

## ГЛАВА 10 ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

### § 35. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ИСПЫТАНИЯ

После изготовления перед выпуском с завода все трансформаторы подвергаются контрольным испытаниям. Их производят для проверки качества трансформаторов и выяснения, в какой мере их характеристики соответствуют расчетным данным и государственному стандарту.

Контрольные испытания согласно ГОСТ 3484—65 содержат следующие виды испытаний:

- проверка коэффициента трансформации для всех ответвлений обмоток;
- проверка группы соединения обмоток;
- измерение сопротивления обмоток постоянному току;
- опыт холостого хода при номинальных напряжении и частоте;
- опыт короткого замыкания (для трехобмоточных трансформаторов опыт короткого замыкания производят для каждой пары обмоток);
- измерение сопротивления изоляции обмоток по отношению к заземленным частям и между обмотками;
- испытание электрической прочности изоляции приложенным напряжением с частотой 50 гц и индуктированным напряжением при повышенной частоте;

испытание трансформаторного бака на плотность.

Каждый вновь разработанный тип трансформатора подвергают типовым испытаниям, которые помимо перечисленных выше включают следующие виды испытаний:

- испытание трансформатора на нагрев;
- испытание трансформаторного бака на вакуум (для трансформаторов мощностью 630 ква и выше);
- импульсные испытания изоляции;
- испытания трансформатора на устойчивость при коротком замыкании.

Типовые испытания производят не реже одного раза в два года. Их повторяют также полностью или частично при внесении изменений в конструкцию или технологический процесс изготовления трансформаторов, а также при замене материалов, применяемых при изготовлении трансформаторов.

Методика и нормы контрольных и типовых испытаний установлены инструкцией завода-изготовителя (согласно ГОСТ 1516—68, 3484—65 и 8008—70). На месте установки трансформаторов перед

их включением в эксплуатацию также могут быть произведены как контрольные, так и типовые испытания.

Мощные и высоковольтные трансформаторы в процессе изготовления подвергают обычно предварительным испытаниям. Испытание полностью готового трансформатора имеет тот недостаток, что обнаруженный при этом небольшой дефект влечет за собой ненужные затраты на переделку. В некоторых случаях небольшие дефекты производства или сборки не могут быть обнаружены при испытании готового трансформатора.

Предварительные испытания могут быть разделены на следующие группы:

- испытание магнитопровода;
- первое предварительное испытание трансформатора;
- второе предварительное испытание трансформатора с запаяными отводами обмоток без бака;
- окончательные испытания.

При испытании магнитопровода определяют качество его сборки и изоляции между пластинами электротехнической стали. Изоляцию стяжных (прессующих) шпилек, ярмовых балок, накладок и других деталей от активной стали магнитопровода испытывают приложенным напряжением 2000 в промышленной частоты в течение 1 мин. Для определения качества лаковой или другой изоляции между пластинами электротехнической стали магнитопровода измеряют сопротивление постоянному току между крайними его пластинами и между отдельными пакетами.

Первому предварительному испытанию подвергают трансформаторы после первой сборки, т. е. на испытательную станцию подают зашихтованный магнитопровод с насаженными на него обмотками. Это испытание проводят для проверки качества сборки магнитопровода, числа витков обмоток, отсутствия короткозамкнутых витков и т. д.

При этом испытании производится следующее:

• проверка мегомметром изоляции отдельных параллельных ветвей многовитковых обмоток. Эту проверку производят в сборочном цехе до насадки обмоток на магнитопровод;

• измерение потерь холостого хода при малом напряжении для проверки отсутствия короткозамкнутых витков в обмотках;

• определение коэффициента трансформации между всеми катушками каждой пары обмоток на всех стержнях;

• проверка равенства чисел витков (методом встречного включения) всех катушек, соединяемых при последующей сборке параллельно;

• опыт холостого хода при нормальном возбуждении для определения тока и потерь холостого хода. Этот опыт производят только в тех случаях, когда невозможен пробой изоляции трансформатора.

Второе предварительное испытание трансформатора производят для проверки выполнения схемы соединений обмоток и качества паек катушек. Это испытание производится при полностью собранной активной части трансформатора с установленными

ми переключателями (до сушки) и включает следующие испытания:

• определение коэффициента трансформации между всеми обмотками при всех положениях переключателей;

• проверка группы соединения обмоток трансформатора;

• измерение сопротивления постоянному току каждой обмотки при всех положениях переключателей.

Окончательному испытанию подвергают полностью собранные, высушенные, помещенные в баки и залитые трансформаторным маслом трансформаторы.

### § 36. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

Коэффициент трансформации наиболее просто можно определить при опыте холостого хода как соотношение показаний вольтметров, включенных в цепь первичной и вторичной обмоток трансформатора. Для определения коэффициента трансформации в ГОСТ 3484—65 рекомендован метод двух вольтметров.

При холостом ходе ток вторичной обмотки трансформатора равен нулю ( $I_2=0$ ) и, следовательно, напряжение на зажимах этой обмотки равно э. д. с., т. е.  $U_2=E_2=4,44\omega_2\Phi_m\cdot 10^{-8}$ . Так как в первичной обмотке протекает ток холостого хода, много меньший номинального тока этой обмотки, падения напряжения в активном и реактивном сопротивлениях этой обмотки очень малы. Поэтому напряжение, приложенное к первичной обмотке, численно примерно равно э. д. с., т. е.  $U_1\approx E_1=4,44\omega_1\Phi_m\cdot 10^{-8}$ .

