противоположных знаков. В результате этих процессов на поверхности накапливаются заряды разных знаков.

Ток, возникающий при накоплении зарядов до момента установления равновесного (установившегося) состояния, называется током абсорбции (рис. 2).

При приложении напряжения электрического поля в изоляции происходят процессы поляризации, обусловленные смещением электрических зарядов к электродам противоположных знаков. В результате этих процессов на поверхности накапливаются заряды разных знаков.

Ток, возникающий при накоплении зарядов до момента установления равновесного (установившегося) состояния, называется током абсорбции (рис. 2).

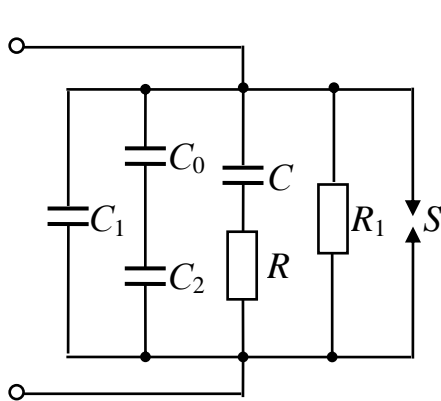


Рис. 1. Схема замещения изоляции

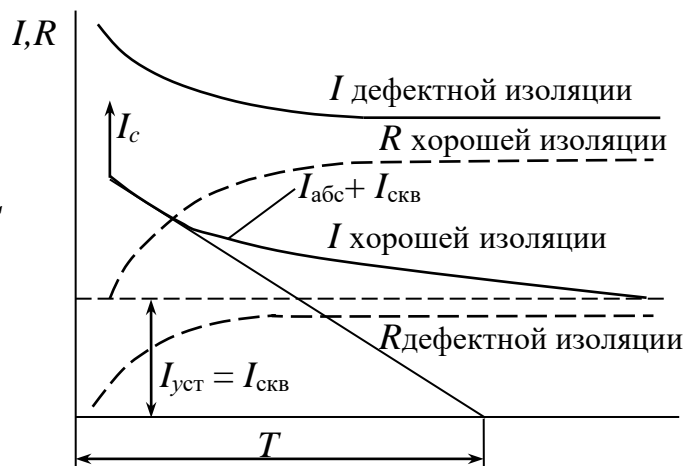


Рис. 2. Зависимость тока и сопротивления изоляции от времени приложения напряжения

Этот ток, обусловленный переходным процессом, изменяется во времени по закону

$$I_{\text{абс}} = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (1)$$

где T – постоянная времени ветви $C - R$.

Помимо тока смещения I_c , протекающего в изоляции в начальный момент после включения постоянного напряжения, и тока абсорбции $I_{\text{абс}}$, в изоляции протекает ток сквозной проводимости $I_{\text{скв}}$ (ток установившегося режима), обусловленный перемещением имеющихся в диэлектрике свободных зарядов

$$I_{\text{скв}} = \frac{U}{R}. \quad (2)$$

Этот ток имеет очень малую величину по сравнению с токами смещения и абсорбции.

Задачей профилактических испытаний изоляции является обнаружение и оценка степени развития дефектов в изоляции, возникающих в процессе эксплуатации оборудования. Своевременное проведение профилактических испытаний позволяет выявить различные дефекты в начальной стадии их развития, с помощью комплекса профилактических мероприятий устранить их или прекратить дальнейшее их развитие.

2. Измерение сопротивления изоляции обмоток

Сопротивление изоляции между обмотками, а также сопротивление изоляции отдельных обмоток относительно земли является одним из важнейших показателей качества изоляции трансформатора.

Сопротивлением изоляции $R_{\text{из}}$ называется отношение приложенного напряжения к данному участку изоляции постоянного напряжения U к протекающему при этом току I :

$$R_{\text{из}} = \frac{U}{I}. \quad (3)$$

Из рис. 2 видно, что ток со временем уменьшается и затем принимает установившееся значение. В практике профилактических испытаний принято сопротивление изоляции оценивать по напряжению и току, протекающему по изоляции спустя 1 мин от момента приложения напряжения. При этом ток еще не достигает установившегося значения.

Резкое уменьшение сопротивления изоляции или возрастание тока проводимости наблюдается только лишь при возрастании проводимости

изоляции между электродами, т.е. метод позволяет определить распределенные дефекты, например, общее увлажнение изоляции, загрязнение поверхности, наличие сквозных проводящих каналов и т.п. С ростом температуры сопротивление изоляции уменьшается, как это видно из табл. 1.

