МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ 3484.2-98
(МЭК 76-2-93)

ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ

Допустимые превышения температуры и методы испытания на нагрев

ТРАНСФАРМАТАРЫ СІЛАВЫЯ

Дапушчальныя перавышенні тэмпературы і метады выпрабавання на нагрэў

Издание официальное

БЗ 3-2005

Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации
Минск

gost.e-ecolog.ru

ЕВРАЗИЙСКИЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ
И СЕРТИФИКАЦИИ (ЕАСС)

EURO-ASIAN COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY
AND CERTIFICATION (EASC)



МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТАНДАРТ

ГОСТ
3484.2-
98
(МЭК 76-2-93)

ТРАНСФАРМАТАРЫ СІЛАВЫЯ

Дапушчальныя перавышенні тэмпературы і метады выпрабавання на нагрэў

ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ

Допустимые превышения температуры и методы испытания на нагрев

Издание официальное

Минск
Госстандарт Республики Беларусь
2005

ПРЕДИСЛОВИЕ

1 РАЗРАБОТАН МТК 36; ОАО «Украинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт трансформаторостроения»

ВНЕСЕН Государственным комитетом стандартизации, метрологии и сертификации Украины

2 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 14 от 12 ноября 1998 г.)

Наименование государства	Наименование национального органа по стандартизации
Азербайджанская Республика	Азгосстандарт
Республика Беларусь	Госстандарт Республики Беларусь
Грузия	Грузстандарт
Республика Казахстан	Госстандарт Республики Казахстан
Кыргызская Республика	Кыргызстандарт
Республика Молдова	Молдовастандарт
Республика Таджикистан	Таджикстандарт
Республика Узбекистан	Узгосстандарт
Украина	Госстандарт Украины

3 ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ постановлением Госстандарта Республики Беларусь от 28 марта 2005 г. № 12 непосредственно в качестве государственного стандарта Республики Беларусь с 1 октября 2005 г.

4 Настоящий стандарт соответствует международному стандарту МЭК 76-2:1993 «Трансформаторы силовые. Превышение температуры» в части допустимых превышений температуры

5 ВЗАМЕН ГОСТ 3484.2-88

Информация о введении в действие (прекращении действия) настоящего стандарта и изменений к нему на территории указанных выше государств публикуется в указателях национальных (государственных) стандартов, издаваемых в этих государствах.

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания на территории Республики Беларусь без разрешения Госстандарта Республики Беларусь

СОДЕРЖАНИЕ

С.

Введение ... IV

1 Область применения ... 1

2 Нормативные ссылки ... 1

3 Обозначения трансформаторов по виду охлаждения ... 2

4 Допустимые превышения температуры ... 2

4.1 Общие положения ... 2

4.2 Стандартные допустимые превышения температуры ... 3

4.3 Изменения допустимых превышений температуры в условиях работы, отличающихся от нормальных ... 3

5 Испытания на нагрев ... 4

5.1 Объем и условия проведения испытаний ... 4

5.2 Методы испытаний на нагрев ... 6

5.3 Требования к измерению температуры ... 8

5.4 Определение средней температуры обмоток ... 10

5.5 Определение средней температуры обмотки перед отключением от источника питания ... 11

5.6 Поправки ... 11

Приложение А Переменная нагрузка. Математическая модель и испытания ... 13

Приложение Б Последовательность проведения испытаний ... 16

Приложение В Требования к средствам испытаний и точности измерений ... 19

Приложение Г Испытания на нагрев методом непосредственной нагрузки ... 22

Приложение Д Методика проведения испытания трансформаторов на нагрев ... 24

Приложение Е Измерения сопротивления обмоток методом наложения постоянного тока ... 30

Приложение Ж Приведение результатов испытаний на нагрев к номинальным условиям 35

Приложение К Методика пересчета потерь при испытании на нагрев многообмоточных трансформаторов ... 38

Приложение Л Термопары, применяемые для измерения температуры элементов трансформатора ... 42

Приложение М Испытания на нагрев трансформаторов с принудительной циркуляцией масла без собственной системы охлаждения ... 43

Приложение Н Испытания на нагрев масляных трансформаторов с номинальной частотой 60 Гц от источника с частотой 50 Гц ... 46

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий стандарт разработан на основе МЭК 76-2–1993 с целью прямого применения международного стандарта с дополнительными требованиями, отражающими потребности народного хозяйства.

Настоящий стандарт дополнен приложениями Б, В, Г, Е, Ж, Л, М, Н, содержащими положения ГОСТ 3484.2, которые облегчают применение настоящего стандарта.

Настоящий стандарт дополнен приложением К, в котором приведена методика пересчета потерь при испытании на нагрев многообмоточных трансформаторов.

Раздел, содержащий методы испытаний на нагрев, дополнен положениями об объеме и условиях проведения испытаний. Конкретизированы методы измерения температуры масла в верхних и нижних слоях, а также приведены методы измерения температуры элементов металлоконструкций.

ГОСТ 3484.2-98
(МЭК 76-2-93)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ

Допустимые превышения температуры и методы испытания на нагрев

POWER TRANSFORMERS

Permissible temperature rise and methods of test heat

Дата введения 2005-10-01

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящий стандарт устанавливает допустимые превышения температуры, требования к методам испытаний на нагрев, а также к измерению превышений температуры.

Стандарт распространяется на силовые трансформаторы по ГОСТ 11677.

Настоящий стандарт распространяется полностью или частично на специальные и многообмоточные трансформаторы, если это предусмотрено стандартами или техническими условиями на эти трансформаторы, или если на них нет отдельных стандартов.

2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 8.207-76 Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения

ГОСТ 3484.1-88 Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний

ГОСТ 8865-93 (МЭК 85-84) Система электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация

ГОСТ 11677-85 Трансформаторы силовые, Общие технические условия

ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91)* Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов

ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды

ГОСТ 30221-97 (МЭК 905-87) Руководство по нагрузке силовых сухих трансформаторов

ГОСТ 30297-95 Трансформаторы силовые сухие. Технические требования.

* На территории Республики Беларусь действует ГОСТ 14209-85.

Издание официальное

3 ОБОЗНАЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО ВИДУ ОХЛАЖДЕНИЯ

Трансформаторы следует обозначать в зависимости от применяемого вида охлаждения.

Условное обозначение вида охлаждения в обозначении типа трансформаторов должно включать ниже приведенные четыре буквы.

Первая буква обозначает внутреннюю охлаждающую среду, контактирующую с обмотками:

O — минеральное масло или синтетическая изолирующая жидкость с точкой воспламенения до 300 °С включительно;

K — изолирующая жидкость с точкой воспламенения более 300 °С;

L — изолирующая жидкость с неизмеряемой точкой воспламенения;

A — воздух;

G — газ.

Вторая буква обозначает вид циркуляции внутренней охлаждающей среды:

N — естественная циркуляция;

F — принудительная циркуляция;

D — принудительная циркуляция с направленным потоком охлаждающей среды.

Третья буква обозначает внешнюю охлаждающую среду:

A — воздух;

W — вода.

Четвертая буква обозначает вид циркуляции внешней охлаждающей среды;

N — естественная конвекция;

F — принудительная циркуляция (вентиляторы, насосы).

Для трансформаторов может быть предусмотрено несколько видов охлаждения. В этом случае в технических условиях и на табличке должна быть указана мощность для каждого вида охлаждения, при которой соблюдаются допустимые превышения температуры. Наибольшая мощность из указанных для видов охлаждения принимается за номинальную мощность трансформатора.

Различные виды систем охлаждения перечисляют в порядке возрастания их охлаждающей способности.

Примеры

ONAN/ONAF. Трансформатор имеет группу вентиляторов, которые могут быть включены в случае необходимости при высокой нагрузке. В обоих случаях циркуляция масла осуществляется только за счет термосифонного эффекта;

ONAN/OFAF. Трансформатор имеет охлаждающее устройство с насосами и вентиляторами, но в то же время сниженную мощность при естественном охлаждении.

4 ДОПУСТИМЫЕ ПРЕВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

4.1 Общие положения

За рабочую температуру отдельного элемента трансформатора принимают сумму температуры охлаждающей среды (окружающего воздуха или охлаждающей воды) и превышения температуры данного элемента трансформатора.

Для масляных трансформаторов, предназначенных для работы в нормальных условиях (температура охлаждающей среды и высота над уровнем моря по ГОСТ 11677), значения превышения температуры элементов трансформатора при испытаниях, проводимых в соответствии с разделом 5, не должны превышать значений, указанных в таблице 1.

Значения превышений температуры являются характеристиками трансформатора, гарантированными изготовителем и подтвержденными испытаниями при заданных условиях. Если

между изготовителем и потребителем не оговорены специальные условия работы, принимаются нормальные допустимые превышения температуры. В других случаях допустимые превышения температуры должны быть скорректированы в соответствии с 4.3.

Увеличение допустимых превышений температуры не разрешается.

4.2 Стандартные допустимые превышения температуры

Для трансформатора, имеющего обмотку с ответвлениями и диапазоном регулирования, превышающим ± 5 %, допустимые превышения температуры распространяются на все ответвления при соответствующих каждому ответвлению мощности, напряжении и токе.

В трансформаторах с концентрическими обмотками две или несколько обмоток допускается располагать одну над другой. Если эти обмотки идентичны, среднее арифметическое значение измеренных превышений их температур не должно быть выше значений, указанных в таблице 1. Если обмотки неидентичны, то метод оценки устанавливается по согласованию между изготовителем и потребителем.

Ниже приведенные допустимые превышения температуры установлены для трансформаторов с твердой изоляцией класса А, по ГОСТ 8865, погруженных в минеральное масло или синтетическую жидкость с точкой воспламенения не выше 300 °С.

Допустимые превышения температуры трансформаторов, имеющих изоляцию более высокого класса нагревостойкости, и (или) погруженных в жидкость с более высокой температурой воспламенения, следует устанавливать по согласованию между изготовителем и потребителем.

Допустимые превышения температуры для сухих трансформаторов с различными изоляционными системами — по ГОСТ 30297.

Таблица 1 — Допустимые превышения температур для масляных трансформаторов

Элементы трансформатора	Превышение температуры, °С
Масло в верних слоях	60
Обмотки:	
— при естественной или принудительной циркуляции с ненаправленным потоком масла,	65
— при принудительной циркуляции с направленным потоком масла.	70
Магнитная система, элементы металлоконструкции и соприкасающиеся изоляционные материалы	Температура ни в коем случае не должна достигать значения, при котором возможно повреждение самой магнитной системы, других элементов или соприкасающихся с ними изоляционных материалов

Примечание — Превышение температуры обмоток определяют методом изменения сопротивления обмоток постоянному току (превышение средней температуры обмоток) по 5.4.

Для трансформаторов большой мощности по согласованию между изготовителем и потребителем может быть проведено специальное испытание по приложению А.

4.3 Изменения допустимых превышений температуры в условиях работы, отличающихся от нормальных

4.3.1 Требования к сухим трансформаторам — по ГОСТ 30297

4.3.2 Масляные трансформаторы с воздушным охлаждением

Для силовых трансформаторов предельные значения температуры окружающей среды минус 25 °С и 40 °С. Для трансформаторов с воздушным охлаждением температура воздуха в месте установки не должна превышать:

30 °С среднемесячной температуры самого жаркого месяца;

20 °С среднегодовой.

Если трансформатор предназначен для работы при температуре охлаждающего воздуха, превышающей одно из указанных значений, то допустимые превышения температуры трансформатора должны быть уменьшены на число градусов повышения температуры охлаждающего воздуха. Числа следует округлять до ближайшего целого числа градусов.

Примечание — Среднемесячная температура: полусумма среднесуточных максимальной и минимальной температур определенного месяца в течение нескольких лет.

Среднегодовая температура:

1/12 суммы среднемесячных температур.

Для трансформаторов, предназначенных для работы на высоте более 1000 м над уровнем моря, но испытываемых на обычных высотах, допустимые превышения температуры, указанные в таблице 1, должны быть уменьшены на 1 °С:

— для трансформаторов с естественным воздушным охлаждением для каждых 400 м свыше 1000 м;

— для трансформаторов с принудительным воздушным охлаждением для каждых 250 м свыше 1000 м.

Если трансформаторы предназначены для работы на высоте ниже 1000 м, но их испытывают на высотах более 1000 м, измеренные превышения температуры должны быть снижены на вышеуказанные значения.

Значение корректировки из-за высоты округляют до целого числа градусов.

Если допустимые превышения температуры трансформатора уменьшены из-за повышенной температуры наружной охлаждающей среды, либо из-за установки на больших высотах, то это необходимо указать на табличке.

4.3.3 Масляные трансформаторы с водяным охлаждением

Нормальная температура охлаждающей воды, по ГОСТ 11677, не должна превышать 25 °С. Если температура охлаждающей воды больше, то допустимое превышение температуры трансформатора должно быть уменьшено на число градусов повышения температуры охлаждающей воды. Числа следует округлять до целого числа градусов.

Влияние отличающихся от нормальной температуры окружающей среды или высоты установки на качество воздушного охлаждения бака незначительно.

5 ИСПЫТАНИЯ НА НАГРЕВ

5.1 Объем и условия проведения испытаний

5.1.1 Испытания заключаются в нагреве трансформатора одним из методов по 5.2 и измерении превышения температур его элементов над температурой охлаждающей среды с целью проверки их соответствия нормам нагрева.

5.1.2 При испытании на нагрев определяют превышения температуры обмоток, а для масляных трансформаторов, кроме того и масла, в верхних слоях над температурой охлаждающей среды при номинальных условиях по нагреву и охлаждению.

Необходимость измерения превышений температуры поверхности магнитной системы, а также объем и методику этих измерений определяет разработчик трансформатора.

5.1.3 За номинальные условия охлаждения принимаются такие, которые соответствуют нормальным условиям работы трансформатора при следующих факторах внешней среды:

— температура охлаждающего воздуха от 10 до 40 °С, абсолютная погрешность ее определения ± 1 °С;

— температура охлаждающей воды у входа в охладитель от 5 до 33 °С, абсолютная погрешность ее определения ± 1 °С;

— относительная влажность воздуха от 45 % до 80 %, при температуре охлаждающего воздуха выше 30 °С относительная влажность не должна быть выше 70 %, абсолютная погрешность ее определения ± 5 %;

— атмосферное давление от 84,0 до 106,7 кПа (630 — 800 мм рт. ст.), абсолютная погрешность его определения в пределах ± 0,666 кПа (5 мм рт. ст.);

— высота установки над уровнем моря не более 1000 м, для трансформаторов класса напряжения 750—1150 кВ — не более 500 м, абсолютная погрешность ее определения ± 50 м;

— воздействия дождя, ветра, солнечной или другой радиации отсутствуют.

5.1.4 За номинальные условия по нагреву принимают такие, при которых потери в трансформаторе равны сумме потерь короткого замыкания $P_{кр}$, измеренные в опыте короткого замыкания на основном ответвлении и приведенные в соответствии с ГОСТ 3484.1 к номинальному току $I_{ном}$ и расчетной температуре $\theta_р$, и холостого хода P_0, измерениях в опыте холостого хода при номинальном напряжении $U_{ном}$.

Результаты испытаний распространяются на все последующие трансформаторы этого типа, имеющие потери не выше 1,1 ($P_{кр} + P_0$), а результаты, приведенные к нормированной стандартом или техническими условиями на отдельные типы трансформаторов сумме потерь короткого замыкания и холостого хода $P_{к.ном} + P_{0.\,ном}$ (без допуска) распространяются на все трансформаторы этого типа, имеющие потери не выше 1,1 ($P_{к.ном} + P_{0.\,ном}$).

При испытании трансформаторов по 5.2.2 допускается за номинальные условия по нагреву принимать такие, при которых потери в трансформаторе равны сумме потерь $P_{к.ном} + P_{0.\,ном}$ (без допуска).

Результаты испытаний распространяют на все трансформаторы этого типа, имеющие потери не выше 1,1 ($P_{к.ном} + P_{0.\,ном}$).

5.1.5 Для трансформаторов, заполненных маслом, допускается превышение температуры масла в верхних слоях определять при потерях, меньших чем $P_{кр} + P_0$, но равных не менее 80 % этого значения, а при мощности трансформатора выше 250 МВ · А по согласованию между изготовителем и потребителем при потерях в трансформаторе, равным, не менее 60 % ($P_{кр} + P_0$) (в указанных случаях полученное при испытаниях превышение температуры следует приводить к номинальным условиям по 5.1.4).

5.1.6 Определение превышений температуры каждой из обмоток и элементов металлоконструкций следует проводить в условиях, при которых токи в обмотках испытуемого трансформатора равны номинальным, а отклонение частоты от номинальной составляет ± 2 %.