Таким образом, коэффициент трансформации  $k$ , определяемый как отношение фазного напряжения обмотки ВН к фазному напряжению обмотки НН при холостом ходе, практически равен отношению чисел витков этих обмоток, т. е.

$$k = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} \approx \frac{w_{ВН}}{w_{НН}}$$

Для большой точности измерения тока и потерь холостого хода, а также для большей безопасности обслуживания опыт холостого хода проводят так, что первичной обмоткой является обмотка НН, а вторичной — обмотка ВН. Так как первичное и вторичное напряжения трансформатора отличаются в определенное число раз, равное коэффициенту трансформации, изменение одного из них (например, первичного напряжения) вызывает соответствующее изменение другого (вторичного). Поэтому определение коэффициента трансформации можно производить при напряжении, значительно меньшем номинального. Кроме того, испытание трансформатора при высоком напряжении требует подбора точных приборов, измерительных трансформаторов на высокие напряжения и является опасным для обслуживающего персонала испытательной станции.

Определение коэффициента трансформации дает возможность проверить правильность числа витков обмоток трансформатора и производится для всех фаз на всех регулировочных ответвлениях

обмоток. Коэффициент трансформации, определенный измерениями, может отличаться от расчетного (согласно ГОСТ 11677—65) в пределах не более  $\pm 0,5\%$ . Для трансформаторов с коэффициентом трансформации меньшим трех и трансформаторов для собственных нужд подстанций допускается отклонение коэффициента трансформации в пределах  $\pm 1\%$ .

Определение коэффициента трансформации при малом напряжении (100 в) дает возможность обнаружить замыкание витков обмоток, для чего измеряют ток и потери холостого хода. У однофазных трансформаторов наличие короткозамкнутых витков обнаруживают при сравнении данных измерений для обмоток, помещенных на разных стержнях магнитопровода, а для трехфазных трансформаторов — при сравнении данных измерений для различных фаз.

Если обмотки трансформаторов имеют параллельные ветви или катушки, то в процессе предварительного испытания определяют коэффициент трансформации для каждой ветви или катушки, после чего измеряют напряжение при их встречном включении. При встречном включении одноименные точки секций для катушек соединяют между собой, а между двумя другими концами включают вольтметр. При одинаковом числе витков параллельных ветвей стрелка вольтметра будет стоять на нуле.

В однофазных трансформаторах стержневого типа на каждом стержне находятся обмотки ВН и НН. Коэффициент трансформации определяют между обмотками ВН и НН, находящимися на одном стержне, а затем между этими обмотками, размещенными на другом стержне. В обоих случаях коэффициент трансформации должен быть одинаковым. Кроме того, проверяют распределение напряжения между катушками двух стержней обмотки НН, для чего к этим катушкам подключают вольтметры, показания которых должны быть одинаковыми. Убедившись в одинаковости коэффициентов трансформации между обмотками на двух стержнях и в одинаковости напряжений на катушках различных стержней обмотки НН, измеряют коэффициент трансформации между обмотками трансформатора.

Коэффициент трансформации трехфазных трансформаторов можно определить по отношению как фазных, так и линейных напряжений. В процессе предварительных испытаний коэффициент трансформации определяют как отношение фазных напряжений, так как в этом случае легче обнаружить ошибку, если она имеется. При окончательном испытании в случае, когда нет выводов всех начал и концов обмоток на крышке трансформатора, коэффициент трансформации определяют по отношению линейных напряжений, пересчитывая их на фазные значения.

Так, при соединении обмоток ВН в звезду, а обмоток НН в треугольник коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{ВН}}{\sqrt{3}U_{НН}},$$

где  $U_{ВН}$  и  $U_{НН}$  — линейные напряжения обмоток ВН и НН при испытании.

Если обмотки ВН соединены в треугольник, а обмотки НН — в звезду, коэффициент трансформации

$$k = \frac{\sqrt{3}U_{ВН}}{U_{НН}}.$$

При испытании трансформатора измеряют напряжение между одноименными зажимами обмоток ВН и НН. Например, при измерении линейного напряжения между точками АВ обмотки ВН измеряют напряжение между точками ab обмотки НН и т. д. Коэффициент трансформации определяют для всех трех фаз при всех положениях переключателей числа витков обмоток.

