ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 55188— 2012 (МЭК 60076-5:2006)

ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ

Стойкость к коротким замыканиям

IEC 60076-5:2006
Power transformers —
Part 5: Ability to withstand short circuit
(MOD)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2014

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина» (ФГУП «ВЭИ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 37 «Электрооборудование для передачи, преобразования и распределения электроэнергии»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 ноября 2012 г. № 1180-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному стандарту МЭК 60076-5:2006 «Трансформаторы силовые. Часть 5. Стойкость к короткому замыканию» (IEC 60076-5:2006 «Power transformers — Part 5: Ability to withstand short circuit») путем изменения содержания отдельных структурных элементов, которые выделены вертикальной линией, расположенной на полях слева от этого текста, а также путем изменения отдельных фраз (слов, значений показателей, ссылок), которые выделены в тексте курсивом.

Оригинальный текст этих структурных элементов примененного международного стандарта и объяснения причин внесения технических отклонений приведены в дополнительном приложении ДА

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (gost.ru)

© Стандартинформ, 2014

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Требования к стойкости при коротких замыканиях 1
3.1 Общие требования 1
3.2 Режимы сверхтоков 2
4 Демонстрация стойкости при коротких замыканиях 4
4.1 Термическая стойкость при коротких замыканиях 5
4.2 Динамическая стойкость при коротких замыканиях 7
Приложение А (справочное) Теоретическая оценка стойкости при коротких замыканиях 15
А.1 Область применения 15
А.2 Общие положения 15
А.3 Инструкции по проведению анализа конструкции 15
Приложение Б (справочное) Определение трансформатора-прототипа 24
Приложение ДА (справочное) Оригинальный текст положений МЭК 60076-5:2006, которые применены в настоящем стандарте, с изменением их содержания для учета технических особенностей объекта стандартизации, принятых в Российской Федерации 25

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ

Стойкость к коротким замыканиям

Power transformers.
Ability to withstand short circuits

Дата введения — 2014—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает требования к силовым трансформаторам выдерживать без повреждений воздействия, возникающие при внешних коротких замыканиях (далее — КЗ).

В настоящем стандарте описаны процедуры расчета, используемые для демонстрации термической стойкости силового трансформатора, а также методы испытания и теоретической оценки, используемые для демонстрации стойкости к соответствующим динамическим воздействиям.

Данные требования применяются к трансформаторам, которые определены в области применения стандарта *ГОСТ Р 52719*.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 52719—2007 Трансформаторы силовые. Общие технические условия

ГОСТ Р 55195—2012 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется принять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Требования к стойкости при коротких замыканиях

3.1 Общие требования

Трансформатор вместе с дополнительным оборудованием и составными частями должен быть разработан и изготовлен таким образом, чтобы выдерживать без повреждений термические и динамические воздействия внешних КЗ при условиях, установленных в 3.2.

Издание официальное

Внешние КЗ не ограничиваются трехфазными КЗ. Они включают междуфазные, двухфазные и однофазные КЗ на землю. Токи в обмотках, возникающие в этих условиях, в настоящем стандарте называются сверхтоками.

3.2 Режимы сверхтоков

3.2.1 Общие положения

3.2.1.1 Условия применения, требующие специального рассмотрения

Требуют специального рассмотрения и должны быть четко определены в спецификациях трансформаторов следующие факторы, оказывающие влияние на величину сверхтоков, продолжительность или частоту их возникновения:

- регулировочные трансформаторы с очень низким сопротивлением КЗ, зависящим от сопротивления непосредственно присоединенных аппаратов для ограничения сверхтоков;
- блочные генераторные трансформаторы, подверженные высоким сверхтокам, возникающим из-за несинхронного включения генератора в сеть;
- трансформаторы, напрямую подключенные к вращающимся машинам, таким как двигатели или синхронные конденсаторы, которые могут действовать как генераторы, питающие трансформатор током в аварийных условиях;
- специальные трансформаторы и трансформаторы, установленные в сетях, характеризующихся высокой аварийностью (см. 3.2.6);
- рабочее напряжение на неповрежденных выводах в режиме КЗ свыше номинального.