Допускается превышение температуры каждой из обмоток и элементов металлоконструкций определять при токах в обмотках, отличных от номинальных, но равных не менее 90 % и не более 110 % от номинального; при мощности трансформатора выше 250 МВ · А по согласованию между изготовителем и потребителем при токах не менее 75 % номинального; для трансформаторов, заполненных маслом, — при токах, обеспечивающих суммарные потери $P_{кр} + P_0$.

Во всех случаях, когда токи в обмотках отличаются от номинального, полученные результаты следует приводить к номинальным условиям.

5.1.7 Определение превышения температуры поверхности магнитной системы следует проводить в условиях, когда к одной из обмоток подведено практически симметричное и синусоидальное номинальное напряжение при частоте, которая не должна отличаться от номинальной более чем на ± 1 %.

5.1.8 Испытание на нагрев трансформаторов мощностью не более 2500 МВ · А, имеющих обмотку с ответвлениями с диапазоном регулирования ± 5 %, следует проводить на основном ответвлении.

Испытание на нагрев трансформаторов мощностью более 2500 МВ · А с диапазоном регулирования ± 5 %, если между изготовителем и потребителем не оговорено иное, следует проводить на ответвлении с максимальным током.

Выбор ответвления для испытания автотрансформатора с ответвлениями зависит от их расположения.

5.1.9 Последовательность проведения испытаний на нагрев по приложению Б. Требования к средствам испытаний и точности измерений по приложению В.

5.2 Методы испытаний на нагрев

5.2.1 Метод непосредственной нагрузки

К одной из обмоток трансформатора подводят номинальное напряжение, вторую подключают к соответствующей нагрузке так, чтобы в ней установился номинальный ток, по приложению Г. Контроль теплового режима в процессе испытаний осуществляют путем измерения тока на стороне нагрузки и подведенного напряжения.

5.2.2 Метод короткого замыкания

5.2.2.1 Испытание проводят в два этапа:

— нагрев суммарными потерями;

— нагрев номинальным током.

5.2.2.2 Во время испытания на нагрев суммарными потерями в испытуемом трансформаторе одну из обмоток замыкают накоротко устройством с поперечным сечением не менее поперечного сечения закорачиваемой обмотки. Оставляя остальные обмотки разомкнутыми, ко второй обмотке подводят напряжение, частота которого не должна выходить за пределы ± 2 % номинальной, и регулируют его так, чтобы в обмотке установился ток, при котором потери в трансформаторе были бы равны суммарным потерям по 5.1.4.

Во время испытания необходимо вести контроль за температурой масла и охлаждающей среды.

Испытание следует продолжать до тех пор, пока контролируемое по Б.2 приложения Б превышение температуры масла изменяется менее чем на 1 °С в час в течение 3 ч.

Примечание — Требования к завершению испытания для масляных трансформаторов приведены в приложении Д.

5.2.2.3 Во время испытания на нагрев номинальным током, когда превышения температуры масла в верхних слоях и средней температуры масла определены, устанавливают ток, равный номинальному или в соответствии с 5.1.6 для данного сочетания обмоток (проведение испытания многообмоточного трансформатора по 5.2.2.5). Нагрев номинальным током продолжают в течение 1 ч при контроле за температурой масла и охлаждающей среды. Перед отключением определяют превышения температуры масла в верхних слоях, средней температуры масла, температуры элементов металлоконструкций и масла вблизи них над температурой охлаждающей среды.

Среднюю температуру обмоток определяют либо непосредственно после отключения трансформатора от источника питания, или в процессе испытания при измерении сопротивления обмоток методом наложения постоянного тока по приложению Е.

Среднюю температуру обмоток следует определять методом изменения сопротивления по 5.4.

При нагреве номинальным током температура масла падает. Поэтому измеренные значения температуры обмоток следует повысить на значение падения средней температуры масла в течение этого часа.

Скорректированное значение температуры обмотки за вычетом температуры охлаждающей среды, измеренной в конце периода нагрева суммарными потерями, принимается за превышение средней температуры обмотки.

Примечание — При переменной нагрузке превышение температуры обмоток $\Delta\theta_{обм}$ определяют по сумме превышения средней температуры масла над температурой охлаждающей среды $\Delta\theta'_{м.ср}$, измеренного в первой части периода испытания, и разности средней температуры обмотки $\theta_{обм}$ и средней температуры масла $\theta''_{м.ср}$, измеренных во второй части периода испытания (по пунктам А.2 и А.3 приложения А).

$$\Delta\theta_{обм} = \Delta\theta'_{м.ср} + \left(\theta_{обм} - \theta''_{м.ср}\right). \qquad (1)$$

5.2.2.4 Испытания на нагрев двухобмоточного трансформатора с диапазоном регулирования, превышающим ± 5 %, если между изготовителем и потребителем не оговорено иное, следует проводить на «ответвлении с максимальным током (по 5.1.8) и нагрев в течение последней части периода испытания по 5.2.2.3 проводить при токе, соответствующем току этого ответвления.

Суммарные потери, реализуемые в первой части испытания по 5.2.2.2, должны быть равны наибольшим суммарным потерям на каком-либо ответвлении, которым обычно является ответвление с максимальным током. Значения превышений температуры масла в верхних слоях и средней температуры масла, используемые при определении превышения температуры обмотки, должны соответствовать суммарным потерям этого ответвления. Значения превышений температур, измеренные в первой части периода испытаний при меньших суммарных потерях, должны быть пересчитаны по 5.6.

5.2.2.5 Испытания на нагрев многообмоточных трансформаторов, во время работы которых одновременно могут нагружаться более двух обмоток, следует проводить отдельно для каждой пары обмоток.

В первой части периода испытания потери в трансформаторе равны суммарным потерям, которые соответствуют номинальной мощности (или мощности ответвлений) во всех обмотках, если номинальная мощность одной обмотки равна сумме номинальных мощностей других обмоток.

В других случаях выбирают специальные режимы с различными сочетаниями нагрузки для каждой обмотки.

В случаях, когда номинальные мощности отдельных обмоток не позволяют проводить испытания трансформатора при суммарных потерях, превышение температуры масла в верхних слоях определяют в опыте, при котором ток протекает по парам обмоток, для которых суммарные потери наибольшие; измеренное при меньших потерях превышение температуры допускается приводить к номинальным условиям.

Превышение температуры обмотки над температурой охлаждающей среды следует определять при номинальном токе испытуемой обмотки (токе ответвления с максимальным током), *или в соответствии с* 5.1.6.

Превышение температуры обмотки при наиболее жестком для нее сочетании нагрузок в многообмоточном режиме следует рассчитывать по формуле Ж.2 приложения Ж путем приведения превышения температуры, полученного в парном режиме, к току, соответствующему по добавочным и вихревым потерям условиям наиболее тяжелого режима.

Выполнение пересчета потерь многообмоточного трансформатора по приложению К.

5.2.3 Метод взаимной нагрузки

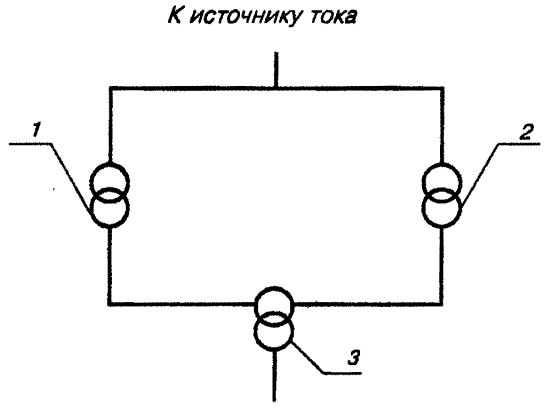
Испытуемый трансформатор *1* (рисунок 1) соединяют параллельно со вспомогательным трансформатором *2* мощностью не менее мощности испытуемого. Предпочтительно, чтобы номинальные напряжения и группы соединения обоих трансформаторов были одинаковыми. В контур обмоток высшего или низшего напряжения включают промежуточный трансформатор *3* мощностью не менее 2 $pU_к$, % (p — коэффициент, учитывающий падение напряжения на трансформаторе *3*, $U_к$ — напряжение короткого замыкания) мощности испытуемого трансформатора, а класс его напряжения и допустимый ток обмоток должны соответствовать тому контуру параллельно включенных обмоток, в который он включен.

К параллельно включенным трансформаторам подводят номинальное напряжение испытуемого трансформатора, а напряжение, подводимое к промежуточному трансформатору *3*, регулируют так, чтобы в обмотке испытуемого трансформатора *1*, соединенной непосредственно с трансформатором *2*, установился номинальный ток. Контроль теплового режима в процессе испытаний осуществляют путем измерения подведенного напряжения и токов в обмотках испытуемого трансформатора (без прямого измерения потерь).

Если напряжения обоих источников тока не синхронны, то необходимо, чтобы частота источника, питающего трансформатор *3*, отличалась на 2 — 4 Гц от частоты другого источника для исключения влияния биений на показания приборов.

При испытании трансформаторов и автотрансформаторов с большим количеством ответвлений для создания необходимого циркулирующего тока допускается не вводить в контур обмоток трансформатор *3*, а включать обмотки на разные ответвления, если при этом выполняются допустимые условия по 5.1.6.

Допускается напряжение разбаланса получать путем включения параллельно с трансформатором *1* вспомогательного трансформатора *2* с коэффициентом трансформации и группой соединения, отличными от трансформатора *1*.



1 — испытуемый трансформатор; *2* — вспомогательный трансформатор; *3* — промежуточный трансформатор

Рисунок 1 — Принципиальная схема испытания трансформаторов методом взаимной нагрузки

5.2.4 Метод условной нагрузки (по согласованию между изготовителем и потребителем)

Метод допускается применять для испытания сухих защищенных и незащищенных трансформаторов мощностью свыше 1000 кВ · А с естественным воздушным охлаждением, если располагают только одним испытуемым трансформатором или если применение методов по 5.3.1 и 5.3.3 ограничено возможностями испытательной установки.

Испытания проводят как два следующих один за другим нагрева: в режиме холостого хода по 5.1.7, при потерях холостого хода по 5.1.4 и в опыте короткого замыкания — при номинальном токе в обмотках.

5.3 Требования к измерению температуры

5.3.1 Термометры для измерения температуры

Для измерения температуры от 10 до 180 °С в разных точках трансформатора и охлаждающей среды следует применять термоэлектрические термометры (термопары), изготовленные в соответствии с приложением Л, ртутные и спиртовые термометры, электрические термометры сопротивления или другие термопреобразователи, равноценные по точности.

5.3.2 Измерение температуры охлаждающего воздуха

Во время испытания, особенно в последней четверти периода испытания, температура охлаждающего воздуха должна оставаться по возможности постоянной. Каждый термометр (спай термопары) следует помещать в наполненный жидкостью (трансформаторным маслом) сосуд, имеющий объем не менее 0,001 м^3. Поверхность сосуда должна хорошо отражать тепловое излучение, для чего ее покрывают, например, алюминиевой фольгой.

Следует использовать не менее трех термометров. За температуру охлаждающего воздуха во время испытаний следует принимать среднее арифметическое значение температур, измеренных этими термометрами через равные промежутки времени (не более 1 ч) в течение последней четверти периода испытаний.

Допускается использовать непрерывную автоматическую запись.

Термометры следует устанавливать в различных точках вокруг бака на расстоянии от 1 до 2 м от бака или охлаждаемой поверхности, чтобы избежать воздействия теплового излучения.

Вокруг трансформатора с естественным воздушным охлаждением термометры следует располагать примерно на середине его высоты.

Для трансформаторов с принудительной циркуляцией воздуха термометры устанавливают на входе в охладитель. При этом должна быть исключена возможность обратной циркуляции нагретого воздуха.

В случаях, когда имеется значительная обратная циркуляция нагретого воздуха, термометры следует устанавливать в тех местах вокруг трансформатора, где отсутствуют потоки обратной циркуляции воздуха, преимущественно со стороны трансформатора без охладителей.

5.3.3 Измерение температуры охлаждающей воды

Температура охлаждающей воды во время всего периода испытаний должна быть по возможности постоянной.

Температуру воды следует измерять на входе в охладитель, для чего термометр (спай термопары) помещают в гильзу, предназначенную для измерения температуры охлаждающей воды, предварительно заполненную водой или маслом. За температуру охлаждающей воды принимают среднее арифметическое значение, по крайней мере, трех измерений через равные промежутки времени (но не более 1 ч) в течение последней четверти периода испытаний или допускается непрерывная автоматическая запись.

5.3.4 Измерение температуры масла

5.3.4.1 Для трансформаторов с естественной циркуляцией масла температуру масла в верхних слоях измеряют термометром (термопарой), помещенным в гильзу, предназначенную для термометрического датчика и расположенную на крышке бака, или при установке охладителей отдельно от трансформатора в выходной трубе, по которой нагретое масло поступает в охладитель, возле ее присоединения к баку.

Баллон термометра (спай термопары) погружают в гильзу, предварительно заполненную маслом на глубину от 5 до 10 см ниже уровня крышки бака. Если конструкция гильзы имеет выступающие над крышкой бака части, то их следует покрывать теплоизолирующим материалом. Уровень масла в гильзе должен совпадать с уровнем масла в баке.

При испытании трансформаторов, которые не комплектуются гильзой для термометрического датчика, температуру масла в верхних слоях измеряют с помощью термопары, установленной в верхнем слое масла под крышкой бака на глубине не менее 10 см от ее поверхности.

Для трансформаторов с принудительной циркуляцией масла температуру входящего и выходящего из бака масла (масла в верхних и нижних слоях) измеряют с помощью термопар, спаи которых помещают в гильзы, расположенные на маслопроводе возле входа и выхода его из бака.

Для трансформаторов с принудительной циркуляцией масла, которые не комплектуются гильзами, а также для трансформаторов со съемными радиаторами, температуру масла в верхних и нижних слоях измеряют с помощью термопар, спаи которых заводят в маслопровод (патрубок) между фланцами с резиновыми прокладками в местах присоединения его к баку так, чтобы спай не касался поверхности металла.

Для трансформаторов с естественной и принудительной циркуляцией охлаждающего воздуха, имеющих трубчатые баки или баки с радиаторами без разъемов, температуру масла в верхних и нижних слоях измеряют с помощью термопар, установленных на наружной поверхности верхних и нижних частей охлаждающей трубки или верхнего и нижнего патрубка радиатора в местах их присоединения к баку, при этом трубка или радиатор должны быть расположены как можно ближе к середине рассматриваемой стороны бака.

Для трансформаторов с гладкими и волнистыми баками температуру масла в верхних и нижних слоях измеряют с помощью термопар, установленных на наружной поверхности бака на высотах, соответствующих верхнему и нижнему краям обмотки.

5.3.4.2 При испытаниях на нагрев за среднюю температуру масла принимается среднее арифметическое значение температур масла в верхних и нижних слоях, определяемых по 5.3.4.1.

Примечание — Для трансформаторов с естественным охлаждением мощностью до 2500 кВ · А, с гладкими, волнистыми и трубчатыми баками или с баками, имеющими радиаторы без соединителя, допускается принимать среднюю температуру масла равной 80 % температуры масла в верхних слоях.

5.3.5 Измерение температуры элементов металлоконструкций

Для измерения температуры поверхностей элементов металлоконструкций с помощью термопар их спаи припаивают, приваривают или запрессовывают в специальные отверстия.

Для измерения температуры поверхности бака и патрубков системы охлаждения спай термопары допускается приваривать или припаивать не к самой поверхности, а к тонкой металлической пластинке или фольге размерами не менее 2 × 2 см. Затем пластинку приклеивают или плотно прижимают к предварительно очищенной от краски поверхности, тщательно изолируют теплоизоляцией (асбест или резина) от окружающей среды.

Для измерения температуры масла вблизи элемента металлоконструкции термопарой ее спай закрепляют на расстоянии от 30 до 60 мм от места установки термопары на поверхности элемента металлоконструкции.

Для измерения температуры поверхности в верхней части магнитной системы спай термопары устанавливают между листами центрального пакета на глубину от 15 до 25 мм.

При испытании сухих трансформаторов для определения наступившего теплового равновесия устанавливают термопары в следующих местах:

— в центральной части верхнего ярма — для защищенных и незащищенных трансформаторов;

— в центре верхней части поверхности крышки и в центре боковой части поверхности герметичного кожуха — для герметичных трансформаторов и трансформаторов, полностью помещенных в герметичный кожух.

Места установки термопар на поверхностях элементов металлоконструкций, трасса их прохождения внутри бака, способ выведения из бака за пределы трансформатора должны быть определены разработчиком трансформатора.

5.4 Определение средней температуры обмоток

Среднюю температуру обмоток определяют методом измерения их сопротивления постоянному току по ГОСТ 3484.1. Для трехфазных трансформаторов измерение проводят на среднем стержне.

Отношение сопротивления R_2 при температуре θ_2 в градусах Цельсия к R_1 при температуре θ_1 в градусах Цельсия рассчитывают по формулам:

для меди
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1}; \qquad (2)$$

для алюминия
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{225 + \theta_2}{225 + \theta_1}. \qquad (3)$$

Примечание —

Индекс 1 — относится к измерениям сопротивления и температуры обмотки в холодном состоянии.