Измерение сопротивления изоляции обмоток производят по схемам (рис. 3) с помощью мегаомметров типа МС-05, М-1101, МОМ-5 и др.

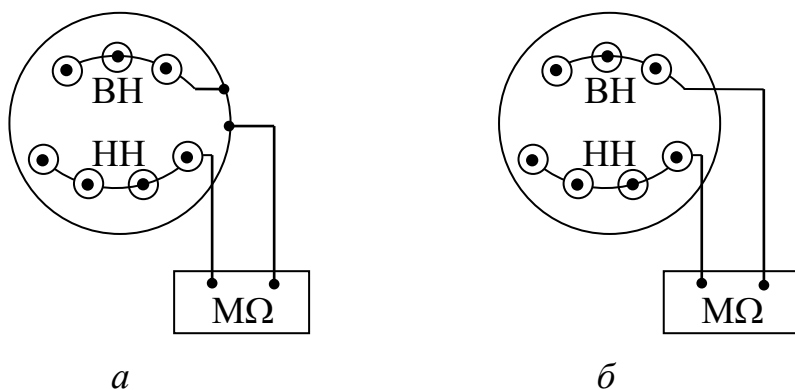


Рис. 3. Схема измерения сопротивления изоляции обмоток трансформатора:

а – относительно корпуса; б – между обмотками

С помощью мегаомметра можно также обнаружить недоброкачественную пайку, плохие контакты, обрыв провода в обмотке (прибор показывает резкое возрастание сопротивления).

Измеренное значение $R_{из}$ сравнивают с данными табл. 1, на основании чего можно сделать вывод о качестве изоляции.

3. Определение тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$)

Величина $\text{tg } \delta$, определяющая диэлектрические потери в изоляции на переменном напряжении, является одной из самых распространенных характеристик, значение которой используется как для оценки качества электроизоляционного материала, так и для оценки состояния изоляционного изделия. Для реально используемых изоляционных конструкций величина $\text{tg } \delta$ в большинстве случаев позволяет сделать вывод о причинах ухудшения изоляции из-за ее общего увлажнения или загрязнения.

При приложении к изоляции напряжения по ветвям $C - R$ и R_1 протекает абсорбционный ток и ток сквозной проводимости, вызывающие разогрев изоляции. Энергия, затрачиваемая на нагрев, получила название диэлектрических потерь. Полный ток I , протекающий через изоляцию,

сдвинут по отношению к напряжению на угол φ и раскладывается на активную I_a и реактивную I_c составляющие (рис. 4).

Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ представляет собой отношение активной составляющей тока к реактивной составляющей

$$\text{tg } \delta = \frac{I_a}{I_c}. \quad (5)$$

Мощность потерь энергии в изоляции равна

$$P = U \cdot I_a = U \cdot I_c \cdot \text{tg } \delta. \quad (6)$$

Появление в изоляции дефекта вызывает уменьшение его сопротивления и, следовательно, увеличение активного тока, реактивный ток (I_c) при этом почти не изменяется. Это вызовет увеличение $\text{tg } \delta$ (рис.4).

Поскольку диэлектрические потери в изоляции зависят от геометрических размеров, то принято измерять не сами потери, а тангенс угла диэлектрических потерь, т.к. $\text{tg } \delta$ – это характеристика материала, не зависящая от размеров объекта, и ее можно измерить непосредственно прибором. При этом $\text{tg } \delta$ выражается в относительных единицах или в процентах.

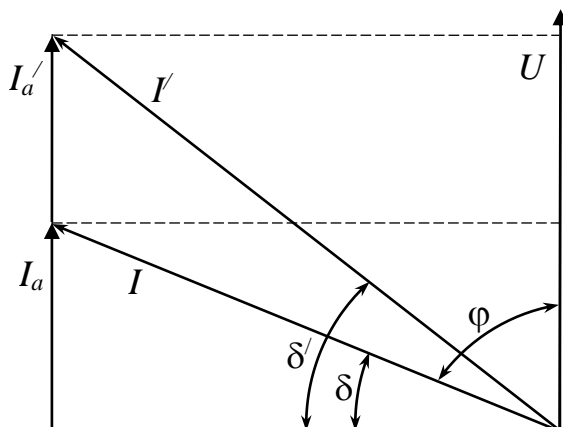


Рис. 4. Векторная диаграмма токов через диэлектрик с потерями

Для измерения $\text{tg } \delta$ применяются мосты переменного тока типа МД-16, Р-507, Р-521, Р-595, Р-5026 и др. Диэлектрические потери в изоляции обмоток трансформатора измеряют между каждой обмоткой и корпусом при заземленных свободных обмотках. Измеренные диэлектрические потери составляют сумму диэлектрических потерь твердой изоляции и масла.