3.2.1.2 Ограничения по токам для вольтодобавочных трансформаторов

Если общее сопротивление вольтодобавочного трансформатора и сети приводит к таким уровням токов КЗ, на которые с практической или экономической точки зрения трансформатор не может быть рассчитан, то изготовитель и заказчик должны придти к соглашению о максимально допустимых сверхтоках. В этом случае заказчик должен принять меры по ограничению сверхтока до максимального значения, установленного изготовителем и указанного на табличке номинальных параметров.

3.2.2 Двухобмоточные трансформаторы

3.2.2.1 Для целей настоящего стандарта различают три категории по номинальной мощности трехфазных трансформаторов или трехфазных групп:

- категория I — 25 — 2500 кВ·А;
- категория II — 2501 — 100000 кВ·А;
- категория III — свыше 100000 кВ·А.

3.2.2.2 При отсутствии других указаний действующее значение симметричного тока КЗ (см. 4.1.2) должно быть рассчитано для измеренного сопротивления КЗ трансформатора с учетом сопротивления КЗ сети.

Для трансформаторов категории I доля сопротивления КЗ сети не учитывается в расчете тока КЗ, если это сопротивление меньше или равно 5 % от сопротивления КЗ трансформатора.

Максимальное значение тока КЗ (ударный ток) должно быть рассчитано в соответствии с 4.2.3.

3.2.2.3 Общепринятые в мировой практике минимальные значения сопротивления КЗ трансформаторов при номинальном токе (на основном ответвлении) приведены в таблице 1.

Примечание — Значения сопротивлений КЗ, установленные в стандартах, технических условиях, техническом задании, технической спецификации или других документах на поставку продукции (далее — НД) на отдельные виды трансформаторов, могут отличаться от приведенных в таблице 1.

Если требуются более низкие значения сопротивления КЗ по сравнению с указанными в НД на отдельные виды трансформаторов, то требования к стойкости трансформатора при КЗ должны быть согласованы между изготовителем и заказчиком.

Таблица 1 — Минимальные значения сопротивления короткого замыкания двухобмоточных трансформаторов

Номинальная мощность, кВ·А	Минимальное сопротивление КЗ, %
25 – 630	4,0
631 – 1250	5,0
1251 – 2500	6,0
2501 – 6300	7,0
6301 – 25000	8,0

Окончание таблицы 1

Номинальная мощность, кВ·А	Минимальное сопротивление КЗ, %
25001 – 40000	10,0
40001 – 63000	11,0
63001 – 100000	12,5
Свыше 100000	>12,5

Примечание 1 — Значения сопротивления КЗ для номинальной мощности свыше 100000 кВ·А обычно являются предметом соглашения между изготовителем и заказчиком.

Примечание 2 — При соединении однофазных устройств в трехфазную группу значение номинальной мощности применяется к трехфазной группе.

3.2.2.4 Мощность КЗ сети на месте установки трансформатора может быть указана заказчиком в заявке для получения значения симметричного тока КЗ, используемого при разработке и испытаниях.

Если мощность КЗ сети не указана заказчиком, то должны быть использованы значения, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 — Мощности короткого замыкания сети

Номинальное напряжение сети, кВ	Мощность трехфазного КЗ сети (за исключением сети на стороне НН автотрансформаторов) S_{cr}, МВ·А	
	для трансформаторов классов напряжения ниже 110 кВ	для трансформаторов классов напряжения 110 кВ и выше, автотрансформаторов классов напряжения до 750 кВ включ. и трансформаторов собственных нужд электростанций
До 10	500	—
Св. 10 до 35 включ.	2500	—
110	—	15000
150	—	20000
220	—	25000
330	—	35000
500	—	50000
750	—	75000
1150	—	80000

Примечание — По соглашению между изготовителем и заказчиком допускается принимать мощности КЗ сети, отличающиеся от приведенных в таблице 2.