Индекс 2 — относится к измерениям сопротивления и температуры обмотки в горячем состоянии.

Сопротивление R_1 всех обмоток измеряют при установившейся температуре трансформатора, равной температуре окружающей среды, в соответствии с Б.9 и Б.10 приложения Б. Сопротивление R_2 измеряют при температуре, которую определяют по формуле:

для меди $$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1}(235 + \theta_1) - 235; \quad (4)$$

для алюминия $$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1}(225 + \theta_1) - 225. \quad (5)$$

Температура внешней охлаждающей среды в момент отключения от источника питания равна $\Delta\theta_{охл}$.

Конечное превышение температуры обмотки $\Delta\theta_{обм}$, °С, рассчитывают по формуле:

$$\Delta\theta_{обм} = \theta_2 - \theta_{охл}. \quad (6)$$

Сопротивления обмотки после отключения трансформатора от источника питания и нагрузки определяют по 5.5.

5.5 Определение средней температуры обмотки перед отключением от источника питания

При испытании на нагрев непосредственно перед отключением трансформатора необходимо определить среднюю температуру обмотки.

Сразу же после отключения трансформатора от источника питания измерительная цепь постоянного тока подключается к выводам обмотки фазы, сопротивление которой измеряют. Первое измерение сопротивления обмотки должно быть проведено в течение времени, достаточного для обратной экстраполяции к моменту отключения (обычно через 60—120 с после отключения).

Методика измерения сопротивления обмотки приведена в приложении Д.

5.6 Поправки

Если во время испытания не смогли получить заданные значения потерь или тока, то в результаты испытания следует внести поправки по следующим формулам. Они применимы для диапазона ± 20 % от заданного значения потерь и ± 10 % от заданного значения тока.

Полученное при испытании превышение температуры масла над температурой охлаждающей среды умножают на коэффициент, равный отношению

$$\left[\frac{\text{суммарные потери}}{\text{потери при испытании}}\right]^x, \quad (7)$$

где x принимается равным:

- 0,8 — для распределительных трансформаторов (естественная циркуляция масла, максимальная номинальная мощность 2500 кВ · А);
- 0,9 — для трансформаторов большой мощности с естественной циркуляцией масла в обмотках;
- 1,0 — для трансформаторов с принудительной циркуляцией масла и с принудительной циркуляцией масла с направленным потоком.

Полученное при испытании превышение средней температуры обмоток над средней температурой масла умножают на коэффициент, равный отношению

$$\left[\frac{\text{номинальный ток}}{\text{ток при испытании}}\right]^{y}, \qquad (8)$$

где y принимается равным:

1,6 — для трансформаторов с естественной и принудительной циркуляцией масла;

2,0 — для трансформаторов с принудительной циркуляцией масла с направленным потоком в обмотках.

Испытания на нагрев трансформаторов с принудительной циркуляцией масла без собственной системы охлаждения — по приложению М.

Испытания на нагрев масляных трансформаторов с номинальной частотой 60 Гц от источника с частотой 50 Гц — по приложению Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

ПЕРЕМЕННАЯ НАГРУЗКА. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ИСПЫТАНИЯ

А.1 Общие положения

Результаты испытаний на нагрев по 5.2 могут быть использованы для оценки превышения температуры в установившемся режиме при переменных нагрузках, а также для оценки превышения температуры в неустановившемся режиме (если известна тепловая постоянная времени трансформатора).

Для трансформаторов малой и средней мощности такая оценка производится в соответствии с обычной математической моделью, которая приведена в А.2 и А.3.

Для трансформаторов большой мощности достоверность этого метода ниже. Для таких трансформаторов при проведении анализа нагрузочной способности, например, в связи с аварийной перегрузкой свыше номинальной мощности, рекомендуется получить данные, относящиеся к конкретному трансформатору. Один из методов заключается в проведении специального испытания с переменной нагрузкой свыше номинальной мощности. Рекомендации по методике проведения испытаний, измерений и наблюдений — согласно А.4.

А.2 Математическая модель распределения температуры в обмотке масляного трансформатора. Понятие наиболее нагретой точки

Охлаждающее масло входит в нижнюю часть обмотки и имеет температуру нижнего слоя масла. Оно поднимается вверх по обмотке, и предполагается, что его температура повышается линейно по высоте обмотки. Тепло в обмотке передается от обмотки к маслу вдоль всей обмотки. Эта передача тепла характеризуется перепадом температуры между обмоткой и окружающим маслом, который, как предполагается, одинаков по всей высоте обмотки. На графике (рисунок А.1) температура обмотки и температура масла представлены двумя параллельными линиями.

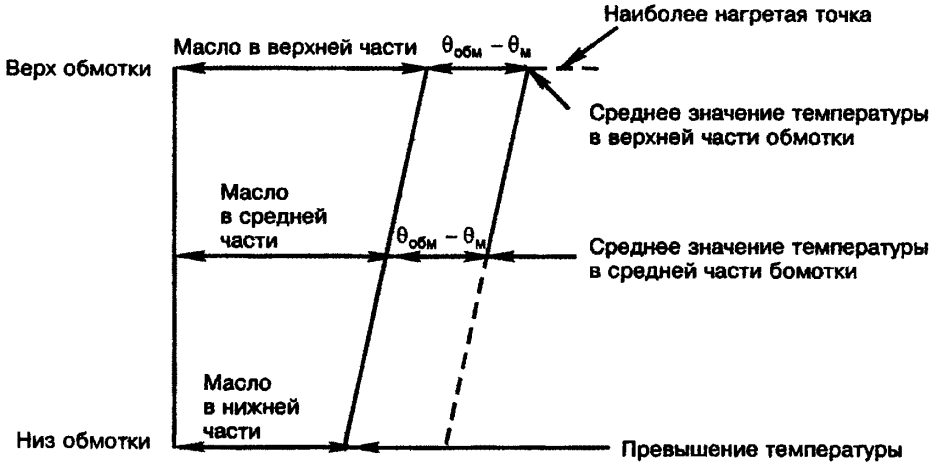


Рисунок А.1 — График распределения температуры

Предполагается, что максимальная температура, возникающая в любой точке обмотки (температура наиболее нагретой точки) указывает температурный предел нагрузки трансформатора. Как правило, другие части трансформатора, например, вводы, трансформаторы тока или устройства переключения ответвлений выбираются так, чтобы не ограничивать нагрузочную способность трансформатора.

В верхней части обмоток обычно имеет место концентрация потерь от вихревых токов, и обмотки могут иметь усиленную электрическую изоляцию, которая увеличивает тепловую изоляцию. Вот почему фактический перепад локальной температуры между проводником и маслом может быть выше «коэффициента наиболее нагретой точки». Этот коэффициент принимается равным от 1,1 — для распределительных трансформаторов до 1,3 — для силовых трансформаторов среднего габарита. В больших трансформаторах, в зависимости от типа конструкции, имеются расхождения, об этом изготовитель должен получить информацию до того, как будут проведены фактические измерения, например, в соответствии с А.4.

За разность температур обмоток и масла в установившемся режиме принимается разность между средней температурой обмоток, измеренной по сопротивлению, и средней температурой масла по 5.4 и 5.3 соответственно.

В установившемся режиме превышение температуры наиболее нагретой точки над температурой охлаждающей среды (воздух или вода) является суммой превышения температуры масла в верхних слоях над температурой охлаждающей среды и произведения коэффициента найболее нагретой точки на разность средних температур обмотки и масла.

Измеренные значения превышения температуры в установившемся режиме при определенной нагрузке используются для расчета соответствующих превышений температуры при переменной нагрузке посредством коэффициентов, приведенных в 5.6. Эти типичные значения подвержены изменениям и обоснованы с некоторой точностью только для ограниченного диапазона изменения нагрузки. В 5.6 приведены довольно узкие ограничения с целью оценки результатов испытаний, которые должны быть гарантированы. Для расчетов, требующих меньшей точности, с помощью показателей степени можно получить результаты для более широкого диапазона нагрузок.

А.3 Переменная нагрузка или охлаждение. Тепловые постоянные времени

Когда изменяется нагрузка или интенсивность принудительного охлаждения, температура обмоток и масла меняется с некоторой задержкой. Это обычно представляется с помощью двух постоянных времени. Одна из них отражает теплоемкость трансформатора в целом (теплоемкость массы масла играет роль доминанты). Она обычно составляет от 1 до 5 ч, меньше для мощных трансформаторов с принудительным охлаждением и больше для трансформаторов с естественным охлаждением. Другая постоянная времени имеет значение меньшего порядка, от 5 до 20 мин, и отражает процесс изменения разности температур обмотки и масла при изменении потерь вследствие рассеяния.

В неустановившемся режиме превышение температуры обмотки над температурой охлаждающего воздуха или воды определяется как сумма превышения температуры масла с большой постоянной времени и превышения температуры обмотки над температурой масла с малой постоянной времени. Математические модели изменения переходной температуры в зависимости от времени приведены в ГОСТ 14209 для масляных трансформаторов.

Математические модели для сухих трансформаторов представлены в ГОСТ 30221.

А.4 Рекомендации по испытаниям на нагрев при переменной нагрузке

По согласованию между изготовителем и потребителем допускается проводить испытания на нагрев с нагрузкой выше номинального тока в течение ограниченного периода времени. Такое испытание, например, может быть с целью имитации периода пиковой нагрузки в течение суток в аварийной ситуации.

Рекомендуемый график нагрузки представляет собой определенное значение тока, выраженное в долях номинального тока и с определенной продолжительностью, после чего испыта-

тельный ток отключается. В режиме короткого замыкания испытание проводят таким же образом, как и испытание в установившемся режиме при номинальной нагрузке. (Значение заданного тока нагрузки может быть выбрано с учетом потерь холостого хода).

Для проведения испытания необходимо указать следующие параметры:

— начальный температурный режим трансформатора: либо температуру охлаждающей среды, либо эту температуру с дополнительным ее повышением в установившемся режиме при токе заданной «предварительной нагрузки» в долях номинального тока;

— значение (постоянное) испытательного тока, выраженное кратным номинального тока, и его длительность;

— максимальное значение превышения температуры масла в верхних слоях и средней температуры обмоток (измеренное методом изменения сопротивления) в конце испытания. Это требование необязательное. Испытания проводят только для получения информации, без предварительного согласования предельно допустимых превышений температуры;

— специальные наблюдения или измерения, такие как: непосредственные измерения температуры наиболее нагретой точки, измерения превышения температуры стенки бака и возможные ограничения, связанные с ними.

Расчеты, касающиеся реальных циклов нагрузки, могут быть выполнены по методике, приведенной в ГОСТ 14200, с целью проверки их приближенной эквивалентности упрощенному циклу испытательной нагрузки через максимумы температуры. Должно быть оговорено — трансформатор на начало испытания имеет температуру окружающей среды, или температуру, соответствующую установившемуся режиму при токе заданной предварительной нагрузки. Ток выражают в долях номинального тока.

Температурные датчики устанавливают в тех же точках, что и при проведении испытания на нагрев в установившемся режиме. Температура масла и обмоток (среднее значение по изменению сопротивления) в момент отключения определяется стандартным методом.

По согласованию между изготовителем и потребителем внутри бака трансформатора могут быть использованы дополнительные температурные датчики. Если датчики установлены внутри обмоток для регистрации температуры наиболее нагретой точки, рекомендуется использовать несколько датчиков одновременно. Это необходимо потому, что заранее неизвестно точное место нахождения наиболее нагретой точки. Локальная температура может меняться от точки к точке, а также с течением времени, в зависимости от изменения потока масла. Необходимо также признать, что действительная измеренная локальная температура в мощных трансформаторах может заметно отличаться от расчетной, полученной в соответствии с принятыми математическими моделями по А.2 и в ГОСТ 14209.

До накопления достаточного опыта проведения измерений в трансформаторах аналогичной конструкции испытания следует проводить как исследования.

С целью снижения риска повреждения трансформаторов во время испытания может осуществляться контроль за локальной температурой бака и электрических соединений. Измерение температуры элементов металлоконструкций внутри трансформатора с помощью временно установленных датчиков может служить тем же целям.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Б.1 Испытанию на нагрев подвергают полностью собранные трансформаторы. Допускается не монтировать элементы, не влияющие на тепловой режим трансформатора, например, искровые промежутки на вводах.

Трансформаторы следует испытывать с собственной системой охлаждения.

Трансформаторы с принудительной циркуляцией масла допускается испытывать на нагрев, подключая к трансформатору стационарную испытательную систему охлаждения вместо его собственной. В этом случае превышения температуры масла в верхних слоях и средней температуры масла определяют расчетом по результатам испытания охладителей отдельно от трансформатора. При проведении этих испытаний следует руководствоваться указаниями в соответствии с приложением М.

По выбору изготовителя трансформаторы испытывают одним из методов по 5.2.1; 5.2.2; 5.2.3 для масляных трансформаторов и по 5.2.1; 5.2.3; 5.2.4 — для сухих трансформаторов.

Для ускорения нагрева допускается в начале испытания при включении с холодного состояния устанавливать в обмотках увеличенный ток, но не более 150 % номинального тока в течение от 2 до 3 ч для масляных трансформаторов и в течение не более 1 ч — для сухих трансформаторов. Допускается ухудшать условия охлаждения, отключать часть охладителей или всю систему охлаждения. По достижении 70 % ожидаемого конечного превышения температуры контролируемого элемента, должны быть включены отключенные охладители и восстановлены номинальные условия охлаждения и нагрузки.

При испытании сухих трансформаторов продолжительность теплового режима с установленными испытательными токами в обмотках может быть сокращена, если предварительно, до установления токов, провести их нагрев в опыте холостого хода в течение не менее 12 ч.

Указанные мероприятия допускаются, если они не противоречат требованиям технической документации на трансформатор.

Б.2 В процессе испытания для определения его продолжительности необходимо контролировать:

— превышения температур поверхности магнитной системы или кожуха (для трансформаторов, полностью помещенных в герметичный кожух) и обмоток (при их измерении наложенным постоянным током) над температурой охлаждающего воздуха — для сухих трансформаторов;

— превышение температуры масла в верхних слоях над температурой охлаждающей среды — для масляных трансформаторов;

— превышение температуры поверхности магнитной системы над температурой масла в верхних слоях — для масляных трансформаторов, испытываемых в опыте холостого хода.

Б.3 Испытания следует продолжать до установившегося теплового режима, когда контролируемое по Б.2 превышение температуры изменяется не более чем на 1 °С в час в течение не менее 3 ч, при этом конечное превышение температуры масла в верхних слоях определяют в соответствии с рисунком Д.1 приложения Д.

Б.4 При испытаниях по методу непосредственной нагрузки и методу взаимной нагрузки нагрев продолжают до достижения установившегося теплового режима по Б.3, после чего определяют превышение температуры масла в верхних слоях, поверхности магнитной системы, элементов металлоконструкций и превышения средней температуры обмоток (при измерении их сопротивлений наложенным постоянным током) над температурой охлаждающей среды.

Если измерение сопротивлений обмоток проводят после отключения трансформатора от источника питания, то для определения превышения температуры второй обмотки (последующих обмоток) следует повторить нагрев в течение не менее 2 ч.

Б.5 При испытании масляных трансформаторов по 5.2.2 на первом этапе испытаний контроль теплового режима допускается осуществлять путем измерения тока (без прямого измерения потерь), при этом устанавливают ток I^1, рассчитываемый по формуле:

$$I^1 = I_{ном} \cdot \sqrt{\frac{\Sigma P}{P_{кр}}}, \qquad (Б.1)$$

где ΣP — суммарные потери, Вт;

$P_{кр}$ — потери короткого замыкания, Вт (по ГОСТ 3484.1).

По достижении установившегося теплового режима определяют превышения температуры масла в верхних слоях и его средней температуры над температурой охлаждающей среды.

На втором этапе испытаний перед отключением определяют среднюю температуру обмоток (при их измерении наложенным постоянным током) и превышения температуры элементов металлоконструкций над температурой охлаждающей среды, а после отключения определяют среднюю температуру одной из обмоток по Д.2 приложения Д, если она не измерялась наложенным постоянным током в процессе испытания.

Если среднюю температуру обмоток определяют в двух или нескольких последовательных режимах нагрева номинальным током, то для определения превышения температуры второй обмотки (последующих обмоток) следует повторить нагрев трансформатора суммарными потерями в течение не менее 2 ч. После этого установить в обмотке номинальный ток и продолжить нагрев в течение не менее 1 ч, после чего определить превышение температуры второй обмотки (последующей обмотки).

Если среднюю температуру обмоток измеряют в процессе нагрева методом наложения постоянного тока на ток нагрузки в соответствии с приложением Е, то повторные включения не требуются.

Определение превышения температуры поверхности магнитной системы следует определять в опыте холостого хода в соответствии с 5.1.4 и 5.1.7.