У трехобмоточных трансформаторов достаточно определить коэффициент трансформации для двух пар обмоток, после чего легко вычислить коэффициент трансформации для третьей пары. Так, известные коэффициенты трансформации между обмотками ВН — НН и СН — НН ( $k_{ВН} = \frac{w_{ВН}}{w_{НН}}$  и  $k_{СН} = \frac{w_{СН}}{w_{НН}}$ ) позволяют определить коэффициент трансформации  $k_{ВС}$  между обмотками ВН — СН:

$$k_{ВС} = \frac{w_{ВН}}{w_{СН}} = \frac{w_{ВН}}{w_{НН}} \cdot \frac{w_{СН}}{w_{НН}} = \frac{k_{ВН}}{k_{СН}}.$$

При известных  $k_{ВС}$  и  $k_{СН}$  найдем:

$$k_{ВН} = \frac{w_{ВН}}{w_{НН}} = \frac{w_{ВН}}{w_{СН}} \cdot \frac{w_{СН}}{w_{НН}} = k_{ВС} \cdot k_{СН}.$$

Коэффициент трансформации автотрансформатора измеряют таким же образом, как и коэффициент трансформации трансформатора. Если автотрансформатор снабжен дополнительной обмоткой, соединенной в треугольник, то коэффициент трансформации определяют между двумя парами обмоток для каждой фазы как отношение фазных напряжений.

Определение коэффициента трансформации отношением показаний вольтметров в цепи первичной и вторичной обмоток имеет недостатки: требуются точные вольтметры, точные вычисления и постоянство приложенного напряжения, так как его изменение снижает точность измерения. Кроме того, в процессе испытания напряжение обмотки ВН может достигать больших значений, что повышает опасность производства таких испытаний.

При использовании измерительных мостов эти недостатки устраняются. При применении одной из возможных схем измерительных мостов переменного тока, изображенной на рис. 68, а, коэффициент трансформации определится отношением сопротивлений делителя напряжения  $r_1$  и  $r_2$ . В этой схеме напряжение от источника тока приложено к обмотке ВН. Последовательно с обмоткой ВН включена обмотка НН. Свободные зажимы обмоток ВН и НН замкнуты

на регулируемое активное сопротивление. Между общей точкой соединения обмоток ВН и НН и ползунком реостата включен измерительный прибор. Ползунок реостата должен быть установлен в таком положении, при котором стрелка прибора стоит на нуле.

Испытание посредством измерительных мостов может производиться при сколь угодно пониженном напряжении и очень большом сопротивлении делителя напряжения и обеспечивает точность измерения до 0,1%. Таким образом, коэффициент трансформации

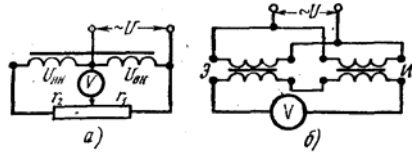


Рис. 68. Схема измерения коэффициента трансформации посредством измерительного моста (а) и эталонного трансформатора (б)

$$k = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} = \frac{r_1}{r_2}$$

Определение коэффициента трансформации путем использования по-

стоянного тока основано на равенстве намагничивающих сил обмоток ВН и НН.

Определение коэффициента трансформации посредством эталонного трансформатора (рис. 68, б) основано на том, что вторичное напряжение испытуемого трансформатора И сравнивается с эталонным Э. Для этого первичные обмотки эталонного и испытуемого трансформаторов включают в сеть источника энергии. Вторичные обмотки этих трансформаторов, включенные встречно, замыкают на вольтметр. При равенстве коэффициентов трансформации стрелка вольтметра будет стоять на нуле. Таким образом, показания вольтметра дают возможность установить, в какой мере коэффициент трансформации испытуемого трансформатора отличается от расчетного.

### § 37. ПРОВЕРКА ГРУПП СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК

Группа соединений обмоток трансформатора имеет большое значение при включении его на параллельную работу с другими трансформаторами, так как при параллельном включении трансформаторов различных групп появляются уравнивающие токи, во много раз превосходящие номинальные. Вследствие этого параллельная работа трансформаторов различных групп недопустима.

Проверка группы соединения обмоток трансформатора является обязательной и производится для мощных трансформаторов обычно два раза — при втором предварительном и окончательном контрольном испытаниях. Группы трансформатора определяют при одном (обычно номинальном) напряжении обмоток, не переключая число витков.

Группу соединения обмоток трехфазного трансформатора можно определить по показаниям двух вольтметров (ГОСТ 3484—65). При этом соединяют электрически одноименные вводы обмоток ВН

Таблица 1  
Напряжения между зажимами трехфазного трансформатора при соединенных зажимах А и а и при включении обмоток НН под напряжение U

Группа соединений	Угловое смещение в град.	Векторная диаграмма линейных в. д. с.	Напряжения между зажимами			
			б-В; с-С	б-С	с-В	
0	0		$U(k-1)$	$UV\sqrt{1-k+k^2}$	$UV\sqrt{1-k+k^2}$	$UV\sqrt{1-k+k^2}$
11	330		$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$UV\sqrt{1+k^2}$	$UV\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$UV\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$
10	300		$U(k-1)$	$UV\sqrt{1+k^2}$	$U(k-1)$	$UV\sqrt{1-k+k^2}$
9	270		$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$UV\sqrt{1+k^2}$	$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$UV\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$
8	210		$U\sqrt{1+k+k^2}$	$UV\sqrt{1+k^2}$	$U(1+k)$	$UV\sqrt{1-k+k^2}$

Продолжение табл. 1

Группа соединений	Угловое смещение э. д. с., град	Векторная диаграмма линейных э. д. с.	Напряжения между зажимами		
			b - B; e - C	b - C	c - B
7	210		$U\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1+k^2}$
6	180		$U(1+k)$	$U\sqrt{2+k+k^2}$	$U\sqrt{1+k+k^2}$
5	150		$U\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1+k^2}$	$U\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}$
4	120		$U\sqrt{1+k+k^2}$	$U\sqrt{1-k+k^2}$	$U(1+k)$
3	90		$U\sqrt{1+k^2}$	$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}$

Продолжение табл. 1

Группа соединений	Угловое смещение э. д. с., град	Векторная диаграмма линейных э. д. с.	Напряжения между зажимами		
			b - B; e - C	b - C	c - B
2	60		$U\sqrt{1-k+k^2}$	$U(k-1)$	$U\sqrt{1+k+k^2}$
1	30		$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1+k^2}$

Примечание.  $k$  — линейный коэффициент трансформации, определяемый отношением номинальных напряжений при холостом ходе.