Для трехобмоточных автотрансформаторов мощность КЗ сети на стороне низшего напряжения (далее — НН), если в НД не указано иное, следует принимать:

- 600 МВ·А — при номинальном напряжении стороны НН до 20 кВ и/или мощности автотрансформаторов до 63 МВ·А включ. независимо от их класса напряжения;
- 1000 МВ·А — при номинальном напряжении стороны НН 20 кВ и свыше автотрансформаторов класса напряжения 220 кВ независимо от их мощности;
- 2000 МВ·А — при номинальном напряжении стороны НН 20 кВ и свыше автотрансформаторов классов напряжения 330, 500 и 750 кВ.

Для трехобмоточных автотрансформаторов класса напряжения 1150 кВ мощность короткого замыкания сетей устанавливается в НД на эти трансформаторы.

Примечание — См. ДА.1 (приложение ДА).

3.2.2.5 Для двухобмоточных трансформаторов, как правило, принимается во внимание только трехфазное КЗ, поскольку рассмотрение этого случая в основном является достаточным для того, чтобы охватить другие возможные виды КЗ (за исключением особого случая, рассмотренного в примечании к 3.2.5).

Примечание — В случае наличия обмоток, соединенных в зигзаг, ток однофазного КЗ на землю может превысить ток трехфазного КЗ. Однако эти большие токи протекают только в половине обмоток двух фаз, а токи в других обмотках, соединенных в звезду, будут меньше, чем при трехфазном КЗ. Электродинамическая опасность для обмоток в сборе может быть выше при трех- или однофазном КЗ, в зависимости от конструкции обмоток. Изготовитель и заказчик должны придти к соглашению, какой вид КЗ должен быть рассмотрен.

3.2.3 Трансформаторы с числом обмоток более двух и автотрансформаторы

Сверхтоки в обмотках, включая компенсационные и вспомогательные обмотки, должны определяться по сопротивлениям трансформатора и сети (сетей). Необходимо учитывать различные виды КЗ, которые могут возникнуть при работе, например, однофазные КЗ на землю и междуфазные КЗ, связанные с режимом работы нейтрали сети и трансформатора. Заказчик должен указать в заявке характеристики каждой сети (как минимум, уровень мощности КЗ сети и соотношение между полным сопротивлением нулевой последовательности и полным сопротивлением прямой последовательности).

Компенсационные обмотки трехфазных трансформаторов, соединенные в треугольник, должны выдерживать сверхтоки, возникающие при различных повреждениях в сети, которые могут возникать в эксплуатации при соответствующих режимах работы нейтрали сети.

В случае, если однофазные трансформаторы предназначены для соединения в трехфазную группу и заказчиком в заявке не указано о принятии мер по исключению риска междуфазного КЗ, то компенсационная обмотка должна выдерживать КЗ на ее выводах.

Примечание — В случае, если экономически не оправдано изготавливать компенсационные обмотки, способные выдерживать КЗ на их выводах, то уровень сверхтоков должен быть ограничен надлежащими способами, такими как последовательные реакторы или, в некоторых случаях, предохранители. Следует уделить внимание защите от КЗ на участке между трансформатором и защитными аппаратами.

3.2.4 Вольтодобавочные трансформаторы

Сопротивление КЗ вольтодобавочных трансформаторов может быть очень низким, и поэтому сверхтоки в обмотках в основном определяются характеристиками сети в месте установки трансформатора. Данные характеристики должны быть указаны заказчиком в заказе.

Если вольтодобавочный трансформатор непосредственно связан с трансформатором для изменения амплитуды и/или фазы напряжения, то он должен быть способен выдерживать сверхтоки, определенные по сумме сопротивлений этих двух трансформаторов.

3.2.5 Трансформаторы, непосредственно связанные с другим оборудованием

Если трансформатор непосредственно связан с другим оборудованием, сопротивление которого ограничивает ток КЗ, то по соглашению между изготовителем и заказчиком может быть учтена сумма сопротивлений трансформатора, сети и присоединенного оборудования.