Б.6 При испытании в опыте холостого хода в трансформаторах с принудительной циркуляцией воздуха и масла (в том числе с направленным движением масла) оставляют работающими насосы группы холостого хода, обеспечивающие движение масла в баке трансформатора. При этом рекомендуется оставлять работающей такую часть вентиляторов системы охлаждения, при которой можно получить температуру масла, примерно равную полученной при нагреве в опыте короткого замыкания.

Б.7 Для масляных трансформаторов, испытуемых методом короткого замыкания и холостого хода, при определении превышений температуры обмоток, элементов металлоконструкций, поверхности магнитной системы в результаты испытаний следует вносить поправки в соответствии с 5.6 и приложением Ж. Эти поправки обусловлены различием средней температуры масла, температуры масла вблизи элементов металлоконструкций и масла в верхних слоях в опыте короткого замыкания при суммарных потерях и в опытах короткого замыкания при номинальном токе, и в опытах холостого хода — при номинальном напряжении или при нормированных потерях $P_{0ном}$.

Б.8 При испытании сухих трансформаторов по 5.2.4 нагрев в режиме холостого хода продолжают до получения установившегося теплового состояния по Б.3 и затем измеряют превышения температуры магнитной системы $\Delta\theta'_{маг}$ и обмоток $\Delta\theta'_{обм}$. Непосредственно после испытания в режиме холостого хода проводят испытание в опыте короткого замыкания. Испытание продолжают до получения установившегося теплового состояния по Б.3, после чего повторно измеряют превышения температур магнитной системы $\Delta\theta''_{маг}$ и обмоток $\Delta\theta''_{обм}$.

Б.9 За среднюю температуру обмоток сухого трансформатора в холодном состоянии — θ_1, находящегося не менее 16 ч в помещении при естественно изменяющейся температуре охлаждающего воздуха не более на 1 °С в час, не включавшегося и не подвергавшегося нагреву от

стороннего источника тепла за это время, следует принимать среднее арифметическое значение показаний двух термометров, установленных у верхнего и нижнего краев боковой поверхности одной из наружных обмоток (для трехфазных трансформаторов — фазы В).

Для сухих герметичных трансформаторов и трансформаторов, полностью помещенных в герметичный кожух, при вышеуказанных условиях за среднюю температуру обмоток θ_1 допускается принимать среднее арифметическое значение показаний двух термопар (термометров), установленных у верхнего и нижнего краев боковой поверхности кожуха.

Найденная средняя температура обмоток в холодном состоянии при изменении температуры охлаждающего воздуха не более чем на 1 °С в час должна быть равна температуре охлаждающего воздуха, измеренной в соответствии с 5.3.2 с предельными отклонениями ± 2 °С.

Б.10 За среднюю температуру обмоток θ_1 масляного трансформатора при измерении их сопротивлений в холодном состоянии принимают среднюю температуру масла, измеренную в соответствии с 5.3.4.2.

Для трансформаторов, не включавшихся и не подвергавшихся нагреву в течение не менее 20 ч, измерение сопротивлений обмоток в холодном состоянии следует проводить не ранее чем через 6 ч после заливки трансформатора маслом при средней температуре масла не более 40 °С.

При заливке трансформатора горячим маслом или, если он предварительно нагревался для более быстрого достижения условий для измерения R_1 и θ_1, допускается включать систему охлаждения. В этом случае измерения R_1 и θ_1 проводят не ранее чем через 1 ч после отключения системы охлаждения (циркуляция масла при этом не прекращается).

Б.11 Для измерения превышения температуры обмоток, не имеющих внешних присоединений, если программой испытаний предусматривается измерение их температуры отдельно от обмоток, к которым они присоединены, на период испытаний следует установить дополнительный зажим (зажимы), к которому присоединяют отвод указанной обмотки.

Б.12 Определение среднего нагрева обмотки, состоящей из обмоток фаз (стержней), допускается проводить на обмотке фазы (среднего стержня) или на обмотках двух фаз (крайнего и среднего стержней), соединяемых при измерении сопротивления последовательно, если это позволяет схема соединения обмоток. Полученный результат распространяется на всю обмотку, если расчетный нагрев обмоток одного напряжения всех фаз (стержней) одинаков.

В трансформаторе с принудительной циркуляцией с направленным потоком масла измерения среднего превышения температуры обмоток следует проводить на обмотках всех фаз (стержней).

Б.13 Испытания на нагрев трансформаторов с расщепленными обмотками низшего напряжения допускается проводить, соединив их части последовательно или параллельно так, чтобы токи в обмотках были номинальными или в соответствии с 5.1.6.

За среднее превышение температуры обмотки низшего напряжения допускается принимать среднее арифметическое значение превышений температур ее частей, измеренных раздельно.

Б.14 Испытания трансформаторов номинальной частотой 60 Гц от источников частотой 50 Гц — по приложению Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(рекомендуемое)

ТРЕБОВАНИЯ К СРЕДСТВАМ ИСПЫТАНИЙ И ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

В.1 Испытания, контроль параметров испытательных режимов (потерь, тока, напряжения, частоты) и измерение сопротивления обмоток постоянному току должны проводиться с использованием схем, средств испытаний и измерений в соответствии с ГОСТ 3484.1, обеспечивающих испытательные режимы при однофазном и трехфазном практически симметричном и синусоидальном напряжении номинальной частоты при номинальных нагрузках с максимально допустимыми неисключенными погрешностями измерения потерь $\beta_w = \pm 3{,}3$ %, тока $\beta_I = \pm 1{,}5$ %, напряжения $\beta_U = \pm 1{,}5$ %, частоты $\beta_f = \pm 0{,}5$ %.

В схемах испытания с напряжением более 35 кВ для измерения тока, напряжения, потерь допускается использовать измерительные трансформаторы класса точности не ниже 0,5.

Для измерения сопротивления обмоток постоянному току допускается применять одинарно-двойной мост класса точности не ниже 0,1; амперметр и вольтметр класса точности не ниже 0,2. При определении сопротивления обмотки путем измерения падения напряжения на обмотке и эталонном резисторе следует применять вольтметр класса точности не ниже 0,2 и образцовый резистор, соответствующий классу точности не ниже 0,2 (допускается применять самопишущий потенциометр класса точности не ниже 0,5). Во всех случаях неисключенная погрешность измерения сопротивления обмоток постоянному току β_R должна составлять ± 1 %.

В.2 Для измерения температуры масла и охлаждающей среды следует применять термометры с ценой деления 0,1 °С.

Допускается применять стеклянные спиртовые и ртутные термометры, которые имеют шкалы от 0 до 100 °С, цену деления не более 1 °С и допускаемые погрешности показаний ± 1 °С.

Во всех случаях неисключенная погрешность измерения температуры $\delta\theta_T$ должна составлять ± 1 °С.

Границы относительной неисключенной погрешности измерения температуры какого-либо элемента трансформатора β_{θ_T}, температуры масла в верхних слоях $\beta_{\theta_м}$ и температуры охлаждающей среды $\beta_{\theta_{охл}}$ в процентах определения температур какого-либо элемента трансформатора θ_T, масла в верхних слоях $\theta_м$ и охлаждающей среды $\theta_{охл}$ следует определять по формуле:

$$\beta_{\theta_T} = \beta_{\theta_м} = \beta_{\theta_{охл}} = \pm \frac{\delta\theta_T \cdot 100}{\Delta\theta_i}, \qquad (В.1)$$

где $\Delta\theta_i$ — нормируемое превышение температуры испытуемого элемента трансформатора, °С;

i — условное обозначение испытуемого элемента трансформатора.

В.3 При измерении температуры масла, охлаждающей среды, элементов металлоконструкций с помощью термопар класс точности применяемого с ними прибора (милливольтметра или потенциометра) должен быть не ниже 0,5, а его внутреннее сопротивление должно превышать сопротивление термопары не менее чем в 200 раз.

Доверительные границы неисключенной абсолютной погрешности измерения температуры $\delta\theta_T$ в этом случае необходимо определять следующим образом:

— по измеренной прибором термоЭДС $U_{Tп}$ с учетом границ допускаемой абсолютной погрешности прибора $\pm \delta U_п$ следует определить ее возможные границы $U_п^+$ і $U_п^-$ по формулам:

$$U_п^+ = U_{Tп} + \delta U_п \text{ і } U_п^- = U_{Tп} - \delta U_п; \qquad (В.2)$$

— по градуировочной зависимости $U_п = f(\theta_T)$ следует определить возможные значения температуры θ^+_T і θ^-_T, соответствующие значениям термоЭДС $U_п^+$ и $U_п^-$;

— абсолютная неисключенная погрешность измерения температуры $\delta\theta_T$ равна полуразности температур θ^+_T и θ^-_T и должна быть ± 1 °С, а границы относительной неисключенной погрешности β_{θ_T} измерения температуры какого-либо элемента трансформатора θ_T следует определять по формуле В.1.

В.4 При определении превышения температуры масла в верхних слоях $\Delta\theta_м$, средней температуры масла $\Delta\theta_{м.ср}$, температуры элементов металлоконструкций $\Delta\theta_к$, температуры обмоток $\Delta\theta_{обм}$ и поверхности магнитной системы $\Delta\theta_{маг}$ над температурой охлаждающей среды оценку доверительных границ неисключенной систематической погрешности результата измерений следует проводить в процентах в соответствии с ГОСТ 8.207.

В.4.1 Для $\Delta\theta_м$ и $\Delta\theta_{м.ср.}$ доверительные границы результирующих погрешностей $\beta_{\Delta\theta_м}$ и $\beta_{\Delta\theta_{м.ср.}}$ в общем случае следует рассчитывать по формуле:

$$\beta_{\Delta\theta_м} = \beta_{\Delta\theta_{м\,ср}} = \pm 1{,}1\sqrt{\beta^2_{\theta_м} + \beta^2_{\theta_{охл}} + \beta^2_{\theta_w} + \beta^2_{\theta_I} + \beta^2_{\theta_U} + \beta^2_{\theta_f}}\,, \qquad (В.3)$$

где $\beta_{\theta_{охл}}$ — относительная неисключенная погрешность определения температуры охлаждающего его воздуха, следует определять по формуле В.1, %;

β_{θ_w} — относительная неисключенная погрешность, вносимая при контроле режима по потерям, которая принимается равной β_w, %;

β_{θ_I} — относительная неисключенная погрешность, вносимая при контроле режима по току, которая принимается равной $\sqrt{2}\cdot\beta_I$, %;

β_{θ_U} и β_{θ_f} — относительные неисключенные погрешности, вносимые при контроле режима по напряжению, обусловленные погрешностями измерения напряжения и частоты, которые принимают равными соответственно β_U і β_f, %.

При расчете погрешности по формуле В.3 в зависимости от параметра, по которому контролируется тепловой режим, следует принимать:

$\beta_{\theta_I} = \beta_{\theta_U} = \beta_{\theta_f} = 0$ — при контроле режима по потерям;

$\beta_{\theta_w} = \beta_{\theta_U} = \beta_{\theta_f} = 0$ — при контроле режима по току;

$\beta_{\theta_U} = \beta_{\theta_f} = 0$ — при испытаниях суммарными потерями по 5.2.2 и контроле режима по току;

$\beta_{\theta_I} = \beta_{\theta_w} = 0$ — при контроле режима по напряжению.

В.4.2 Для $\Delta\theta_к$ доверительные границы погрешности следует рассчитывать по формуле:

$$\beta_{\Delta\theta_к} = \pm 1{,}1\sqrt{\beta^2_{\theta_к} + \beta^2_{\theta_{мк}} + \beta^2_{\theta_{охл}} + \beta^2_{\theta_I} + \beta^2_{\theta_{fном}}}\,, \qquad (В.4)$$

где $\beta_{\theta_к}$, $\beta_{\theta_{мк}}$, $\beta_{\theta_{охл}}$ — относительные неисключенные погрешности измерения температур элементов металлоконструкций $\theta_к$, масла вблизи элементов металлоконструкций $\theta_{мк}$ и охлаждающей среды $\theta_{охл}$, которые равны β_{θ_T} и определяются по формуле В.1, %;

$\beta_{\theta_{fном}}$ — относительная погрешность, обусловленная отклонением частоты от номинальной, принимается равной $\sqrt{2}\cdot\sqrt{(\beta'_f)^2} + \beta^2_f$, ($\beta'_f$ — отклонение частоты от номинальной при испытаниях), %.

В.4.3 Для $\Delta_{\theta_{обм}}$ доверительные границы погрешности $\beta_{\Delta\theta_{обм}}$ следует рассчитывать по формуле:

$$\beta_{\Delta\theta_{обм}} = \pm 1{,}1\sqrt{\beta^2_{\theta_{(R_2/R_1)}} + \beta^2_{\theta_{м.ср}} + \beta^2_{\theta_{охл}} + \beta^2_{\theta_I} + \beta^2_{\theta_{I_n}}}\,, \qquad (В.5)$$

где $\beta_{\theta_{R_1/R_2}}$ — неисключенная относительная погрешность, обусловленная погрешностью определения отношения сопротивлений обмотки в горячем и холодном состояниях, которая принимается равной ± 2, 5%;

$\beta_{\theta_{м.ср}}$ — относительная неисключенная погрешность измерения средней температуры масла $\theta_{м.ср}$, которая принимается равной β_{θ_T} и определяется по формуле В.1, %;

$\beta_{\theta_{In}}$ — погрешность, обусловленная наложением постоянного измерительного тока на ток нагрузки, которая имеет место при измерениях методом наложения, принимается равной $\sqrt{2} \cdot \beta_{\theta_{In}}$, %, где β_{In} — отношение постоянного измерительного тока к току нагрузки.

В.4.4 Для $\Delta\theta_{маг}$ доверительные границы погрешности следует рассчитывать по формуле:

$$\beta_{\Delta\theta_{маг}} = \pm 1{,}1\sqrt{\beta^2_{\theta_{маг}} + \beta^2_{\theta_м} + \beta^2_{\theta_{охл}} + \beta^2_{\theta_U} + \beta^2_{\theta_{f\,ном}}}, \qquad (В.6)$$

где $\beta_{\theta_{маг}}$ — неисключенная относительная погрешность измерения температуры поверхности магнитной системы $\theta_{маг}$, которая равна β_{θ_T} и определяется по формуле В.1, %.

При испытаниях методом непосредственной нагрузки и методом взаимной нагрузки, а также при испытании сухих трансформаторов составляющая $\beta_{\theta_м}$ из формулы исключается.

Найденные по формулам В.3—В.6 доверительные границы неисключенных систематических относительных погрешностей определения $\Delta\theta_м$, $\Delta\theta_{м.ср}$, $\Delta\theta_к$, $\Delta\theta_{обм}$ должны быть ± 5 %, а $\Delta\theta_{маг}$ — ± 4 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(рекомендуемое)

ИСПЫТАНИЯ НА НАГРЕВ МЕТОДОМ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ НАГРУЗКИ

Г.1 Этот метод следует применять при изменяющейся температуре охлаждающей среды.

Г.2 Регулирование подводимого напряжения и нагрузки проводят в соответствии с 5.2.1.

Г.3 В процессе испытаний проводят измерения через равные промежутки времени, но не более чем через 1 ч: тока I, напряжения U, температуры масла в верхних слоях $\theta'_{м}$, магнитной системы $\theta'_{маг}$, охлаждающей среды $\theta'_{охл}$ и средних температур обмоток $\theta'_{обм}$ при их измерении наложенным постоянным током.

Время выполнения серии последовательных измерений выбирают таким образом, чтобы они проводились в течение промежутка времени (около 1 ч), когда температура масла в верхних слоях изменялась бы не более чем на 1,5 °С и чтобы длительность испытательного режима до выполнения последних измерений была бы не меньше учетверенного значения постоянной времени нагрева трансформатора 4Т.

Примечание — Если измерение средней температуры обмоток не может быть произведено под нагрузкой, то настоящий метод используют для определения превышений температуры масла, магнитной системы и элементов металлоконструкций.

Г.4 Установившееся превышение температуры какого-либо элемента трансформатора $\Delta\theta_i$ над температурой охлаждающей среды $\Delta\theta_э$ рассчитывают по формуле:

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_э, \qquad (Г.1)$$

где θ_i — среднее арифметическое значение температуры, вычисленное по результатам измерений в последний час испытательного режима, °С;

$\theta_э$ — эквивалентная температура охлаждающей среды, которую определяют по формуле Г.3.

Установившееся превышение температуры какого-либо элемента трансформатора $\Delta\theta_i$ над средней температурой $\Delta\theta'_i$, °С, рассчитывают по формуле:

$$\Delta\theta'_i = \theta_i - \theta_{м\,ср}, \qquad (Г.2)$$

где θ_i, $\theta_{м.\,ср}$ — средние арифметические температуры, вычисленные по результатам измерений в последний час испытательного режима, °С.