и НН (например, А и а) на крышке испытуемого трансформатора.

К одной из обмоток (НН или ВН) подводят трехфазное напряжение небольшой величины (100 или 200 в) и точным вольтметром (класса точности не ниже 0,5) измеряют поочередно напряжения между зажимами обмоток  $b-B$ ,  $b-C$ ,  $c-C$  и  $c-B$ .

Измеренные напряжения сравнивают с расчетными данными; их совпадение означает правильность группы соединения. В зависимости от группы соединения обмоток эти напряжения будут иметь значения, приведенные в табл. 1.

**Пример.** Трансформатор мощностью 180 кВа с линейными напряжениями обмоток ВН и НН, равными 10 и 3,15 кВ, обмотки ВН которого соединены в звезду, а обмотки НН — в треугольник, принадлежит 11-й группе. Определить напряжение между зажимами  $b-B$ ,  $c-C$ ,  $b-C$  и  $c-B$ , если обмотки низшего напряжения включены под номинальное линейное напряжение, а зажимы А и а электрически соединены.

**Решение.** Коэффициент трансформации для линейных э. д. с.

$$k = \frac{10\,000}{3150} = 3,17.$$

Напряжение между зажимами  $b-B$ ,  $c-C$  и  $c-B$ :

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{c-B} = U \sqrt{1 - \sqrt{3}k + k^2} = 3,15 \sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot 3,17 + 3,17^2} = 7,35 \text{ кВ.}$$

Напряжение между зажимами  $b-C$ :

$$U_{b-C} = U \sqrt{1 + k^2} = 3,15 \sqrt{1 + 3,17^2} = 10,5 \text{ кВ.}$$

В трансформаторах небольшой мощности и невысоких напряжений группа соединения обмоток может быть определена прямым методом (по показанию фазометра). Фазометр представляет собой измерительный прибор, определяющий угол сдвига фаз между током и напряжением (или между токами в двух цепях). Прибор имеет две обмотки, одну из которых включают в сеть обмотки НН, а другую — в сеть обмотки ВН. Обмотки фазометра включают через дополнительные сопротивления большой величины.

### § 38. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

#### Измерение сопротивления изоляции

Сопротивление изоляции обмоток зависит от степени их увлажнения и температуры. Измерение сопротивления изоляции является эксплуатационным испытанием. Его производят в процессе монтажа трансформатора, а также при текущем и капитальном ремонтах мегомметром с напряжением не менее 1000 в в холодном и горячем состоянии обмоток. Сопротивление изоляции измеряют у обмоток каждого напряжения относительно заземленных частей и между

обмотками разных напряжений. Измерение мегомметром позволяет обнаружить ненормально низкое сопротивление изоляции, нарушение контактов и другие повреждения токоведущих цепей.

Показание мегомметра не остается постоянным, а изменяется в зависимости от продолжительности измерений, так как для заряда емкости обмотки требуется некоторое время. Это свойство используют для оценки степени увлажнения изоляции обмоток, для чего производят два отсчета при измерении сопротивления изоляции — через 15 и 60 сек. Отношение сопротивлений изоляции, измеренных через 60 и 15 сек после включения мегомметра, называется *коэффициентом абсорбции*. При сильно увлажненной изоляции показания мегомметра быстро устанавливаются и коэффициент абсорбции близок к единице. При мало увлажненной изоляции показания мегомметра нарастают медленно и сопротивление изоляции через 60 сек после включения мегомметра может оказаться в два и более раз большим, чем через 15 сек.

Так как значения сопротивления изоляции не нормируются, данные измерений сравнивают со значениями предыдущих замеров.

Сопротивление изоляции обмоток в большой степени зависит от температуры, поэтому сравнительные измерения сопротивлений производят при одинаковой температуре. Если измерения производят при температуре, отличной от той, при которой производили предыдущие измерения, значения предыдущих замеров приводят к температуре последнего замера, имея в виду, что при понижении температуры на  $10^\circ\text{C}$  сопротивление изоляции увеличивается примерно в 1,5—2 раза.

Показателем степени увлажнения изоляции обмоток трансформатора являются диэлектрические потери в ней. Обычно измеряют не диэлектрические потери в ваттах, а тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ) в относительных единицах или процентах. Измерение  $\text{tg } \delta$  производят емкостным мостом. Если измеренные значения  $\text{tg } \delta$  превосходят установленные значения в 1,5 и более раза, изоляцию признают неполноценной.