Это относится, например, к блочным трансформаторам, если соединение между генератором и трансформатором выполнено таким образом, что вероятность междуфазного КЗ или двухфазного КЗ на землю на этом участке пренебрежимо мала.

Примечание — Если соединение между генератором и трансформатором выполнено таким образом, то наиболее опасные по значениям токов условия в случаях трансформатора с соединением обмоток по схеме Ун/Д с заземленной нейтралью могут иметь место при однофазном КЗ на землю в сети на стороне соединенных в звезду обмоток или несинхронного включения генератора.

3.2.6 Специальные трансформаторы и трансформаторы для установки в сетях с высокой аварийностью

Стойкость трансформатора к частым сверхтокам по причине специфики применения (например, трансформаторы для дуговой печи, стационарные тяговые трансформаторы) или при работе в тяжелых условиях (например, большое число КЗ в прилегающих сетях) должна быть предметом специального соглашения между изготовителем и заказчиком. Заказчик должен заблаговременно известить изготовителя о любых возможных ненормированных условиях, ожидаемых в сети (сетях).

3.2.7 Устройства для переключения ответвлений

Устройство для переключения ответвлений, если оно установлено, должно быть способным выдерживать такие же сверхтоки вследствие КЗ, как и обмотки. При этом не требуется, чтобы устройство регулирования под нагрузкой (РПН) было способно переключать ток КЗ.

3.2.8 Вывод нейтрали

Вводы и отводы нейтрали обмоток, соединенных в звезду или зигзаг, должны быть рассчитаны на максимальный сверхток, который может через них протекать.

4 Демонстрация стойкости при коротких замыканиях

Требования данного раздела применяются как к масляным, так и сухим трансформаторам, на которые распространяется *ГОСТ Р 52719*.

4.1 Термическая стойкость при коротких замыканиях

4.1.1 Общее требование

В соответствии с настоящим стандартом термическая стойкость при КЗ должна быть подтверждена расчетом. Данный расчет должен быть произведен в соответствии с требованиями 4.1.2—4.1.5.

4.1.2 Значение симметричного тока короткого замыкания *I*

4.1.2.1 Наибольший установившийся ток КЗ $I_{к.отв}$, кА, в двухобмоточных трансформаторах и двухобмоточных режимах трехобмоточных трансформаторов следует рассчитывать следующим образом:

- для однофазных трансформаторов и автотрансформаторов, включенных между фазой и нейтралью, а также для трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов — по формуле

$$I_{к.отв} = \frac{U_{ном.отв}}{\sqrt{3}\ (z_{т.отв} + z_c)}, \qquad (1)$$

где $I_{к.отв}$ — наибольший установившийся линейный ток короткого замыкания ответвления, кА;

$U_{ном.отв}$ — номинальное линейное напряжение ответвления, кВ;

$z_{т.отв}$ — фазное сопротивление КЗ, отнесенное к рассматриваемой обмотке (стороне) и ответвлению, определяемое по формуле (2), Ом;

z_c — фазное сопротивление КЗ сети, определяемое по формуле (3), Ом.

4.1.2.2 Наибольший установившийся ток КЗ в трехобмоточных режимах должен быть определен по трехлучевой схеме замещения, каждый луч которой состоит из сопротивления КЗ, вносимого трансформатором и включенного последовательно с ним сопротивления КЗ соответствующей сети z_c.

4.1.2.3 Сопротивление КЗ трансформатора $z_{т.отв}$, Ом, следует рассчитывать по формуле

$$z_{т.отв} = \frac{U_{к.отв} U^2_{ном.отв}}{100 S_{ном}}, \qquad (2)$$

где $U_{к.отв}$ — расчетное значение напряжения КЗ ответвления, приведенное к номинальной мощности трансформатора на основном ответвлении, %;

$S_{ном}$ — номинальная мощность трансформатора на основном ответвлении, МВ·А.