Допустимые значения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции обмоток трансформатора в эксплуатации приведены в табл. 2.

На рис. 5 представлена принципиальная электрическая схема измерения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции обмоток трансформатора при помощи моста переменного тока высокого напряжения.

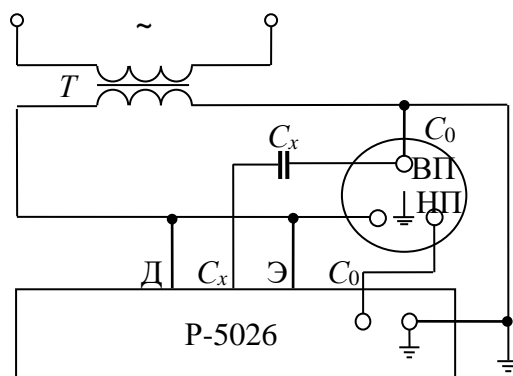


Рис. 5. Схема моста для определения тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$):

C_0 – эталонный конденсатор; C_x – испытуемый объект; T – высоковольтный трансформатор; Д, C_x , Э, C_0 – кабели для подсоединений; P-5026 – мост переменного тока; ВП, НП – высокопотенциальный и низкопотенциальный

4. Определение относительной влажности изоляции

Увлажненность изоляции исследуют путем измерения емкости обмоток на двух частотах при неизменной температуре 10 – 20 °С (метод «емкость – частота»).

Емкость объекта при неизменных температуре и частоте приложенного напряжения есть величина постоянная. При увеличении частоты емкость уменьшается. Эта зависимость является следствием процессов медленной поляризации.

При переменном напряжении процесс накопления зарядов ограничен длительностью одного полупериода напряжения. Чем выше частота, тем меньшей степени успевают развиваться процессы поляризации, тем меньше емкость. Появление больших по объему и хорошо проводящих включений, шунтирование или пробой изоляции увеличивают разность емкостей при низких и высоких частотах.

Большое влияние на зависимость емкости от частоты оказывает увлажненность изоляции. Чем больше увлажнена изоляция, тем быстрее протекают процессы поляризации, тем больше емкость изоляции.

Изменение емкости для увлажненной изоляции с ростом частоты носит круто падающий характер (рис. 6, кривая 2).

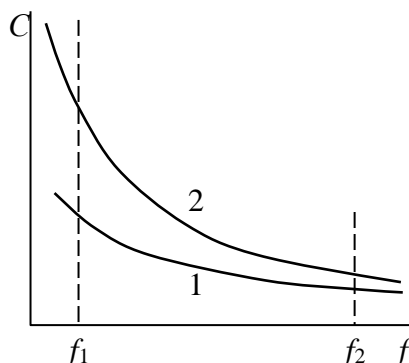


Рис. 6. Зависимость емкости изоляции от частоты:
1 – сухая изоляция; 2 – увлажненная изоляция

В сухой изоляции поляризация протекает медленнее, длительность процессов больше полупериода приложенного напряжения.

Поэтому у сухой изоляции емкость меньше, чем у влажной во всем диапазоне частот, а характер изменения ее от частоты носит более плавный характер (рис. 6, кривая 1).

Указанные дефекты приводят к тому, что отношение емкостей увлажненной изоляции при двух разных частотах существенно больше, чем у сухой изоляции, на чем и основан принцип оценки степени увлажненности изоляции.

ГОСТом предусмотрено проведение измерений при двух частотах: 2 Гц и 50 Гц.

Для волокнистых органических материалов степень увлажнения является недопустимой (опасной), если отношение величин емкости изоляции при вышеуказанных частотах $\frac{C_2}{C_{50}} \geq 1,2 - 1,3$. Схема прибора контроля изоляции по методу «емкость – частота» представлена на рис. 7 (прибор типа ПКВ-7, ПКВ-13).