Для оценки степени увлажнения изоляции обмоток помимо измерения сопротивления и коэффициента абсорбции рекомендуется измерить емкость обмоток. Емкость между обмотками и емкость обмоток на заземленные части трансформатора при просушенной изоляции почти не зависят от температуры, тогда как при увлажненной изоляции емкость заметно увеличивается с повышением температуры. Изоляция считается неувлажненной и не нуждающейся в сушке, если ее емкость при температуре  $75^\circ\text{C}$  не более чем на 15% больше емкости при  $25^\circ\text{C}$ , т. е.  $C_{75} \leq 1,15 C_{25}$ .

Емкость измеряют по мостовой схеме при частоте 50 гц. При хорошо просушенной изоляции емкость обмоток почти не зависит от частоты, тогда как при увлажненной изоляции емкость заметно уменьшается с увеличением частоты. Поэтому показанием степени увлажнения изоляции обмоток трансформатора может быть отношение емкости  $C_2$ , измеренной при частоте 2 гц, к емкости  $C_{50}$  при частоте 50 гц.

Отношение емкостей  $\frac{C_2}{C_{50}}$  различно в зависимости от температуры обмоток и для неувлажненной изоляции имеет следующие значения:

Температура, °С . . . . .	5	10	20	30	40	50	60	70
$\frac{C_2}{C_{50}}$ . . . . .	1,5	1,23	1,32	1,4	1,45	1,57	1,66	1,75

Прибор контроля влажности ПКВ непосредственно определяет отношение  $\frac{C_2}{C_{50}}$ .

Каждый из рассмотренных выше методов оценки состояния изоляции обмоток трансформатора не является вполне определенным и надежным показателем, но сочетание этих методов позволяет достаточно правильно оценить качество изоляции.

#### Испытание электрической прочности изоляции

Испытание электрической прочности изоляции обмоток трансформатора производят, когда он полностью собран. Электрическая прочность изоляции масляных трансформаторов должна удовлетворять требованиям ГОСТ 1516—68, в котором предусмотрены контрольные испытания повышенным напряжением каждого трансформатора.

При контрольных испытаниях проверяют главную и продольную изоляцию трансформатора.

Для проверки главной изоляции (изоляция обмоток от магнитопровода и других обмоток, бака, а также изоляция отводов и переключателей от магнитопровода, бака и от отводов и переключателей других обмоток) испытывают изоляцию каждой обмотки, электрически не связанной с другими обмотками. Повышенное испытательное напряжение прикладывают между испытуемой обмоткой, замкнутой накоротко, и заземленным баком.

С баком трансформатора электрически соединен магнитопровод и другие обмотки испытуемого трансформатора, которые также замыкаются накоротко. Испытательное напряжение с частотой 50 гц прикладывают в течение 1 мин. При нормальных атмосферных условиях (температура 20°С; давление 760 мм рт. ст.; влажность 11 г/м<sup>3</sup>) испытательные напряжения имеют следующие значения:

Класс напряжения (действующего), кв . . . . .	3	6	10	15	20	35	110	154	220
Испытательное напряжение (действующее), кв . . . . .	18	25	35	45	55	85	200	275	400

Для сухих трансформаторов классов напряжения до 10 кв включительно испытательные напряжения берут равными  $\frac{2}{3}$  от приведенных. Изоляцию обмоток масляных и сухих трансформаторов с рабочим напряжением менее 1 кв проверяют испытательным напряжением (действующим) 5 кв.

Для проверки продольной изоляции (изоляция между катушками, слоями, витками, а также между катушками разных фаз и соответствующая изоляция отводов и переключателей) обмотки испытывают напряжением, индуктированным в этих обмотках. Для этого одну из обмоток включают под напряжение повышенной частоты, равное ее двойному номинальному напряжению. Длительность приложения этого испытательного напряжения составляет 1 мин.

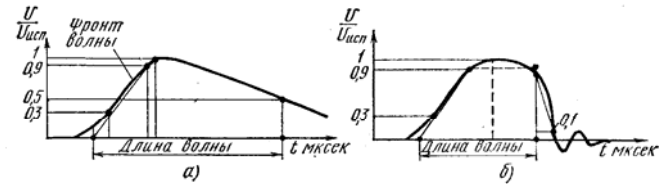


Рис. 69. Форма импульсного испытательного напряжения: а — полная волна, б — срезанная волна

Однако эти испытания продольной изоляции не гарантируют в полной мере электрическую прочность изоляции между катушками, слоями, витками и т. д. Для испытания продольной изоляции каждый новый тип трансформатора подвергают испытанию импульсным напряжением. В этом случае продольная изоляция обмоток подвергается примерно тем же воздействиям, которые могут возникать при перенапряжениях в условиях эксплуатации трансформатора. Импульсные испытания изоляции обычно проводят после испытания ее повышенным напряжением номинальной частоты при нагретом трансформаторе. При импульсных испытаниях на изоляцию воздействует полная и срезанная волны (рис. 69).

Импульсное испытательное напряжение при полной волне должно представлять собой импульс, характеризующийся быстрым увеличением напряжения (фронт волны) и последующим менее быстрым его уменьшением (хвост волны). Полная волна должна иметь длину фронта  $1,5 \pm 0,2$  мксек и длину волны  $40 \pm 4$  мксек. Длина срезанной волны 2 мксек.