4.1.2.4 Сопротивление КЗ сети z_c, Ом, рассчитывают по формуле

$$z_c = \frac{U^2_{с.ном}}{S_c}, \qquad (3)$$

где $U_{с.ном}$ — номинальное линейное напряжение сети, кВ;

S_c — мощность трехфазного КЗ сети, МВ·А.

Примечания

1 Для трансформаторов мощностью менее 3,15 МВ·А сопротивление КЗ сети, как правило, не учитывают, если оно составляет не более 5 % от сопротивления КЗ трансформатора, т.е. в формуле (1) $z_c = 0$.

2 Для трансформаторов собственных нужд электростанций классов напряжения до 35 кВ включ. сопротивление КЗ сети не учитывается.

4.1.2.5 Для трехобмоточных трансформаторов, исключая автотрансформаторы, в любом двух- или трехобмоточном режиме кратность наибольшего установившегося тока КЗ, определяемого в соответствии с 4.1.2.1, по отношению к номинальному току обмотки должна быть ограничена в соответствии с таблицей 2а при условии равенства мощностей всех обмоток. В случае различных мощностей обмоток предельные кратности наибольшего установившегося тока КЗ должны быть установлены в НД на данные трансформаторы.

Таблица 2а

Класс напряжения обмотки ВН трансформатора, кВ	Предельная кратность наибольшего установившегося тока КЗ		
	в ближайшей к стержню магнитной системы обмотке	в средней по расположению на стержне магнитной системы обмотке	в наружной по расположению на стержне магнитной системы обмотке
35	—	12,0	—
110	10,0	14,0	9,5
150	10,0	14,0	9,5
220	10,0	15,0	8,0

Примечание — См. ДА.2 (приложение ДА).

4.1.3 Продолжительность симметричного тока короткого замыкания

4.1.3.1 Наибольшую продолжительность КЗ ($t_{к.max}$) на зажимах трансформаторов следует принимать при КЗ на сторонах с номинальным напряжением 35 кВ и ниже — 4 с, при КЗ на сторонах с номинальным напряжением 110 кВ и выше — 3 с.

4.1.3.2 Допустимую продолжительность внешнего КЗ $t_к$, с, при протекании установившегося тока КЗ менее наибольшего установившегося тока следует рассчитывать по формуле

$$t_к = t_{к.max} \frac{I^2_{к.отв}}{I^2_к}, \quad (4)$$

где $t_{к.max}$ — допустимая продолжительность КЗ при протекании наибольшего установившегося тока КЗ по 4.1.3.1, с;

$I_{к.отв}$ — наибольший установившийся ток КЗ, А;

$I_к$ — установившийся ток КЗ менее наибольшего установившегося тока, А.

Наибольшее допустимое значение продолжительности $t_к$ не следует принимать более 15 с независимо от значения $I_к$.

Примечание — См. ДА.3 (приложение ДА).

4.1.4 Максимально допустимое значение средней температуры каждой из обмоток

Средняя температура Θ_1 каждой обмотки после протекания симметричного тока КЗ I со значением и продолжительностью, указанными в 4.1.2 и 4.1.3, соответственно, на любом ответвлении, не должна превышать значение, указанное в таблице 3.

Таблица 3 — Максимально допустимые значения средней температуры каждой обмотки после КЗ

Тип трансформатора	Температура изоляции, °С (в скобках — класс нагревостойкости)	Максимальное значение температуры, °С	
		медь	алюминий
Масляный	105 (A)	250	200
Сухой	105 (A)	180	180
	120 (E)	250	200
	130 (B)	350	200
	155 (F)	350	200
	180 (H)	350	200
	200	350	200
	220	350	200

Примечания

1 В случае, если обмотки выполнены из высокопрочных алюминиевых сплавов, то по соглашению между изготовителем и заказчиком могут быть предусмотрены более высокие максимальные температуры, но не превышающие соответствующих значений для меди.

2 Если в масляных трансформаторах используются системы изоляции, отличные от класса А, то другие максимальные значения температуры могут быть предусмотрены по соглашению между изготовителем и заказчиком.