С помощью переключателя П образец C_x периодически подключается к источнику постоянного напряжения U_0 (C_x заряжается), а затем к цепи с гальванометром Г (C_x разряжается).

Ток I , протекающий в разрядной цепи через гальванометр, пропорционален емкости образца при заданной частоте, т.е. $I_f = U_0 \cdot C_f \cdot \omega$. Тогда отношение емкостей при заданных частотах переключателя

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{50}{2} \cdot \frac{I_2}{I_{50}}. \quad (7)$$

Измерение емкости производят при помощи приборов контроля влажности типа ПКВ-13, ПКВ-7 (рис. 8).

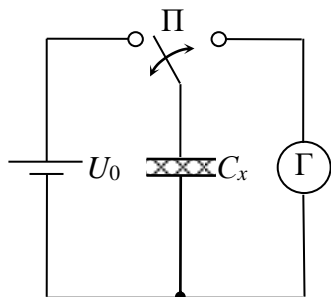


Рис. 7. Упрощенная схема прибора контроля влажности изоляции по методу «емкость – частота»

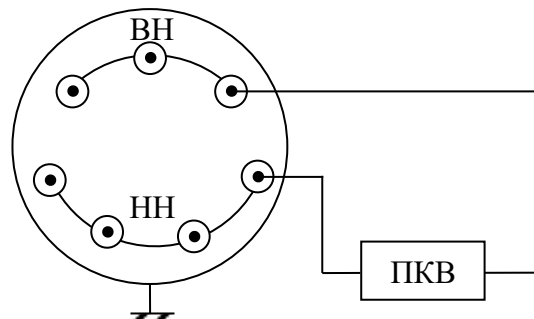


Рис. 8. Схема измерения увлажненности изоляции обмоток трансформатора

Испытание пробы масла

Отбор масла из трансформатора и его испытание позволяет оценить состояние самого масла и в некоторой степени состояние остальной изоляции, находящейся в масле.

Трансформаторное масло, находясь в соприкосновении с окружающим воздухом, активно поглощает из него влагу и окисляется кислородом и озоном, что уменьшает его электрическую прочность. Кроме того, влага в масле легко переходит в гигроскопические материалы изоляции (бумажная и картонная изоляция), снижая ее электрическую прочность.

Для испытания масла на пробой используют специальные аппараты типа АИИ-70, АМИ-90.

Аппарат АИИ-70 имеет фарфоровый сосуд емкостью 0,5 л. В нем укреплены латунные электроды диаметром 25 мм на расстоянии друг от друга 2,5 мм. Уровень залитого в сосуд масла должен быть не меньше, чем на 15 мм выше верхнего края электрода.

Пробой отмечается по образованию в масле между электродами сплошной искры и по спаданию до нуля стрелки вольтметра. Затем напряжение снижают и дают маслу отстояться в течение 1 мин. Такие пробои делают 5 раз и затем берут среднее арифметическое значение пробивного напряжения.

Электрическая прочность трансформаторного масла, заливаемого в электрооборудование, определяется классом номинального напряжения: при $U_n = 15$ кВ и ниже $U_{пр} = 25$ кВ, при $U_n = 15-35$ кВ – $U_{пр} = 30$ кВ, при $U_n = 60 \div 220$ кВ – $U_{пр} = 40$ кВ, при $U_n = 330$ кВ – $U_{пр} = 50$ кВ.

6. Испытание электрической прочности изоляции обмоток трансформатора повышенным напряжением

Испытание повышенным напряжением промышленной частоты является заключительным этапом профилактических испытаний изоляции трансформатора. Оно проводится с целью определения запаса электрической прочности изоляции, а также для обнаружения дефектов, не выявленных с помощью предыдущих испытаний.

Величина испытательного напряжения определяется из учета возможных внутренних и атмосферных перенапряжений в действующих установках. Приложение повышенного напряжения создает в испытываемой изоляции увеличенную, по сравнению с рабочей, напряженность электрического поля, что позволяет обнаруживать дефекты в изоляции, вызывающие снижение электрической прочности.

Величина пробивного напряжения изоляции зависит от времени приложения напряжения, поэтому испытательное напряжение прикладывается в течение 1 мин. Более длительное приложение напряжения может вызвать тепловой пробой и при отсутствии дефектов. Изоляция считается выдержавшей испытание, если не было слышно разрядов или колебания стрелки вольтметра и амперметра не указали на наличие разрядов.