Внутреннюю изоляцию полностью собранных трансформаторов подвергают импульсным испытаниям при отсутствии их собственного возбуждения. Допускается также испытание полной волной с возбуждением трансформатора до номинального напряжения при частоте 50 гц. При этом момент приложения импульса должен совпадать с амплитудой переменного напряжения обратной полярности с допускаемым отклонением  $\pm 3^\circ$ .

Внутренняя изоляция трансформаторов должна выдерживать без пробоя или повреждения испытание импульсами при трех приложениях полной или срезанной волны: полной волны с длиной фронта 1,5 мксек и длиной волны 40 мксек при возбужденном до номинального напряжения частотой 50 гц трансформаторе или при

невозбужденном трансформаторе; срезанной волны при возбужденном трансформаторе.

Внешняя изоляция полностью собранных трансформаторов должна при каждой полярности выдерживать испытание импульсами при трех приложениях полной и срезанной волн. Амплитуды напряжений импульсных испытаний трансформатора в зависимости от класса его напряжения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Амплитуда волны испытательного напряжения (максимальное значение), кВ	Класс напряжения (действующего), кВ								
	3	6	10	15	20	35	110	154	220
Внутренняя изоляция:									
при возбужденном трансформаторе и воздействии полной волны . . .	42	57	75	100	120	180	425	585	835
при невозбужденном трансформаторе и воздействии полной волны . . .	43,5	60	80	108	130	200	480	660	945
при невозбужденном трансформаторе и воздействии срезанной волны	50	70	90	120	150	225	550	760	1090
Внешняя изоляция:									
при воздействии полной волны . . .	42	57	75	100	120	185	460	630	900
при воздействии срезанной волны . . .	50	70	90	120	150	230	570	785	1130

### § 39. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

Измерение сопротивления обмоток трансформатора постоянному току входит в обязательный объем контрольных испытаний каждого выпускаемого с завода трансформатора. По результатам измерения сопротивления обмоток можно оценить качество соединений и паяк в обмотках, качество контактов переключателей, установить отсутствие обрывов в обмотках или отдельных параллельных ветвях. Сопротивление измеряют у всех обмоток (ВН, НН, СН) на всех доступных ответвлениях.

В трехфазных трансформаторах измеряют сопротивление каждой обмотки для всех трех фаз, для чего измеряют сопротивление между началом и концом каждой фазы. Если нет вывода нейтральной точки, сопротивление измеряют между линейными зажимами.

Сопротивление фазы  $r_{\phi} = \frac{r_{изм}}{2}$  при соединении обмоток в звезду и

$r_{\phi} = \frac{3 r_{изм}}{2}$  при соединении обмоток в треугольник, где  $r_{изм}$  — измеренное сопротивление обмотки.

Сопротивления обмоток различных фаз на одном и том же ответвлении не должны отличаться более чем на 2%. Если они отличаются в большей степени, это говорит о каком-либо дефекте

в токоведущей цепи — плохое качество соединения, пайки обмотки, контакта переключателя, обрыв параллельной ветви.

Измеренное сопротивление приводят к рабочей температуре обмотки трансформатора (75°С для масляных трансформаторов) по формуле

$$r_{75} = r_{изм} \cdot \frac{235+75}{235+T} = r_{изм} \cdot \frac{310}{235+T}$$

где  $T$  — температура обмотки при измерениях, принимаемая равной температуре верхних слоев масла или температуре окружающего воздуха.

Сопротивление обмоток трансформатора определяют по падению напряжения (показаниями амперметра и милливольтметра) и по мостовой схеме. Метод падения напряжения проще измерения по мостовой схеме и дает более быстрые, но менее точные результаты.

При измерении сопротивления обмоток по падению напряжения обмотку трансформатора

включают в сеть источника постоянного тока. Во избежание нагрева обмоток, вносящего ошибки в результаты измерений, ток при измерении сопротивления не должен превышать 20% номинального тока в обмотке. В зависимости от величины измеряемого сопротивления схема включения измерительных приборов будет различной.

При малом сопротивлении обмотки трансформатора вольтметр (милливольтметр) включают непосредственно на зажимы обмотки трансформатора (рис. 70, а). В этом случае сопротивление вольтметра очень велико по сравнению с сопротивлением обмотки трансформатора, так что можно пренебречь током через вольтметр. При большом сопротивлении обмотки трансформатора амперметр должен быть включен последовательно с обмоткой (рис. 70, б), чтобы через амперметр протекал ток, равный току в обмотке.

Сопротивление амперметра очень мало по сравнению с сопротивлением обмотки трансформатора и ошибка измерения будет мала. На практике сопротивление обмотки  $r_{изм}$  сопоставляют со средне-геометрическим значением сопротивлений амперметра  $r_a$  и вольтметра  $r_v$ . При сопротивлении обмотки трансформатора, меньшем средне-геометрического значения сопротивлений измерительных приборов ( $r_{изм} < \sqrt{r_a r_v}$ ), применяют схему, изображенную на рис. 70, а, а при  $r_{изм} > \sqrt{r_a r_v}$  — схему, показанную на рис. 70, б.