Начальная температура обмотки Θ_0, используемая в формулах (5) и (6), должна соответствовать сумме максимально допустимой температуры охлаждающей среды и превышения температуры обмотки над температурой охлаждающей среды при номинальных условиях, измеренного по сопротивлению. Если измеренное превышение температуры обмотки над температурой охлаждающей среды отсутствует, то начальная температура обмотки Θ_0 должна соответствовать сумме максимально допустимой температуры охлаждающей среды и превышения температуры, допустимого для изоляции обмотки.

4.1.5 Расчет температуры Θ_1

Средняя температура Θ_1 на обмотке после КЗ рассчитывается по формулам.

$$\Theta_1 = \Theta_0 + \frac{2(\Theta_0 + 235)}{\frac{106000}{J^2 t} - 1} \quad \text{— для обмоток из меди;} \quad (5)$$

$$\Theta_1 = \Theta_0 + \frac{2(\Theta_0 + 225)}{\frac{45700}{J^2 t} - 1}$$ — для обмоток из алюминия, (6)

где Θ_0 — начальная температура обмотки, °С;

J — плотность тока КЗ, соответствующая действующему значению установившегося симметричного тока КЗ, А/мм²;

t — продолжительность КЗ, с.

Примечание — Формулы (5) и (6) основаны на адиабатических условиях и справедливы только для продолжительности КЗ не более 10 с. Коэффициенты основаны на свойствах материалов, приведенных в таблице 3а.

Таблица 3а

Параметр	Материал	
	Медь	Алюминий
Удельная теплоемкость при температуре 100 °С (Дж/кг°С)	398,4	928
Плотность при температуре 100 °С (кг/м³)	8894	2685
Удельное сопротивление при температуре 100 °С	0,0224	0,0355

4.2 Динамическая стойкость при коротких замыканиях

4.2.1 Общие требования

4.2.1.1 При приемке трансформатора в части стойкости при КЗ способность выдерживать динамические воздействия тока КЗ должна быть подтверждена (за исключением трансформаторов собственных нужд электростанций) в зависимости от мощности трансформатора посредством по крайней мере одного из перечисленных далее способов, который должен быть указан в НД на конкретные трансформаторы или оговорен при заключении контракта на поставку трансформатора:

- испытание на стойкость при КЗ;
- сравнение согласно указаниям А.3.3.2 с успешно испытанным трансформатором-прототипом;
- проверка по нормам проектирования изготовителя (расчетное обоснование) согласно указаниям А.3.3.3 для трансформаторов мощностью свыше 40 МВА, которые согласно НД не подлежат испытаниям на стойкость при КЗ.

4.2.1.2 Трансформаторы собственных нужд электростанций независимо от мощности должны быть испытаны на стойкость при КЗ. При этом возможна замена испытаний расчетным сопоставлением с испытанным прототипом, но недопустима приемка только на базе расчетного обоснования; испытание и выбор прототипа (в случае замены испытаний сопоставительным расчетом) следует проводить по методике, согласованной между изготовителем и заказчиком.

Примечание — См. ДА.4 (приложение ДА).

4.2.2 Состояние трансформатора перед проведением испытаний на стойкость при коротких замыканиях

4.2.2.1 Если не установлено иное, то испытания должны проводиться на новом трансформаторе, готовом к работе. Защитные устройства, такие как газовое реле и предохранительный клапан, должны быть установлены на трансформаторе на время испытаний.

Примечание — Установка устройств, не влияющих на поведение трансформатора при КЗ (например, съемных охладителей) не требуется.

4.2.2.2 Перед испытаниями на КЗ трансформатор должен пройти приемо-сдаточные испытания согласно *ГОСТ Р 52719*. Испытание электрической прочности изоляции грозовыми импульсами на данной стадии не требуется.

Если обмотки выполнены с регулировочными ответвлениями, то реактивное сопротивление и, если требуется, активное сопротивление должны быть измерены для положений переключателя, в которых будут проводиться испытания на КЗ.