Г.5 Эквивалентную температуру охлаждающей среды $\theta_э$, °С, рассчитывают по формуле:

$$\theta_э = \theta'_к - \delta, \qquad (Г.3)$$

где $\theta'_к$ — конечная температура охлаждающей среды, измеренная в конце испытательного режима, °С;

δ — поправка на постоянную времени трансформатора, которая учитывает запаздывание во времени в изменении температуры масла по отношению к изменению температуры охлаждающей среды; ее рассчитывают по формуле:

$$\delta = \frac{T}{\Delta t}\left(э^{\frac{\Delta t}{T}} - 1\right)\sum_{i=1}^{P}\Delta\theta_i \cdot э^{-\frac{(P+1-i)\Delta t}{T}}, \qquad (Г.4)$$

где T — постоянная времени нагрева трансформатора;

Δt — интервал времени между последующим и предыдущим измерениями температуры охлаждающей среды;

$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1}$ — алгебраическая разность между последующим и предыдущим результатами измерений температуры охлаждающей среды, °С;

P — порядковый номер последнего измерения;

i — порядковый номер измерения, начиная со второго измерения на первом интервале.

При форсировании нагрева трансформатора за начало испытаний ($t = 0$) принимают момент времени, когда в трансформаторе установлены ток и условия охлаждения, соответствующие заданному испытательному режиму.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(рекомендуемое)

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА НАГРЕВ

Д.1 Завершение испытания в установившемся режиме

Условные обозначения

θ — температура, °С;

$\theta(t)$ — температура масла, меняющаяся с течением времени (это может быть температура масла в верхних слоях или средняя температура масла);

$\theta_{охл}$ — температура наружной охлаждающей среды (окружающий воздух или вода), которую принято считать постоянной;

$\Delta\theta$ — превышение температуры масла над $\theta_{охл}$;

θ_u, $\Delta\theta_u$ — конечные значения в установившемся режиме;

$\varepsilon(t)$ — остаточное отклонение от θ_u в установившемся режиме;

T_0 — постоянная времени для экспоненциальных изменений превышения температуры масла;

h — интервал времени между снятием показаний;

θ_1, θ_2, θ_3 — три последовательно снятых показаний температуры с интервалом времени h.

Испытание следует продолжать до тех пор, пока не будет достигнуто превышение температуры (масла) в установившемся режиме. Температура окружающего воздуха, или температура охлаждающей воды должны быть по возможности постоянными. Предполагается, что температура масла $\theta(t)$ достигнет предельного значения θ_u по экспоненциальной функции с постоянной времени T_0. Температура окружающей среды — $\theta_{охл}$. Конечное превышение температуры масла над температурой охлаждающей среды $\Delta\theta_u$ определяется по формулам Д.1 и Д.2:

$$\theta_u = \theta_{охл} + \Delta\theta_u; \qquad (Д.1)$$

$$\theta(t) = \theta_{охл} + \Delta\theta_u\left(1 - e^{-t/T_0}\right). \qquad (Д.2)$$

Тогда остаточное отклонение от установившегося режима определяют по формуле:

$$\varepsilon(t) = \theta_u - \theta(t) = \Delta\theta_u \cdot e^{-t/T_0}. \qquad (Д.3)$$

Значения ε, принятые для равных промежутков времени, образуют геометрический ряд. Это подтверждает метод графической экстраполяции, приведенный на рисунке Д.1.

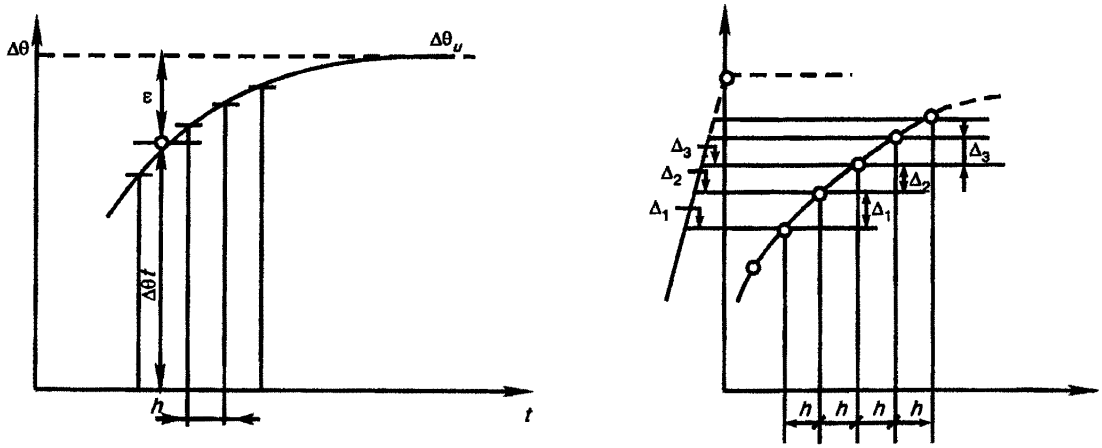


Рисунок Д.1 — Графическая экстраполяция к конечному превышению температуры

Для каждой пары следующих одна за другой точек на кривой, разделенных интервалом времени h ч, имеем:

$$\Delta(\Delta\theta)_t = \varepsilon_{t-h} - \varepsilon_t = \varepsilon_t\left(e^{h/T_0} - 1\right), \qquad (Д.4)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta(\Delta\theta)_t}{\left(e^{h/T_0} - 1\right)}. \qquad (Д.5)$$

В каждый следующий момент $t + t_1$

$$\varepsilon_{(t+t_1)} = \varepsilon_t \cdot e^{-t_1/T_0} = \frac{\Delta(\Delta\theta)_t}{e^{t_1/T_0}\left(e^{h/T_0}\right)^{-1}}. \qquad (Д.6)$$

Испытание продолжают до тех пор, пока скорость изменения температуры станет меньше 1 °С в час. Например:

$$h = 1 \text{ и } \Delta(\Delta\theta_t) < 1.$$

Из формулы Д.5 получаем

$$\varepsilon_t < \left(e^{1/T_0} - 1\right)^{-1}. \qquad (Д.7)$$

Затем испытание следует продолжать 3 ч, после чего оно может быть завершено. Превышение температуры в течение последнего часа является результатом испытания. При $T_0 = 3$ ч теоретическая погрешность метода составляет около 1 °С. Если постоянная времени меньше, то и погрешность меньше и наоборот.

Постоянная времени T_0 в часах может быть определена различными способами. Следующая формула основана на информации, имеющейся на табличке трансформатора:

$$T_0 = \frac{5 \times [\text{общая масса}] + 15 \times [\text{масса масла}]}{[\text{общие потери}]} \times \frac{\Delta\theta_u}{60}, \qquad (Д.8)$$

где масса выражена в тоннах и потери — в киловаттах:

$\Delta\theta_u$ — конечное превышение температуры масла в верхних слоях, °С.

Массу масла в расширителе не следует учитывать в общей массе масла. Оно не влияет на изменение температуры.

Опытное определение постоянной времени в процессе испытания может быть осуществлено с помощью последовательных измерений температуры через равные промежутки времени h.

При наличии трех последовательных измерений $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$, $\Delta\theta_3$, если экспоненциальная зависимость из формулы Д.2 совпадает с кривой температуры, приращение температуры определяют из формулы:

$$\frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2} = e^{h/T_0}, \qquad (Д.9)$$

где

$$T_0 = \frac{h}{\ln\dfrac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2}}.$$

Показания позволяют также прогнозировать конечное превышение температуры, определяемое по формуле:

$$\Delta\theta_u = \frac{(\Delta\theta_2)^2 - \Delta\theta_1 \cdot \Delta\theta_3}{2\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1 - \Delta\theta_3}. \qquad (Д.10)$$

Необходимо выполнить несколько последовательных расчетов и они должны совпадать. Интервал времени h должен быть равен приблизительно T_0 и $\Delta\theta_3/\Delta\theta_4$ должно быть не менее 0,95.

Другой расчет $\Delta\theta_u$ выглядит следующим образом:

$$\Delta\theta_u = \Delta\theta_2 + \frac{\sqrt{(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1)(\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2)}}{\ln\dfrac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2}} \quad . \qquad (Д.11)$$

Д.2 Измерения сопротивления обмоток после отключения

В конце испытания на нагрев трансформатор отключают от источника тока. В трансформаторах с искусственным охлаждением одновременно отключают вентиляторы или прекращают циркуляцию воды. Циркуляцию масла (в том числе направленное движение масла) сохраняют на весь период проведения измерений. После отключения трансформатора измеряют сопротивление обмотки через время, достаточное для исчезновения переходного процесса в цепи измерительного тока. Измерения повторяют через промежутки времени длительностью от 30 до 60 с.

Первое измерение сопротивления обмотки после отключения трансформатора от источника питания и нагрузки должно быть проведено как можно раньше (обычно через 60—120 с после отключения), чтобы обмотка не успела заметно остыть. С этой целью схему для измерения сопротивления предпочтительно собирать с помощью специальных разъединителей (с токовыми и потенциальными полюсами), рассчитанных на необходимый ток и напряжение.

Измерение сопротивления обмотки в холодном и горячем состоянии следует проводить с использованием одних и тех же приборов и элементов измерительной схемы при одном и том же значении постоянного тока и его полярности.

Если измерение средней температуры обмотки по сопротивлению неприемлемо, например, для обмоток, в которых переходное сопротивление контактов несоизмеримо с их активным сопротивлением, то среднюю температуру обмотки допускается измерять термопарами.

За среднюю температуру обмотки принимают среднее арифметическое значение показаний не меньше двух термопар (термометров), установленных на противоположных сторонах ее верхнего и нижнего краев.

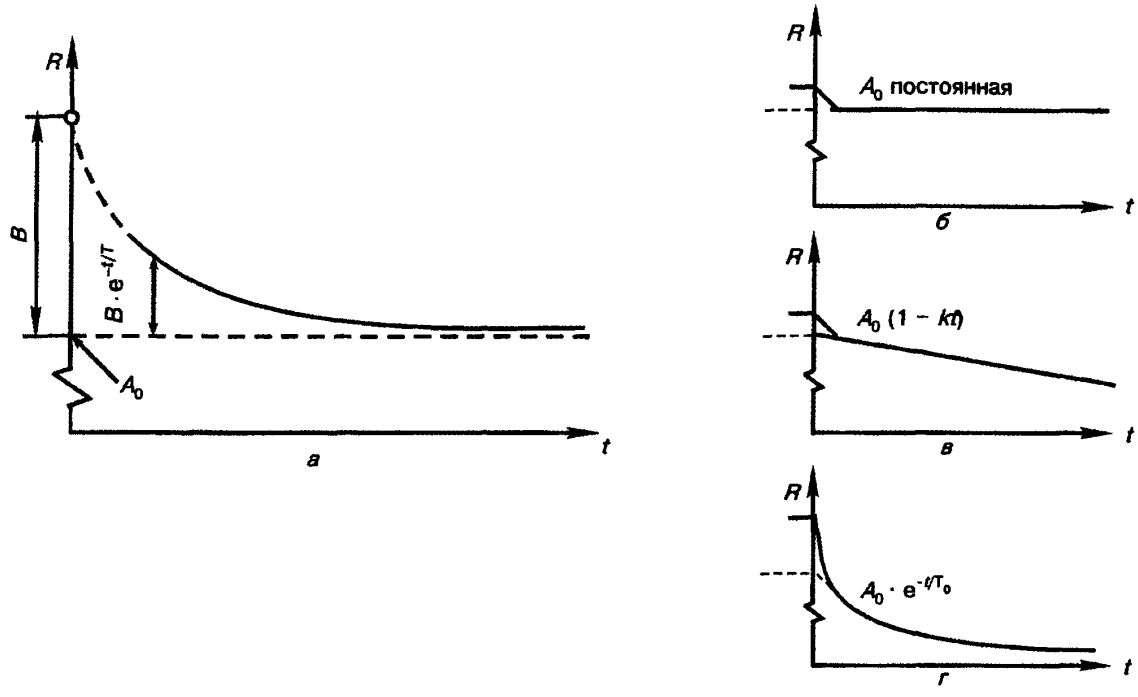
Д.3 Экстраполяция средней температуры обмотки к моменту отключения

Полученные при измерении значения сопротивлений обмотки должны быть экстраполированы назад во времени для определения значения сопротивления в момент отключения.

Графическое представление результатов измерений приведено на рисунке Д.2. Из рисунка видно, что температура обмотки изменяется относительно быстро в течение нескольких минут, а затем выравнивается.

Для трансформаторов с большой тепловой постоянной времени для измерения температуры масла (это в основном распространяется на трансформаторы с естественной циркуляцией масла с относительно низкой номинальной мощностью) допускается, что асимптота является величиной постоянной.

В других случаях (особенно при испытании мощных трансформаторов с принудительным охлаждением и когда охладители оставляют в работе после отключения от испытательной мощности) может появиться необходимость найти понижающуюся асимптоту, на которую накладывается более быстрое начальное изменение. Этот момент приведен на рисунке Д.2.



а — начальная часть записи с быстрым понижением температуры
б, в, г — варианты математических моделей для последующего медленного понижения температуры

Рисунок Д.2 — Определение изменения сопротивления обмотки после отключения от источника питания

Расчет может быть выполнен соответствующим образом на вычислительной машине по методике, которая соответствует аналитической функции в комплексе снятых точек.

Изменение сопротивления R в течение времени t представляется как совокупность установившейся или медленно меняющейся величины A и другой величины, показывающей экспоненциальное затухание от величины B с постоянной времени T:

$$R(t) = A(t) + B \cdot e^{-t/T}. \qquad (Д.12)$$

Для первой величины $A(t)$ можно применить постоянное либо линейное, либо экспоненциальное затухание, что соответствует формулам:

$$A = A_0;\ A = A_0 \cdot (1 - kt);\ A = A_0 \cdot e^{-t/T_0}. \qquad (Д.13)$$

Измерения проводят в течение такого отрезка времени, когда вторая величина $B\,e^{-t/T}$ почти сходит на нет.

Быстрое экспоненциальное изменение $R'(t)$ рассчитывают по формуле:

$$R'(t) = R(t) - A(t) = B \cdot e^{-t/T}. \qquad (Д.14)$$

В группе R_i', t_i параметры B и T определяют числовым регрессивным методом.

В этом случае результат имеет вид:

$$R_2 = A_0 + B_i, \qquad (Д.15)$$

откуда среднюю температуру обмотки рассчитывают в соответствии с 5.4.

Определение этой величины методом графической экстраполяции представлено на рисунке Д.3. На кривой, начиная с момента отключения, через равные промежутки времени отмечают точки пересечения. Проводят наклонную прямую, как показано на рисунке Д.3. Эта прямая пересекает ось R в точке, соответствующей A_0 и позволяет достаточно точно оценить графически R_2.

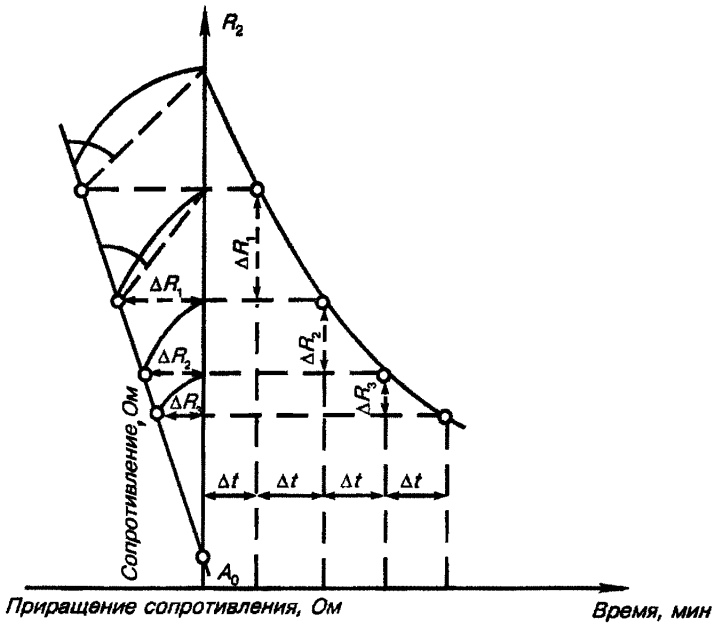


Рисунок Д.3 — Графическая экстраполяция определения сопротивления обмотки в момент отключения

Поправку на превышение температуры, обусловленную изменением сопротивления обмотки за время от момента отключения от источника питания до момента начала измерения, также вносят методом экстраполяции кривых изменения сопротивления во времени с применением полулогарифмической шкалы.

Измерения сопротивления R_1, R_2, R_3 и т. д. повторяют через промежутки времени t_1, t_2, t_3 и т. д. длительностью 30—60 с до 10—12 мин, затем спустя еще 10—15 мин дополнительно измеряют сопротивление обмотки R_n (последний отсчет).