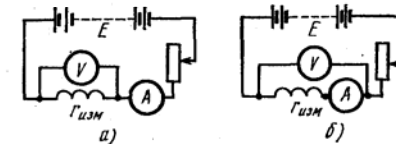


Рис. 70. Схема измерения сопротивления обмотки трансформатора: а — при малом сопротивлении, б — при большом сопротивлении



Сопротивление обмотки трансформатора

$$r_{\text{изм}} = \frac{U}{I},$$

где  $U$  — напряжение (по показанию вольтметра);  $I$  — сила тока (по показанию амперметра).

Когда требуется учитывать ток, протекающий через вольтметр при первой схеме,

$$r_{\text{изм}} = \frac{U}{I - \frac{U}{r_v}}$$

Если требуется учитывать сопротивление амперметра при второй схеме,

$$r_{\text{изм}} = \frac{U}{I} - r_a.$$

Сопротивление проводов, присоединяющих вольтметр к обмотке, не должно превышать 0,5% сопротивления обмотки этого прибора.

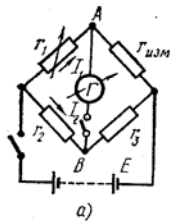
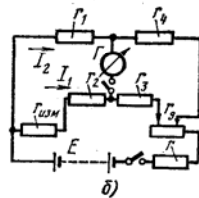


Рис. 71. Мостовая схема для измерения сопротивления обмотки трансформатора:  
а — обычная, б — двойная



Обмотки трансформаторов имеют значительную индуктивность, поэтому при подключении к источнику постоянный ток устанавливается в них не сразу, а в течение некоторого времени. Следовательно, в первый момент после включения в обмотке индуцируется сравнительно большая э. д. с., которая может вызвать повреждение вольтметра. Поэтому вольтметр включают после того, как стрелка амперметра станет неподвижно.

Сопротивления обмоток трансформатора можно измерить омметром. Однако такое измерение неточно и, если необходимо получить высокую точность измерения, его не применяют.

Мостовая схема для измерения сопротивления обмотки трансформатора изображена на рис. 71, а. При равенстве потенциалов точек А и В стрелка гальванометра стоит на нуле. Для этого должно быть соблюдено условие равенства падений напряжения как в сопротивлениях  $r_1$  и  $r_2$ , так и в сопротивлениях  $r_3$  и  $r_{\text{изм}}$ , т. е.  $I_1 r_1 = I_2 r_2$  и  $I_1 r_{\text{изм}} = I_2 r_3$ .

Отношение этих равенств равно

$$\frac{r_{\text{изм}}}{r_1} = \frac{r_3}{r_2}, \text{ откуда } r_{\text{изм}} = r_1 \frac{r_3}{r_2}.$$

Сопротивления  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  известны и одно из них (например,  $r_1$ ) можно регулировать в широких пределах. Это сопротивление устанавливают таким, чтобы показания гальванометра были равны нулю, после чего определяют искомое сопротивление обмотки.

При измерении сопротивлений обмоток малой величины применяют двойные мостовые схемы (рис. 71, б). На схеме является эталонным сопротивлением, с которым сравнивают измеряемое. Сопротивления  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  и  $r_4$  также известны и подбираются так, чтобы показания гальванометра были равны нулю, т. е.

$$I_1 r_{\text{изм}} + I_1 r_2 = I_2 r_1 \text{ и}$$

$$I_1 r_3 + I_1 r_4 = I_2 r_4,$$

$$\text{откуда } \frac{r_{\text{изм}} + r_2}{r_3 + r_4} = \frac{r_1}{r_4} \text{ и } r_{\text{изм}} = r_3 \frac{r_1}{r_4} + r_2 \frac{r_1}{r_4} - r_2.$$

Имея в виду, что

$$\frac{r_1}{r_4} = \frac{r_1}{r_3} = m \text{ и } r_3 \frac{r_1}{r_4} - r_2 = 0,$$

получим окончательно:

$$r_{\text{изм}} = \frac{r_1}{r_4} r_3 = m r_3.$$

При применении мостовой схемы обеспечивается высокая точность измерения сопротивления.

#### § 40. ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА НАГРЕВ

Тепловые испытания трансформатора проводят для определения превышения температуры его отдельных частей над температурой охлаждающей среды при номинальной нагрузке. При этом определяют температуры обмоток, магнитопровода и масла в трансформаторе при работе его на номинальную нагрузку. Кроме того, испытание трансформатора на нагрев дает возможность определить постоянную времени его нагрева, которая характеризует его тепловую инерцию. При тепловом испытании трансформатор нагревают методами непосредственной его нагрузки, взаимной нагрузки двух трансформаторов и проведения опыта короткого замыкания.

Для полной или хотя бы частичной нагрузки трансформатора большой номинальной мощности требуется значительная затрата энергии и громоздкое нагрузочное оборудование в виде реостатов или других каких-либо приемников энергии. Поэтому метод непосредственной нагрузки применяют только для трансформаторов небольшой мощности.