Все измерения реактивного сопротивления должны быть выполнены с помощью приборов класса точности не ниже 0,2.

Протокол с результатами приемо-сдаточных испытаний должен быть в наличии перед началом испытаний.

4.2.2.3 Перед началом испытаний на КЗ средняя температура обмотки должна быть в пределах от 10 °С до 40 °С.

Во время испытаний температура обмотки может увеличиться из-за протекания тока КЗ. Этот аспект нужно учитывать при наладке испытательной схемы для трансформаторов категории I.

4.2.3 Амплитуда испытательного тока i для двухобмоточных трансформаторов

Испытание должно проводиться током с максимальной апериодической составляющей в испытуемой фазе.

Амплитуда первого пика асимметричного испытательного тока i вычисляется по формуле

$$\hat{i} = Ik\sqrt{2}, \tag{7}$$

где установившийся ток КЗ I определяется в соответствии с 4.1.2.

Коэффициент k учитывает начальное смещение испытательного тока, а $\sqrt{2}$ учитывает амплитудное значение синусоидального тока.

Коэффициент* $k\sqrt{2}$, или ударный коэффициент, зависит от соотношения X/R, где X — сумма реактивных сопротивлений трансформатора и сети ($X_t + X_s$), Ом; R — сумма активных сопротивлений трансформатора и сети ($R_t + R_s$), Ом; где R_t определяется при расчетной температуре.

Если сопротивление КЗ сети учитывается в расчетах тока КЗ, то соотношение X/R сети, если оно не установлено, должно приниматься равным этому соотношению для трансформатора. В таблице 4 приведены значения коэффициента амплитуды в виде функции от X/R, используемой для практических целей[1].

Таблица 4 — Значения коэффициента $k\sqrt{2}$

X/R	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k\sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55
Примечание — Для других значений X/R от 1 до 14 коэффициент $k\sqrt{2}$ может быть определен с помощью линейной интерполяции.										

Примечание — Если $Z_k < 0{,}05\ Z_t$, то вместо X_t и R_t можно применять x_t и r_t для основного ответвления, где x_T — реактивная составляющая z_t, %; r_T — активная составляющая z_t при расчетной температуре, %; z_t — сопротивление КЗ трансформатора при расчетной температуре, %.

По соглашению между изготовителем и заказчиком при отношении X/R более 14 допускается принимать ударный коэффициент 1,9 и $k\sqrt{2}$ равный 2,69.

Примечание — См. ДА.5 (приложение ДА).

4.2.4 Допуск на амплитудное значение асимметричного тока и действующее значение симметричного испытательного тока короткого замыкания

При достаточно большой продолжительности опыта КЗ асимметричный ток с амплитудой первого пика i снизится до установившегося значения симметричного тока КЗ (см. 4.1.2).

Значение амплитуды асимметричного тока, полученное в опыте, не должно отличаться более чем на 5%, а симметричного тока — более чем на 10 % от соответствующего заданного значения.

4.2.5 Процедура испытаний на стойкость при коротких замыканиях двухобмоточных трансформаторов

4.2.5.1 Для того, чтобы получить значение испытательного тока согласно 4.2.4, напряжение холостого хода источника питания может превышать номинальное напряжение питаемой обмотки. КЗ обмотки может быть выполнено либо после (последующее КЗ), либо до (предварительное КЗ) приложения напряжения к питаемой обмотке трансформатора.

Примечание — Другой метод испытаний состоит в приложении одновременно двух напряжений противоположных фаз к двум обмоткам, которые можно запитать от одного источника или двух отдельных и синхронизированных источников питания. Преимущество данного метода состоит в предотвращении насыщения стержня магнитопровода и уменьшении мощности, необходимой для питания.

---

* Таблица 4 основана на следующем выражении для ударного коэффициента:

$$k\sqrt{2} = \left(1 + \left(e^{-(\varphi + \pi/2)R/X}\right)\sin\varphi\right)\sqrt{2},$$

где e — основание натурального логарифма; φ – фазовый угол, равный arctg X/R в рад.