На оси абсцисс в соответствии с рисунком Д.4 откладывают отрезки времени t_1, t_2, t_3 и т. д. до 10—12 мин, считая от момента отключения, а на оси ординат (в крупном линейном масштабе) — логарифмы соответствующих им разностей $R_1 - R_n$, $R_2 - R_n$ и т. д. или (в логарифмическом масштабе) соответствующие им разности $R_1 - R_n$, $R_2 - R_n$ и т. д.

Логарифмы разностей сопротивлений $\lg (R_0 - R_n)$

При этом берется такое значение сопротивления R_n, при котором линия, соединяющая точки испытания, является практически прямой. Для этого допускается R_n принимать равным сопротивлению обмотки A_0 по первому методу, приведенному на рисунке Д.3, которое соответствует моменту охлаждения, когда средние температуры обмотки и масла сравниваются.

Через нанесенные точки проводят прямую, которая, будучи продолжена, отсечет на оси ординат отрезок, равный логарифму разности $R_0 - R_n$, (R_0 — сопротивление обмотки в момент отключения).

Если несколько начальных точек окажется вне прямой, то при построении их не учитывают.

Среднюю температуру обмотки в момент, непосредственно предшествующий отключению нагрузки, определяют по 5.4.

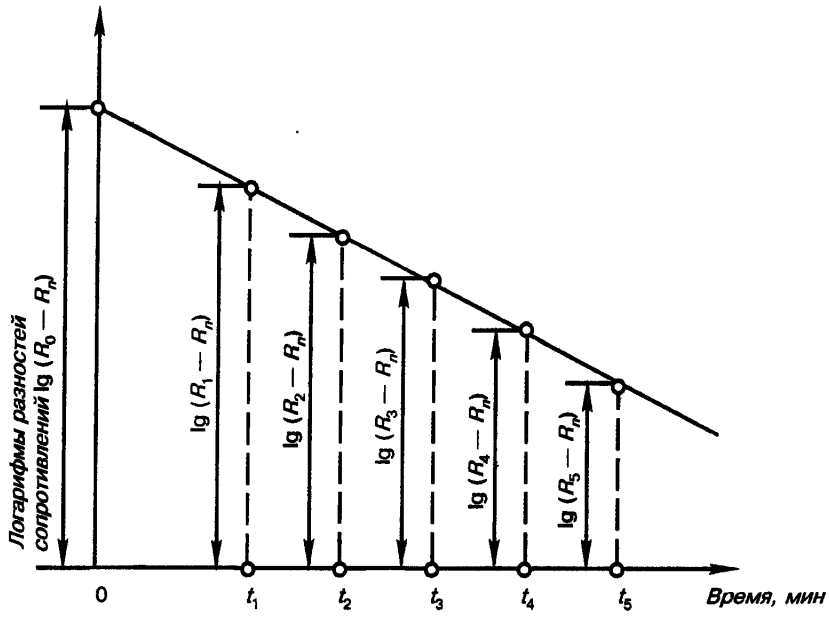


Рисунок Д.4 — Определение сопротивления обмотки в момент отключения с применением полулогарифмической шкалы

При определении средней температуры обмоток непосредственно после отключения с целью уменьшения времени установления тока последовательно с обмоткой включают добавочный резистор. Сопротивление резистора должно быть достаточно стабильным и практически не должно изменяться при протекании по нему тока. Допускается в качестве добавочного резистора применять лампы накаливания, если опытным путем доказана стабильность их сопротивления в установившемся тепловом режиме, а время, в течение которого температура нити накаливания принимает установившееся значение, должно быть в пределах от 3 до 5 с. Допускается кратковременно шунтировать резистор, пока ток не достигнет значения от 0,2 до 0,9 от установившегося тока.

Напряжение на зажимах источников постоянного тока, применяемых при этих измерениях, в процессе измерений должно оставаться стабильным. Для обеспечения этого условия должны применяться аккумуляторные батареи большой емкости. Допускается применять в качестве источника питания выпрямительное устройство с пульсацией напряжения на выходе не более 1 %.

С целью уменьшения времени установления тока в измерительной цепи применяют также схемы, ограничивающие намагничивание магнитной системы за счет противовключения постоянного тока в частях испытуемой обмотки при измерении ее сопротивления. Например, при измерениях, выполняемых на многопараллельных обмотках, чтобы обеспечить противовключение, один из проводов отсоединяют от отвода и подключают к этому же отводу с помощью разъединителя. При измерении сопротивления указанный провод включается последовательно с остальной частью обмотки, сопротивление которой измеряется, для этого необходимо разомкнуть разъединитель. Для вывода отсоединяемого провода из бака трансформатора на время испытаний устанавливают дополнительный ввод.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(рекомендуемое)

ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК МЕТОДОМ НАЛОЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

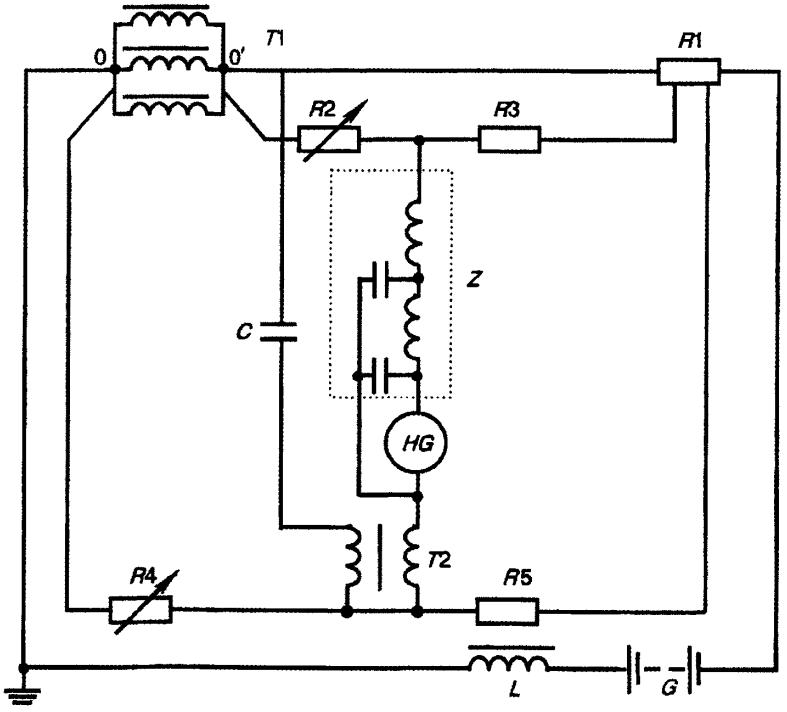
Е.1 Метод наложения постоянного тока применяют при испытании на нагрев (как при коротком замыкании, так и при нагрузке в условиях эксплуатации) при большой постоянной времени обмотки испытуемого трансформатора и измерительной цепи и при отсутствии возможности начать измерения немедленно после окончания нагрева трансформатора.

Е.2 При этом методе сопротивление обмоток трансформатора измеряют постоянным током, который накладывается на переменный ток нагрузки.

Постоянный ток может быть включен в течение всего периода испытаний или только на время, необходимое для измерения. Значение постоянного тока не должно превышать 2 % от номинального тока измеряемой обмотки.

Е.3 Сопротивление обмотки измеряют с помощью двойного моста или вольтметра и амперметра по одной из схем в соответствии с рисунками Е.1—Е.4.

Е.4 Измерения короткозамкнутой обмотки (при нагреве методом короткого замыкания) проводят в соответствии с рисунком Е.1 в случае соединения испытуемой обмотки в «звезду» с доступной нейтралью, при этом сопротивление между точками 0–0′ является средним сопротивлением трех фаз обмотки, включенных параллельно.

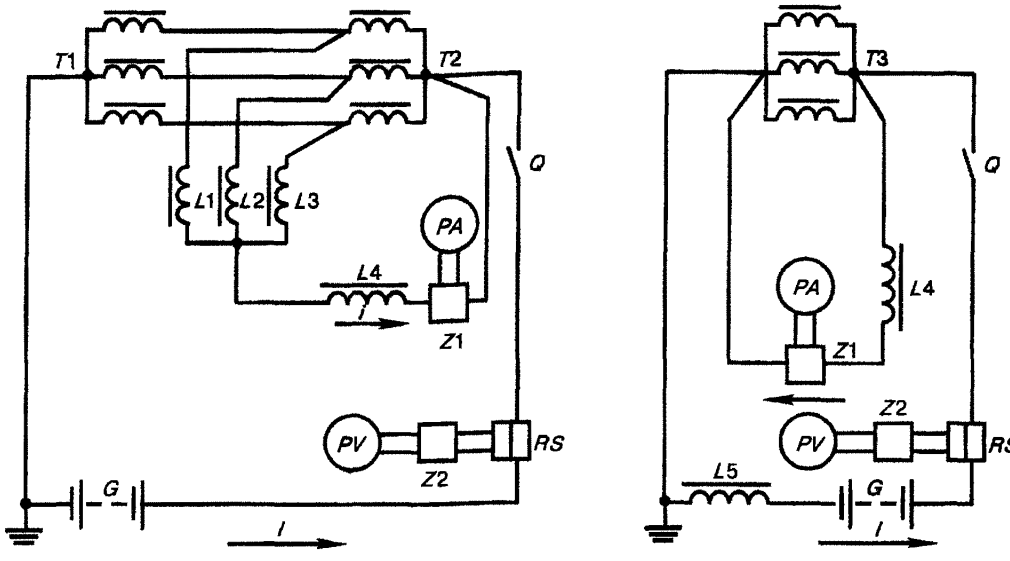


*T*1 — измеряемая обмотка; *R*2, *R*4 — регулируемые резисторы; *R*1, *R*3, *R*5 — резисторы; *Z* — фильтр; *HG* — гальванометр; *T*2 — трансформатор компенсирующий; *G* — аккумуляторная батарея; *L* — дроссель; *C* — разделительный конденсатор.

Рисунок Е.1 — Принципиальная схема измерения по Е.4

В измерительную диагональ моста через трансформатор *T2* с коэффициентом трансформации обмотки *T1* подают напряжение, соответствующее напряжению на измеряемой обмотке, с обратным знаком. Дополнительно в эту цепь вводят фильтр *Z*.

Е.5 Измерения по схемам а) и б) соответственно с рисунком Е.2 проводят в том случае, когда нейтрали у измеряемых обмоток и у питающего трансформатора (генератора *T1*) доступны. При измерении определяют среднее сопротивление трех фаз обмотки, включенных параллельно.



а) измерения при коротком замыкании и нагрузке

а) измерения при коротком замыкании

T1 — питающий трансформатор; *T2* — измеряемая обмотка (первичная);
PA — микроамперметр; *Q* — выключатель; *Z1*, *Z2* — фильтры; *RS* — шунт; *PV* — милливольтметр;
G — аккумуляторная батарея; *L4*, *L5* — дроссели; *L1*, *L2*, *L3* — индуктивности;
T3 — измеряемая обмотка (вторичная)

Рисунок Е.2 — Принципиальная схема измерения по Е.5

Постоянный ток, накладываемый на переменный в испытуемых обмотках, измеряют с помощью шунта *RS* и милливольтметра *PV* с фильтром *Z2*.

Падение напряжения постоянного тока на этих обмотках измеряют гальванометром с фильтром *Z1*.

Вместо индуктивностей *L1*, *L2*, *L3* допускается применять соответствующие трансформаторы напряжения.

Применяемые в схеме фильтры должны ограничить в микроамперметре и милливольтметре переменную составляющую напряжения до значения, не превышающего постоянную составляющую. При установке шунта в фазовом проводе первичной обмотки *T2* и применении одного трансформатора напряжения вместо индуктивности, включенной в эту фазу (*L1*, *L2*, *L3*), можно измерять сопротивление одной фазы, но при этом следует учитывать, что шунт и милливольтметр будуть находиться под полным переменным напряжением. В этом случае необходимо принять меры для исключения влияния электрического поля на показания милливольтметра (например, путем экранирования). При этом показания милливольтметра отсчитывают с помощью оптических средств с расстояния, предусмотренного требованиями безопасности.

Среднее сопротивление R_1 в омах трех фаз первичной обмотки $T2$ рассчитывают для схемы а) по формуле:

$$R_1 = \frac{i(3R' + R_a)}{I}, \qquad (E.1)$$

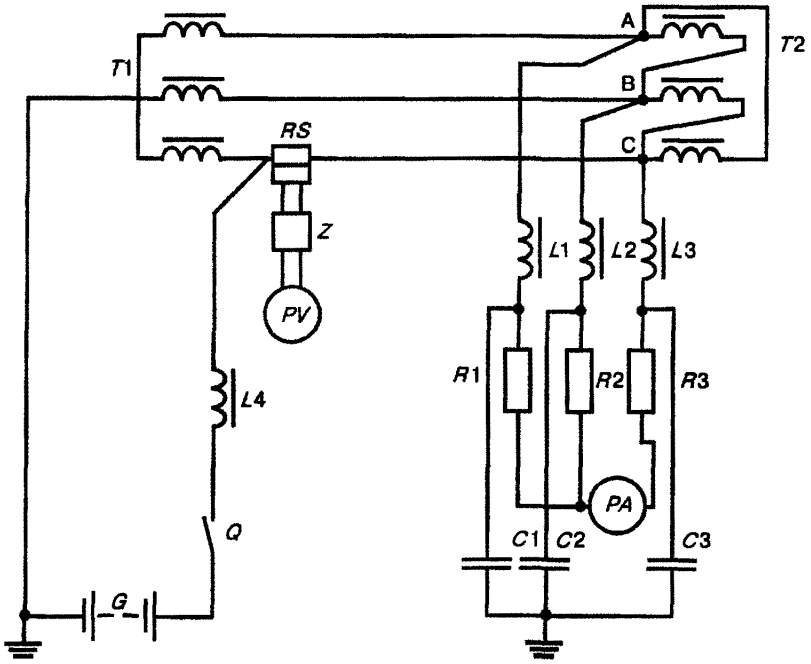
где i — ток, измеряемый микроамперметром PA, А;
R' — суммарное сопротивление фильтра $Z1$, дросселя $L4$ и микроамперметра PA, Ом;
R_a — сопротивление индуктивностей $L1$, $L2$, $L3$, Ом;
I — постоянный ток, накладываемый на переменный ток в первичной обмотке $T2$, А.

Среднее сопротивление R_2 в омах трех фаз вторичной обмотки $T3$ рассчитывают для схемы б) по формуле:

$$R_2 = \frac{3iR''}{I}, \qquad (E.2)$$

где R'' — суммарное сопротивление фильтра $Z1$, дросселя $L4$ и микроамперметра PA, Ом;
I — постоянный ток, накладываемый на переменный ток во вторичной обмотке $T3$, А.

Е.6 Измерения по схеме в соответствии с рисунком Е.3 проводят в режиме короткого замыкания и нагрузки в том случае, когда обмотки испытуемого трансформатора соединены в «треугольник» или в «звезду» без выведенной нейтрали.



T1 — питающий трансформатор; *RS* — шунт; *T2* — измеряемая обмотка; *L1*, *L2*, *L3* — индуктивности; *R1*, *R2*, *R3* — резисторы; *PA* — микроамперметр; *C1*, *C2*, *C3* — конденсаторы; *G* — аккумуляторная батарея; *Q* — выключатель; *PV* — милливольтметр; *L4* — дроссель; *Z* — фильтр

Рисунок Е.3 — Принципиальная схема измерения по Е.6

Если у питающего трансформатора (генератора) нет выведенной нейтрали, то используют другую фазу схемы, заземлив ее через достаточную индуктивность.

Постоянный ток подают через одну из фаз. При измерении постоянного напряжения между выводами А и выводами В и С резисторы $R2$, $R3$ в фазах В и С должны обеспечивать наименьшее расхождение между суммарными сопротивлениями в фазах В и С — индуктивность $L2$, $L3$ плюс резистор $R2$, $R3$ соответствующей фазы.

Среднее сопротивление R'_x в омах двух фаз А и В рассчитывают по формуле:

$$R'_x = \frac{I}{i}(2R_A + R_B), \qquad (E.3)$$

где i — ток, измеренный микроамперметром, А;

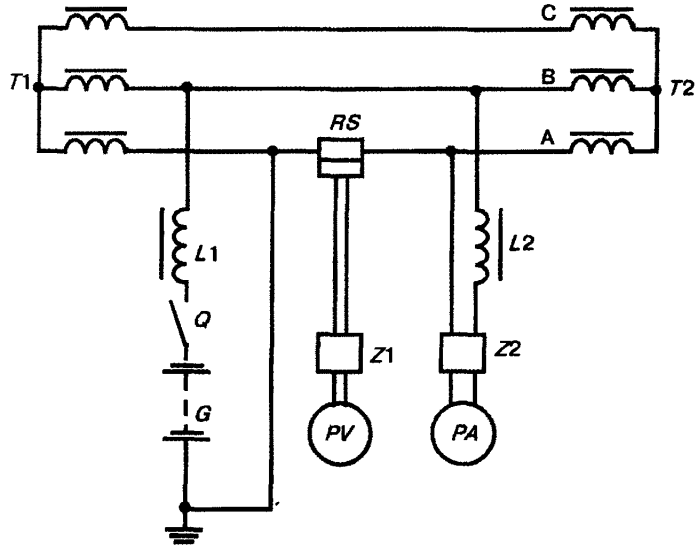
I — постоянный ток, накладываемый на переменный в фазах А и В, А;

R_A — суммарное сопротивление индуктивности $L1$, резистора $R1$ и микроамперметра в фазе А, Ом;

R_B — суммарное сопротивление индуктивности $L2$ и резистора $R2$ в фазе В, Ом.