Испытанию электрической прочности изоляции повышенным напряжением подвергаются обмотки напряжения по схеме, приведенной на рис. 9.

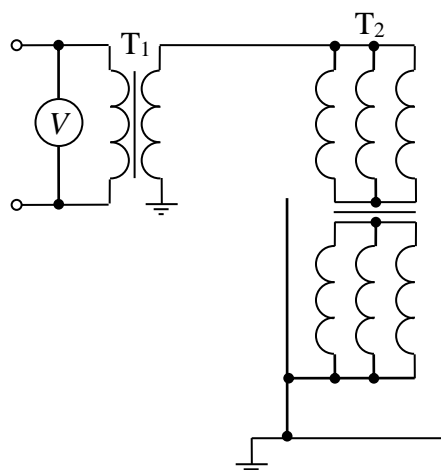


Рис. 9. Электрическая схема испытания изоляции повышенным напряжением:

*T₁ – испытательный трансформатор; T₂ – испытуемый трансформатор;
V – вольтметр*

Один вывод испытательного трансформатора заземляют. Согласно ГОСТ 1516 –76 скорость подъема напряжения до 40 % испытательного может быть произвольной. Затем подъем напряжения производят со скоростью около 30 % от испытательного в 1 с. Напряжение выдерживают в течение 1 мин и затем снижают.

7. Порядок работы

1. Измерить сопротивление изоляции обмоток трансформатора мегаомметром МС-05.
2. Определить увлажненность изоляции методом «емкость – частота» прибором контроля влажности ПКВ-7.
3. Определить тангенс угла диэлектрических потерь прибором Р-5026.
4. Определить электрическую прочность масла прибором АИМ-90.
5. Провести испытание обмоток трансформатора повышенным напряжением промышленной частоты.

Примечание. Всем измерениям должно предшествовать ознакомление с описаниями и схемами применяемых приборов.

8. Содержание отчета

1. Привести схемы включения приборов, используемых в измерениях.

2. Результаты измерений по пунктам 1 – 3 и 5 занести в табл. 4, а результаты испытаний, полученные при исследовании электрической прочности масла, занести в табл. 5.

3. Сделать соответствующие выводы о качестве изоляции испытуемого трансформатора на основе измерений по пунктам 1 – 5.

Таблица 1

Наименьшие допустимые значения сопротивления изоляции обмоток трансформатора, МОм

Класс напряжения обмотки ВН, кВ	Температура обмотки, °С			
	10	20	30	40
до 10 кВ	2150	1000	570	240
35 кВ	3250	1700	810	450

Таблица 2

$$t\delta = f(T, ^\circ\text{C}), \%$$

Класс напряжения обмотки ВН, кВ	Температура обмотки (градусы)					
	10	20	30	40	50	60
35 кВ и ниже	2,5	3,5	5,5	8,0	11	15

Таблица 3

Величины испытательных напряжений в эксплуатации, кВ

Вид испытания	Номинальное напряжение, кВ							
	3	6	10	20	35	60	80	110
Испытательное напряжение, кВ	15	21	30	47	72	105	140	195

Таблица 4

Результаты испытаний изоляции трансформатора

Вид испытания	Обмотка ВН		Обмотка НН		Между обмотками	
	опыт-ное	конт-рольно е	опыт-ное	конт-рольно е	опыт-ное	конт-рольн ое
Сопротивление изоляции, МОм						

Таблица 5

Испытание масла

№ опыта	1	2	3	4	5	среднее
Пробивное напряжение, кВ						

9. Контрольные вопросы

1. В чем состоит цель диагностик изоляции?
2. Какие виды типовых диагностических технологий для контроля состояния изоляции трансформаторов можете назвать?
3. Какие мероприятия необходимо провести после того, как изоляция забракована по одному или нескольким показателям качества?
4. Какое влияние могут оказать воздушные включения на сопротивление и $\text{tg } \delta$ изоляции?
5. Как изменится $\text{tg } \delta$ при увлажнении изоляции? Дать объяснения.
6. Объяснить увеличение емкости изоляции при ее увлажнении.
7. С какой целью производится испытание изоляции электрооборудования высоким напряжением?
8. Какие эксплуатационные факторы приводят к выходу высоковольтной изоляции из строя?