Метод взаимной нагрузки очень удобен, обеспечивает высокую точность и может быть использован для трансформаторов малых и больших мощностей. При этом необходимо иметь два одинаковых или близких по мощности трансформатора, которые включают на параллельную работу. При их параллельной работе создают такие условия (неравенство коэффициентов трансформации), при которых протекают уравнивающие токи, близкие к номинальным токам трансформаторов. Если имеются регулировочные отводы, позволяющие изменить напряжение в пределах

$\pm 5\%$  от номинального, уравнильный ток определяется разностью напряжений вторичных обмоток трансформаторов  $\Delta U$ , деленной на сумму их сопротивлений короткого замыкания  $z_{к1}$  и  $z_{к2}$ , т. е.

$$I_y = \frac{\Delta U}{z_{к1} + z_{к2}}$$

Если трансформаторы  $T_1$  и  $T_2$  включить так (рис. 72, а), чтобы у одного из них вторичное напряжение было выше, а у другого ниже номинального на 5%, то разность напряжений будет 10%.

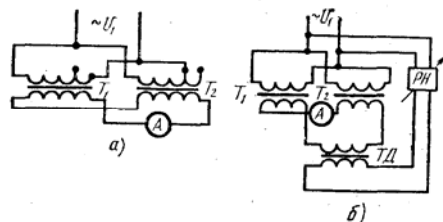


Рис. 72. Схема взаимной нагрузки двух трансформаторов:  
а — с регулировочными отводами, б — с дополнительным трансформатором

При напряжении короткого замыкания этих трансформаторов 5,5% уравнильный ток будет близок к номинальному току, т. е.

$$I_y = \frac{10}{2 \cdot 5,5} \cdot I_n = 0,91 I_n$$

Если регулировочных отводов нет, уравнильный ток при параллельном соединении одинаковых трансформаторов протекает под действием э. д. с. вторичной обмотки дополнительного трансформатора ТД, которая включается в цепь вторичных или первичных обмоток параллельно работающих трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  (рис. 72, б).

Первичную обмотку дополнительного трансформатора включают в сеть через какой-либо регулятор напряжения РН (регулируемый трансформатор, индукционный регулятор и т. д.), который позволяет установить величину уравнильного тока равной номинальному току трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$ . Дополнительный трансформатор должен быть рассчитан на номинальные токи испытываемых трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$ , а напряжение его обмоток — на удвоенное напряжение короткого замыкания этих трансформаторов.

Широко применяется нагрев трансформатора методом проведения опыта короткого замыкания. При опыте короткого замыкания устанавливают такой ток, при котором потери энергии в трансформаторе будут равны потерям при номиналь-

ной нагрузке. Этот ток несколько больше номинального, так как при опыте короткого замыкания напряжение мало и потери в стали магнитопровода также очень малы. Поэтому мощность  $P_{исп}$ , выделяющаяся в обмотках трансформатора при испытании его на нагрев, должна быть равна сумме потерь в обмотках при номинальной нагрузке  $P_{кн}$  и в стали магнитопровода  $P_{ст}$ . Например, трансформатор номинальной мощности 160 кВа с напряжением обмоток 35 и 10,5 кВ имеет потери в стали 1500 Вт и потери в обмотках 4100 Вт. Так как потери пропорциональны квадрату тока, при тепловом испытании в этом случае необходим ток

$$I_{исп} = I_n \sqrt{\frac{P_{ст} + P_{кн}}{P_{кн}}} = I_n \sqrt{\frac{1500 + 4100}{4100}} = 1,17 I_n$$

где  $I_n$  — номинальный ток.

При применении этого метода трансформатор нагревается только за счет потерь в обмотках и распределение температуры при испытании отличается от распределения при номинальной нагрузке, что является причиной существенной неточности этого метода. Нагрев трансформатора по методу короткого замыкания производят обычно в случаях, когда потери в стали магнитопровода составляют не более 30% потерь в обмотках. При больших потерях в стали применение этого метода нежелательно, так как при испытании обмотки трансформатора будут значительно перегружены и возникнут искажения в распределении температуры трансформатора.

При применении опыта короткого замыкания испытание ведут до установившегося превышения температуры верхних слоев масла  $\theta'_m$  над температурой окружающего воздуха. После этого ток в обмотках уменьшают до номинального значения и через 30—45 мин, когда температура обмоток практически достигнет установившегося значения, определяют превышение температуры верхних слоев масла  $\theta'_m$  над температурой окружающей среды  $\theta_{окр}$ . Затем трансформатор отключают и измеряют среднюю температуру обмотки  $\theta_{обм}$ . Превышение средней температуры обмотки над температурой окружающего воздуха определяют по формуле

$$\theta_{обм} = \theta'_{обм} + \frac{\theta'_m - \theta'_m}{1,3} - \theta_{окр}$$

Коэффициент 1,3 приводит превышение температуры верхних слоев масла к среднему превышению температуры масла над температурой окружающего воздуха.

При тепловых испытаниях трансформаторов через равные промежутки времени записывают температуры обмоток, магнитопровода и масла. Температуру масла определяют термометром, обмоток — по методу сопротивления, магнитопровода — термопарами.

Температуру обмоток определяют по методу сопротивления следующим образом: измеряют сопротивление обмоток в холодном состоянии  $r_x$  при температуре, равной температуре охлаждающей среды  $T_{охл}$ . Затем измеряют сопротивление обмоток в нагретом