Шунт RS должен быть рассчитан на рабочий ток обмотки $T2$. Остальные условия измерения должны соответствовать Е.5.

Е.7 Измерения по схеме в соответствии с рисунком Е.4 проводят в режиме короткого замыкания и нагрузки при отсутствии нейтрали у испытуемой обмотки и питающего трансформатора (генератора) в том случае, если допустимо заземление одного из фазных проводов. Измерение проводят для обмоток $T2$, соединенных как в «звезду», так и в «треугольник».



$T1$ — питающий трансформатор; RS — шунт; $T2$ — измеряемая обмотка; $L2$ — индуктивность; $Z1$, $Z2$ — фильтры; PA — микроамперметр; PV — милливольтметр; G — аккумуляторная батарея; Q — выключатель; $L1$ — дроссель

Рисунок Е.4 — Принципиальная схема измерения по Е.7

При измерении сопротивления обмоток, соединенных в «звезду», сопротивление R''_x в омах для фаз А и В рассчитывают по формуле:

$$R''_x = \frac{iR}{I}, \qquad (E.4)$$

где i — ток, измеренный микроамперметром, А;

I — постоянный ток, накладываемый на переменный в фазах А и В, А;

R — суммарное сопротивление индуктивности $L2$, фильтра $Z2$ и микроамперметра PA, Ом.

Е.8 Для уменьшения влияния термоэлектрического эффекта в контактах шунтов и переходных процессов в трансформаторах на точность измерения сопротивления рекомендуется принимать следующие меры:

— уменьшить нагрев шунтов (путем выбора соответствующего сечения проводников шунта и охлаждения);

— вынести из зоны нагрева контакты шунта, если они из разнородных металлов;

— увеличить постоянную времени фильтров измерительных приборов, стабилизировать режим нагрева.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж
(обязательное)

ПРИВЕДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ НА НАГРЕВ К НОМИНАЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ

Ж.1 Определение конечного превышения температур элементов сухого трансформатора

Ж.1.1 Превышения средней температуры обмотки $\Delta\theta_{обм}$ и температуры поверхности магнитной системы $\Delta\theta_{маг}$ для защищенных и незащищенных трансформаторов или температуры поверхности верхней крышки $\Delta\theta_{кр}$ и боковой части $\Delta\theta_{б.ч}$ кожуха для герметичных трансформаторов следует определять как разности по формулам:

$$\Delta\theta_{обм} = \theta_{обм} - \theta_{охл}; \quad (Ж.1)$$

$$\Delta\theta_{маг} = \theta_{маг} - \theta_{охл}; \quad (Ж.2)$$

$$\Delta\theta_{кр} = \theta_{кр} - \theta_{охл}; \quad (Ж.3)$$

$$\Delta\theta_{б.ч} = \theta_{б.ч} - \theta_{охл}, \quad (Ж.4)$$

где $\theta_{обм}$ — температура обмотки, °С;
$\theta_{маг}$ — температура поверхности магнитной системы, °С;
$\theta_{кр}$ и $\theta_{б.ч}$ — температура соответственно поверхности верхней крышки и боковой части кожуха, °С;
$\theta_{охл}$ — температура охлаждающей среды, измеренная при испытаниях, °С.

Ж.1.2 При нагреве обмотки током I', отличающимся от номинального в соответствии с 5.1.6, измеренное превышение температуры $\Delta\theta'_{обм}$ над температурой охлаждающей среды пересчитывают к номинальному току $I_{ном}$ по формуле:

$$\Delta\theta_{обм} = \Delta\theta'_{обм}\left(\frac{I_{ном}}{I'}\right)^{q}; \quad (Ж.5)$$

где q принимают равным:
—1,6 — для трансформаторов с естественной циркуляцией охлаждающего воздуха;
—1,8 — для трансформаторов с принудительной циркуляцией охлаждающего воздуха.

Ж.1.3 При испытаниях по 5.2.4 общее превышение температуры каждой из обмоток $\Delta\theta_{обм}$ и магнитной системы $\Delta\theta_{маг}$ при номинальных условиях по 5.1.4 определяют на основании результатов, полученных во время двух отдельных испытаний в соответствии с Б.8 приложения Б, по формулам:

$$\Delta\theta_{обм} = \Delta\theta''_{обм}\left[1+\left(\frac{\Delta\theta'_{обм}}{\Delta\theta''_{обм}}\right)^{1,25}\right]^{0,8}, \quad (Ж.6)$$

$$\Delta\theta_{маг} = \Delta\theta'_{маг}\left[1+\left(\frac{\Delta\theta''_{маг}}{\Delta\theta'_{маг}}\right)^{1,25}\right]^{0,7}. \quad (Ж.7)$$

Ж.2 Определение конечного превышения температуры элементов масляного трансформатора

Ж.2.1 Превышения температуры масла в верхних слоях $\Delta\theta_м$, средней температуры масла $\Delta\theta_{м.ср}$ и температуры масла вблизи элемента металлоконструкции $\Delta\theta_{мк}$ при номинальных условиях по нагреву следует определять по формулам:

$$\Delta\theta_м = \theta_м - \theta_{охл}; \quad (Ж.8)$$

$$\Delta\theta_{м.\,ср} = \theta_{м.\,ср} - \theta_{охл}; \quad (Ж.9)$$

$$\Delta\theta_{мк} = \theta_{мк} - \theta_{охл}; \quad (Ж.10)$$

где $\theta_м$ — температура масла в верхних слоях, °С;
$\theta_{м.ср}$ — средняя температура масла, °С;
$\theta_{мк}$ — температура масла вблизи элемента металлоконструкции, °С.

Ж.2.2 При условиях по нагреву, отличных от номинальных, полученные при испытаниях превышения температуры масла в верхних слоях $\Delta\theta'_м$, средней температуры масла $\Delta\theta'_{м.ср}$ и масла вблизи элементов металлоконструкции $\Delta\theta'_{мк}$ следует приводить к номинальным условиям путем умножения на коэффициент

$$\left(\frac{\Sigma P}{P'_к + P'_0}\right)^x, \quad (Ж.11)$$

где $P'_к + P'_0$ — сумма потерь короткого замыкания и холостого хода при испытаниях, Вт;
x принимается равным:
— 0,8 — для распределительных трансформаторов (естественная циркуляция, максимальная номинальная мощность 2500 кВ · А);
— 0,9 — для трансформаторов большой мощности с естественной циркуляцией масла в обмотках;
— 1,0 — для трансформаторов с принудительной и направленной циркуляцией масла в обмотках.

Ж.2.3 При испытаниях по 5.1.1, 5.1.3 превышения средней температуры обмоток $\Delta\theta_{обм}$, температур поверхности элементов металлоконструкции $\Delta\theta_к$ и поверхности магнитной системы $\Delta\theta_{маг}$ при номинальных условиях по нагреву рассчитывают по формулам:

$$\Delta\theta_{обм} = \theta_{обм} - \theta_{охл}; \quad (Ж.12)$$

$$\Delta\theta_к = \theta_к - \theta_{охл}; \quad (Ж.13)$$

$$\Delta\theta_{маг} = \theta_{маг} - \theta_{охл}, \quad (Ж.14)$$

где $\theta_к$ — температура поверхности элемента металлоконструкции, °С.

Ж.2.4 При испытаниях по 5.2.2 превышения средней температуры обмоток $\Delta\theta'_{обм}$, температуры поверхности элементов металлоконструкции $\Delta\theta'_к$ следует определять в конце периода нагрева номинальным током, а превышение температуры поверхности магнитной системы $\Delta\theta'_{маг}$ — в соответствии с Б.5 приложения Б; их определяют по формулам:

$$\Delta\theta'_{обм} = \theta'_{обм} - \theta'_{охл}; \quad (Ж.15)$$

$$\Delta\theta'_к = \theta'_к - \theta'_{охл}; \quad (Ж.16)$$

$$\Delta\theta'_{маг} = \theta'_{маг} - \theta'_{охл}, \quad (Ж.17)$$

где $\theta'_{обм}$ — температура обмотки, °С;
$\theta'_к$ — температура поверхности элемента металлоконструкции, °С;
$\theta'_{маг}$ — температура поверхности магнитной системы, °С;
$\theta'_{охл}$ — температура охлаждающей среды при потерях в трансформаторе, отличных от ΣP, °С.

В полученные результаты следует внести поправки по формулам:

$$\Delta\theta_{обм} = \Delta\theta'_{обм} - \Delta\theta'_{м.ср} + \Delta\theta_{м.ср}; \quad (Ж.18)$$

$$\Delta\theta_к = \Delta\theta'_к - \Delta\theta'_{мк} + \Delta\theta_{мк}; \quad (Ж.19)$$

$$\Delta\theta_{маг} = \Delta\theta'_{маг} - \Delta\theta'_м + \Delta\theta_м, \quad (Ж.20)$$

где $\Delta\theta_{обм}$ и $\Delta\theta'_{обм}$ — приведенное и измеренное соответственно превышение температуры обмотки над температурой охлаждающей среды, °С;
$\Delta\theta_{м.ср}$ и $\Delta\theta'_{м.ср}$ — приведенное и измеренное соответственно превышение средней температуры масла над температурой охлаждающей среды, °С;
$\Delta\theta_к$ и $\Delta\theta'_к$ — приведенное и измеренное соответственно превышение температуры элемента металлоконструкции над температурой охлаждающей среды, °С;
$\Delta\theta_{мк}$ и $\Delta\theta'_{мк}$ — приведенное и измеренное соответственно превышение температуры масла вблизи элемента металлоконструкции над температурой охлаждающей среды, °С;
$\Delta\theta_{маг}$ и $\Delta\theta'_{маг}$ — приведенное и измеренное соответственно превышение температуры поверхности магнитной системы над температурой охлаждающей среды, °С;
$\Delta\theta_м$ и $\Delta\theta'_м$ — приведенное и измеренное соответственно превышение температуры масла в верхних слоях над температурой охлаждающей среды, °С.

Ж.2.5 Если определение превышений температуры обмоток $\Delta\theta_{обм}$ и элементов металлоконструкций $\Delta\theta_к$ проводят при испытаниях током по 5.1.6 отличным от номинального, то полученные при испытаниях температуры $\Delta\theta'_{обм}$ и $\Delta\theta'_к$ следует приводить к номинальным условиям по формулам:

$$\Delta\theta_{обм} = \left(\Delta\theta'_{обм} - \Delta\theta'_{м.ср}\right)\left(\frac{I_{ном}}{I'}\right)^Y + \Delta\theta_{м.ср}; \quad (Ж.21)$$

$$\Delta\theta_к = \left(\Delta\theta'_к - \Delta\theta'_{мк}\right)\left(\frac{I_{ном}}{I'}\right)^Y + \Delta\theta_{мк}, \quad (Ж.22)$$

где $I_{ном}$ и I' — номинальный ток обмотки и ток в обмотке при испытаниях, А;
Y принимается равным:
— 1,6 — для трансформаторов с естественной и принудительной циркуляцией масла;
— 2,0 — для трансформаторов с принудительной циркуляцией с направленным потоком масла в обмотках.

ПРИЛОЖЕНИЕ К
(рекомендуемое)

МЕТОДИКА ПЕРЕСЧЕТА ПОТЕРЬ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА НАГРЕВ МНОГООБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

К.1 Определение нагрузочных потерь трехобмоточных трансформаторов при различных сочетаниях нагрузки

Введем следующие обозначения:

обмотка ВН — «Н», СН — «Х» и НН — «Т». Нагрузочные потери определяют совместно с сопротивлениями для трех возможных двухобмоточных сочетаний:

$$P_{нх} \quad P_{нт} \quad P_{хт}.$$

Измерения могут быть проведены при токах в обмотках, соответствующих различным значениям базовой мощности, так как третичная обмотка имеет более низкое заданное значение номинальной мощности. Для последующего преобразования данные измерений приводят к базовой мощности S' пропорционально квадрату тока:

$$P'_{нх} \quad P'_{нт} \quad P'_{хт}.$$

Базовые токи в соответствующих обмотках:

$$I'_н \quad I'_х \quad I'_т.$$

Распределение потерь по отдельным обмоткам определяют по формулам:

$$P'_н = \frac{1}{2}\left(P'_{нх} + P'_{нт} - P'_{хт}\right); \tag{К.1}$$

$$P'_х = \frac{1}{2}\left(P'_{нх} - P'_{нт} + P'_{хт}\right); \tag{К.2}$$

$$P'_т = \frac{1}{2}\left(-P'_{нх} + P'_{нт} + P'_{хт}\right). \tag{К.3}$$

Для данного сочетания нагрузок с фактическими токами в обмотках, равными $I_н$, $I_х$, $I_т$, полученные потери для каждой обмотки снова должны быть пересчитаны пропорционально квадрату тока (или мощности) по отношению к базовым значениям. Результирующие нагрузочные потери $P_к$ для всего трансформатора — это сумма потерь в каждой из трех обмоток и вычисляют по формуле:

$$P_к = \left[\frac{I_н}{I'_н}\right]^2 \cdot P'_н + \left[\frac{I_х}{I'_х}\right]^2 \cdot P'_х + \left[\frac{I_т}{I'_т}\right]^2 \cdot P'_т, \tag{К.4}$$

Учитывая фактическую мощность обмоток, $P_к$ рассчитывают по формуле:

$$P_к = \left[\frac{S_н}{S'}\right]^2 \cdot P'_н + \left[\frac{S_х}{S'}\right]^2 \cdot P'_х + \left[\frac{S_т}{S'}\right]^2 \cdot P'_т. \tag{К.5}$$

Значение мощности в формуле приведены для фактического тока и соответствующего напряжения холостого хода для вторичных обмоток, а не фактического напряжения на выводах, включающего падение напряжения в трасформаторе.

К.2 Автотрансформаторное соединение

Обмотки с автотрансформаторным соединением рассматриваются как отдельные части пары обмоток: последовательная обмотка S и общая обмотка С — вместо обмоток высшего и среднего напряжения.

Коэффициент выгодности рассчитывают по формуле:

$$\alpha = \frac{U_н - U_х}{U_н} = \frac{I_х - I_н}{I_х}. \qquad (К.6)$$

Это отношение между фактической электромагнитной мощностью физических обмоток S и С и проходной мощностью между формальными обмотками Н и Х.

Когда базовая мощность S' распределяется между обмотками Н и Х, напряжение последовательной обмотки определяют по формуле:

$$U_н - U_х = \alpha U_н, \qquad (К.7)$$

а ее ток $I'_н$.

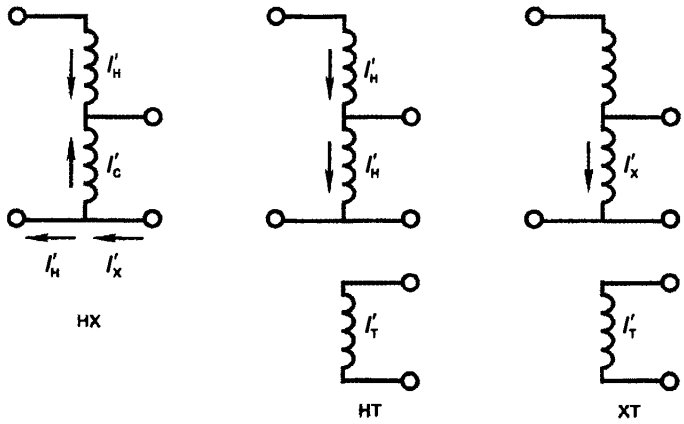
Напряжение общей обмотки $U_х$, а ее базовый ток определяют по формуле:

$$I'_с = I'_х - I'_н = \alpha I'_х. \qquad (К.8)$$

Электромагнитная базовая мощность обмоток автотрансформатора не S', а $\alpha S'$.

На рисунке К.1 приведены схемы трех возможных двухобмоточных сочетаний нагрузки относительно проходной мощности S'. Фактический ток в обмотке С во всех трех случаях разный.

Три двухобмоточных сочетания для испытания при базовой проходной мощности



$$I_с = I'_с = \alpha I'_х \quad I_с = I'_н = (1-\alpha) I'_х = \frac{1-\alpha}{\alpha} I'_с \quad I_с = I'_х \frac{1}{\alpha} I'_с$$

Рисунок К.1 — Схемы возможных двухобмоточных сочетаний нагрузки

Потери в двух обмотках можно разделить по соответствующим обмоткам, применяя соотношения:

$$P'_{нх} = P'_s + P'_с; \qquad (К.9)$$

$$P'_{нт} = P'_s + \left[\frac{1-\alpha}{\alpha}\right]^2 \cdot P'_с + P'_т; \qquad (К.10)$$

$$P'_{хт} = \left[\frac{1}{\alpha}\right]^2 \cdot P'_с + P'_т. \qquad (К.11)$$

Распределение потерь по отдельным обмоткам определяют по формулам:

$$P'_s = \frac{1}{2}\left[(2-\alpha)P'_{нх} + \alpha P'_{нт} - \alpha P'_{хт}\right], \quad (К.12)$$

$$P'_c = \frac{1}{2}\left[\alpha P'_{нх} - \alpha P'_{нт} + \alpha P'_{хт}\right], \quad (К.13)$$

$$P'_т = \frac{1}{2}\left[-\frac{1}{2}P'_{нх} + \frac{1}{\alpha}P'_{нт} + \frac{2\alpha-1}{\alpha}\cdot P'_{хт}\right]. \quad (К.14)$$

Нагрузочные потери для каждой обмотки в случае заданной нагрузки, характеризуемой токами $I_н$, $I_х$, $I_т$ определяют по формулам:

$$P_s = P'_s\left[\frac{I_н}{I'_н}\right]^2, \quad (К.15)$$

$$P_c = P'_c\left[\frac{I_c}{I'_c}\right]^2, \quad (К.16)$$

$$P_т = P'_т\left[\frac{I_т}{I'_т}\right]^2. \quad (К.17)$$

Для получения потерь в общей обмотке необходимо определить ее ток по формуле:

$$|I_c| = |\bar{I}_х - \bar{I}_н|. \quad (К.18)$$

Токи $I_х$ и $I_н$ обычно не совпадают по фазе в случаях трехфазной нагрузки с независимой нагрузкой на третичной обмотке.

Нагрузку определяют исходя из фактической мощности на выводах обмоток Н, Х и Т:

$$P_s = P'_s\left[\frac{S_н}{S'_н}\right]^2, \quad (К.19)$$

$$P_c = P'_c\left[\frac{S_c}{\alpha S'}\right]^2, \quad (К.20)$$

$$P_т = P'_т\left[\frac{S_т}{S'}\right]^2. \quad (К.21)$$

Определим S_c в общем случае.

В следующих уравнениях используют векторные значения тока и мощности, в то время как число витков или эквивалентные напряжения холостого хода — скалярные постоянные величины.

Сумма мощностей равна нулю:

$$\bar{S}_н + \bar{S}_х + \bar{S}_т = 0. \quad (К.22)$$

Используя выражение холостого хода, получим формулу:

$$\bar{I}_н \cdot U_н + \bar{I}_х \cdot U_х + \bar{I}_т \cdot U_т = 0. \quad (К.23)$$

Кроме того, соблюдается баланс ампер-витков:

$$\bar{I}_{\text{н}} \cdot n_s + \bar{I}_{\text{с}}\, n_{\text{с}} + \bar{I}_{\text{т}}\, n_{\text{т}} = 0. \qquad \text{(К.24)}$$

Учитывая, что число витков пропорционально соответствующим номинальным напряжениям (или напряжениям ответвления), получаем:

$$\bar{I}_{\text{н}}(U_{\text{н}} - U_{\text{х}}) + \bar{I}_{\text{с}}\, U_{\text{х}} + \bar{I}_{\text{т}}\, U_{\text{т}} = 0, \qquad \text{(К.25)}$$

где $U_{\text{н}} - U_{\text{х}} = \alpha U_{\text{н}}$.

На рисунке К.2 приведены векторные диаграммы для мощности на соответствующих выводах и в существующих обмотках.



Рисунок К.2 — Векторные диаграммы для мощности на соответствующих выводах и в существующих обмотках

Используя теорему косинусов для треугольников на векторной диаграмме, получим формулы:

$$(I_{\text{х}} U_{\text{х}})^2 = (I_{\text{н}} U_{\text{н}})^2 + (I_{\text{т}} U_{\text{т}})^2 - 2 I_{\text{н}} U_{\text{н}} I_{\text{т}} U_{\text{т}} \cos\varphi; \qquad \text{(К.26)}$$

$$(I_{\text{с}} U_{\text{х}})^2 = \alpha^2 (I_{\text{н}} U_{\text{н}})^2 + (I_{\text{т}} U_{\text{т}})^2 - 2\alpha I_{\text{н}} U_{\text{н}} I_{\text{т}} U_{\text{т}} \cos\varphi. \qquad \text{(К.27)}$$

Исключим функцию угла:

$$S_{\text{с}}^2 = (1-\alpha)[S_{\text{т}}^2 - \alpha S_{\text{н}}^2] + \alpha S_{\text{х}}^2. \qquad \text{(К.28)}$$

Это отношение содержит только абсолютные значения мощностей — соотношение между нагрузками по фазам в выведенной формуле не учитывается.

Потери, отнесенные к обмотке С, определяют по формуле:

$$P_{\text{с}} = P_{\text{с}} \cdot \frac{(1-\alpha)[S_{\text{т}}^2 - \alpha S_{\text{н}}^2] + \alpha S_{\text{х}}^2}{\alpha^2 (S')^2}, \qquad \text{(К.29)}$$

Если $|S_{\text{н}}| = |S_{\text{х}}| + |S_{\text{т}}|$, то потери, отнесенные к обмотке С, определяют по формуле:

$$P_{\text{с}} = P'_{\text{с}} \left[\frac{S_{\text{н}} - \frac{1}{\alpha} S_{\text{т}}}{S'} \right]^2. \qquad \text{(К.30)}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

(справочное)

ТЕРМОПАРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Для измерения температуры при испытаниях трансформаторов следует применять термопары, изготовленные из пары проводов (предпочтительно хромель-копель) диаметром от 0,1 до 1 мм. Каждый из пары проводов заключают в маслостойкую (для термопар, применяемых при испытаниях масляных трансформаторов) и термостойкую изоляцию (180 °С), а затем их скручивают с шагом 5—15 мм.

Провода разрезают на отрезки требуемой длины (обычно от 2 до 20 м) и после проверки целости изоляции между проводами сваривают или запаивают один из концов пары проводов.

Для определения зависимости между показаниями прибора, подключаемого к термопаре, и температурой, выраженной в градусах, поступают указанным ниже способом.

Из группы термопар одинаковой длины с допуском ± 10 %, изготовленных из одной партии проводов указанным способом, выбирают две или три. Запаивают или заваривают второй конец пары проводов (ранее не запаянный), а затем один из проводов перерезают и полученные отводы подключают к измерительному прибору поочередно с помощью переключателя.

Один из спаев полученной термопары помещают в сосуд с жидким диэлектриком (например, трансформаторное масло), температуру которого поддерживают 0 °С, а другой — в жидкий диэлектрик, температуру которого контролируют ртутным термометром с ценой деления 0,1 °С.

Изменяют температуру жидкого диэлектрика в диапазоне от 0 до 180 °С через каждые 3 — 5 °С и записывают показания измерительного прибора и термометра.

Полученные результаты применяют для построения графической зависимости между показаниями измерительного прибора и термометра, которую используют в дальнейшем для перевода показаний прибора в градусы Цельсия.

ПРИЛОЖЕНИЕ М
(рекомендуемое)

ИСПЫТАНИЯ НА НАГРЕВ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ МАСЛА БЕЗ СОБСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

По характеристике одного охладителя (зависимость теплового потока от разности температур масла на входе в охладитель и охлаждающей среды $\Delta\theta = \theta'_м - \theta_{охл}$), их количеству в системе охлаждения трансформатора и суммарным потерям $P_{к\theta р} + P_0$ определяют превышение температуры масла на входе в систему охлаждения над температурой охлаждающей среды. Найденное значение $\Delta\theta_м$ является конечным превышением температуры масла в верхних слоях трансформатора над температурой охлаждающей среды.

Затем определяют разность температур масла на входе и выходе из охладителя $\Delta\theta$ по формуле:

$$\Delta\theta = \frac{Q}{V\rho C}, \qquad (М.1)$$

где Q — тепловой поток охладителя, Вт;
V — производительность насосов, м/с;
ρ, C — соответственно плотность и удельная теплоемкость масла, которые выбирают в зависимости от средней температуры масла в охладителе из таблицы М.1.

Таблица М.1 — Параметры масла в зависимости от температуры

Температура масла, °С	Плотность масла, кг/м	Удельная теплоемкость, (Вт · с)/(кг · °С)
40	873,1	1807
50	866,7	1868
60	860,3	1928
70	854,0	1988
80	847,6	2048
90	841,3	2109

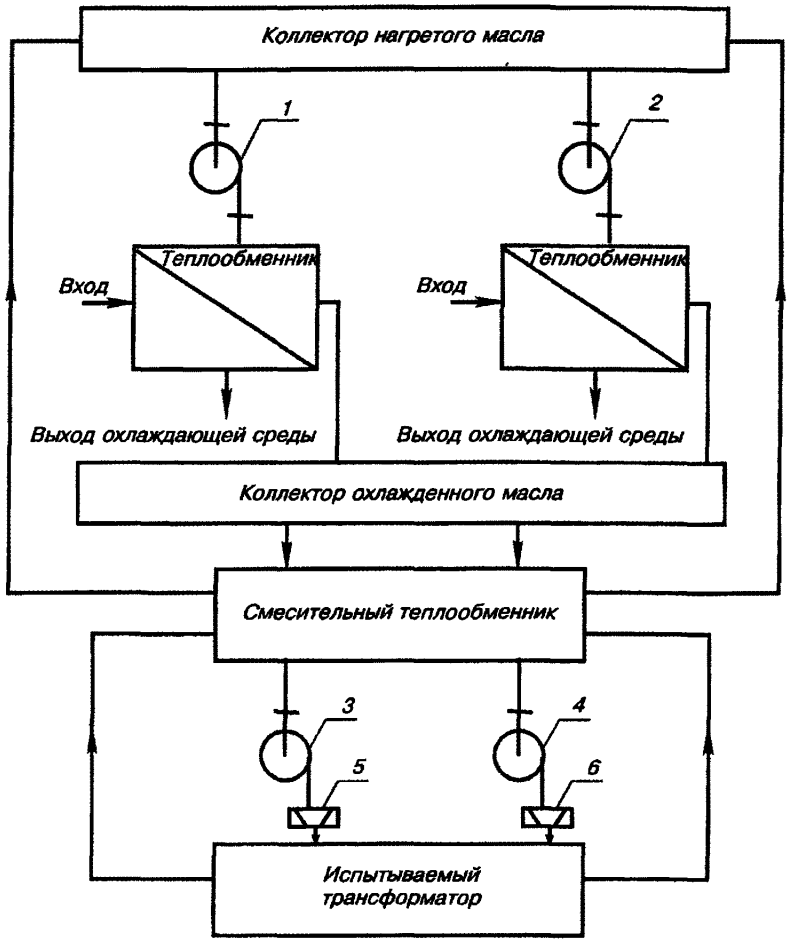
Для промежуточных температур масла значение плотности и удельной теплоемкости определяют линейным интерполированием.

Температура масла, которую следует поддерживать на входе в трансформатор при определении превышения средней температуры обмоток и элементов металлоконструкций $\theta_н$ рассчитывают по формуле:

$$\theta_н = \Delta\theta_м - \Delta\theta + \theta_{охл}, \qquad (М.2)$$

где $\Delta\theta_м$ — конечное превышение температуры масла в верхних слоях в трансформаторе, найденное расчетным путем, °С;
$\Delta\theta$ — разность температур масла на входе и выходе из охладителя, °С;
$\theta_{охл}$ — максимальная температура охлаждающей среды по ГОСТ 15150 в зависимости от климатического исполнения испытуемого трансформатора, °С.

При проведении испытаний соединяют охладительную установку с испытываемым трансформатором в соответствии с рисунком М.1.



1, 2 — насосы испытательной системы охлаждения; *3, 4* — насосы,обеспечивающие циркуляцию масла; *5, 6* — измерительные диафрагмы

Рисунок М.1 — Принципиальная схема установки для испытаний трансформаторов с принудительной циркуляцией масла без собственной системы охлаждения

С помощью камерных измерительных диафрагм по ГОСТ 26969 измеряют и устанавливают расход масла, поступающего из охладительной установки в трансформатор, такой же, как и при работе собственной системы охлаждения трансформатора. Если гидравлическое сопротивление трубопроводов между смесительным теплообменником и баком трансформатора примерно соответствует гидравлическому сопротивлению трубопроводов между собственной охладительной установкой и баком трансформатора, то расход масла можно считать равным, если равно число насосов одинаковой производительности в этом контуре при испытаниях и в собственной системе охлаждения трансформатора.

В опытах короткого замыкания регулируют работу теплообменников так, чтобы в процессе опытов температура масла, поступающего в трансформатор (температура масла в смесительном теплообминнике), оставалась постоянной и равной $\theta_н$.

Допускается ускорять процесс испытаний путем прекращения циркуляции охлаждающей среды в части или всех теплообменниках, пока температура масла в смесительном теплообменнике не достигнет значения на (5—10) °С ниже значения, рассчитанного по формуле М.2.

В установившихся тепловых режимах определяют превышения средних температур обмоток над средней температурой масла, рассчитываемой по 5.3.4.2 и температур элементов металлоконструкций над температурой масла вблизи них, измеряемой в по 5.3.5.

Аналогично проводят испытания на нагрев трансформаторов с направленным движением масла, дополнительно устанавливая расход масла из промежуточного (смесительного) теплообменника к обмоткам.

ПРИЛОЖЕНИЕ Н

(справочное)

ИСПЫТАНИЯ НА НАГРЕВ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С НОМИНАЛЬНОЙ ЧАСТОТОЙ 60 ГЦ ОТ ИСТОЧНИКА С ЧАСТОТОЙ 50 ГЦ

Метод применяют в том случае, если добавочные потери в элементах металлоконструкций трансформаторов составляют не более 30 % потерь короткого замыкания соответствующей пары обмоток.

Для проведения испытаний на нагрев измеряют при номинальной частоте трансформатора потери в опыте короткого замыкания, которые пересчитывают к номинальному току и расчетной температуре $P_{к\theta р}$, и потери в опыте холостого хода при номинальном напряжении P_0. Измерения проводят по ГОСТ 3484.1.

При испытании допускается применять измерительные трансформаторы тока и напряжения, предназначенные для работы при частоте 50 Гц, учитывая при необходимости их угловые погрешности, определенные при частоте 50 Гц.

Установившееся превышение температуры масла определяют в опыте короткого замыкания при частоте 50 Гц, регулируя напряжение так, чтобы в обмотках установился ток, при котором потери были бы равны $P_0 + P_{к\theta р}$. Испытания продолжают до достижения установившегося превышения температуры масла в верхних слоях.

Затем регулируют напряжение так, чтобы в обмотках установился ток $I = 1{,}095 \cdot I_{ном}$, ($I_{ном}$ — номинальный ток питаемой обмотки трансформатора при номинальной частоте). При этом токе определяют установившееся превышение температуры поверхности элементов металлоконструкций из ферромагнитных материалов над температурой масла.

Установившееся превышение температуры поверхностей элементов металлоконструкций из маломагнитных материалов (относительная магнитная проницаемость близка к единице) определяют при токе $I = 1{,}2\ I_{ном}$.

Установившееся превышение средней температуры обмоток над средней температурой масла определяют, установив ток I в амперах, рассчитываемый по формуле:

$$I = I_{ном} \cdot \sqrt{\frac{P_{осн} + P_{доб}}{P_{осн} + \frac{P_{доб.}}{1{,}44}}}, \qquad (Н.1)$$

где $P_{осн}$ и $P_{доб}$ — расчетные основные и добавочные потери в обмотке, превышение температуры которой определяют в данном опыте, Вт.

УДК 621.314.1/.2:006.354 МКС 29.180 Е64

Ключевые слова: трансформаторы, температура, превышение, испытание, масло, обмотка, нагрев, потери, сопротивление.

Текст печатается по изданию:
ГОСТ 3484.2-98 (МЭК 76-2-93) – Киев: Госстандарт Украины, 2000

Ответственный за выпуск *И.А. Воробей*

Сдано в набор 11.07.2005	Подписано в печать 27.07.2005		Формат бумаги 60×84/8.		Бумага офсетная.
Печать ризографическая	Усл. печ.л. 6,51	Уч.-изд. л. 5,65	Тираж	экз.	Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение:
НПРУП "Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации (БелГИСС)"
Лицензия № 02330/0133084 от 30.04.2004
БелГИСС, 220113, г. Минск, ул. Мележа, 3

gost.e-ecolog.ru