Если используется последующее КЗ, то напряжение питаемой обмотки не должно превышать значения, равного 1,15 от номинального, если иное не согласовано между изготовителем и заказчиком.

Если используется предварительное КЗ для трансформатора с концентрическими обмотками (за исключением двойных концентрических обмоток), то питание предпочтительно подавать на обмотку, наиболее удаленную от стержня магнитопровода. Ближайшая к стержню обмотка накоротко замыкается, с тем чтобы избежать насыщения стержня магнитопровода, которое может приводить к избыточному току намагничивания, накладываемому на ток КЗ во время нескольких первых периодов тока.

Если испытательное оборудование требует подключения питания к внутренней обмотке, то необходимо принять меры по предотвращению броска тока намагничивания, например путем предварительного намагничивания магнитопровода.

Для трансформаторов с чередующимися или двойными концентрическими обмотками метод предварительного КЗ должен применяться только по соглашению между изготовителем и заказчиком.

Для того чтобы избежать опасного перегрева, необходимо обеспечить соответствующие интервалы между последовательными опытами КЗ. Время интервалов должно быть определено по соглашению между изготовителем и покупателем.

Примечание — При испытании трансформаторов категории I может потребоваться учет изменения коэффициента X/R, обусловленного ростом температуры во время опыта, и обеспечение его компенсации в испытательной схеме.

4.2.5.2 Для получения значения начальной амплитуды ударного тока (см. 4.2.3) в обмотке испытуемой фазы момент включения должен быть настроен посредством синхронного включения.

Для проверки значений испытательных токов $\hat{i}$ и I необходимо всегда использовать осциллографирование токов.

Для получения максимальной апериодической составляющей тока в одной из фазных обмоток включение должно происходить в момент, когда напряжение, подаваемое на эту обмотку, проходит через ноль.

Примечания

1 Для обмоток с соединением в звезду максимальная апериодическая составляющая достигается путем включения в момент, когда фазное напряжение проходит через ноль. Коэффициент k ударного тока $\hat{i}$ может быть определен из осциллограмм линейных токов. Для трехфазных испытаний обмоток, соединенных в треугольник, данное условие может быть достигнуто путем включения в момент, когда линейное напряжение проходит через ноль. Одним из методов определения k будет включение на максимум линейного напряжения во время наладочных опытов. В этом случае коэффициент k определяется из осциллограмм линейных токов.

Другим методом определения фазного тока в обмотке, соединенной в треугольник, является соответствующее пересоединение вторичных обмоток трансформаторов тока, измеряющих линейные токи. Осциллограф может быть настроен на запись фазных токов.

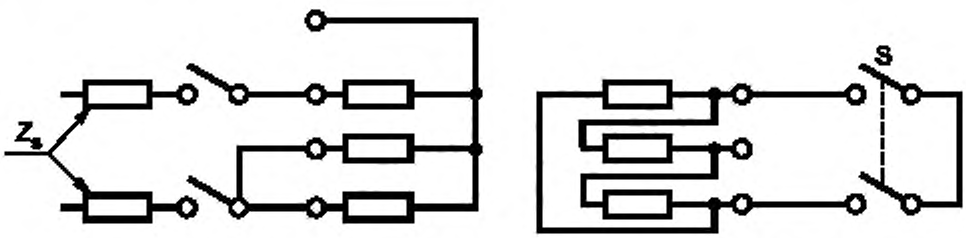
2 Для трансформаторов со схемой соединения звезда-зигзаг категории I со значением $x_t/r_t < 3$ (см. 4.2.3) три фазы включаются одновременно без применения синхронного выключателя. Для других трансформаторов со схемой соединения звезда-зигзаг метод включения является предметом соглашения между изготовителем и заказчиком.

4.2.5.3 Частота напряжения питания должна быть в общем случае равна номинальной частоте трансформатора. Тем не менее по соглашению между изготовителем и заказчиком допускается проводить испытание трансформаторов 60 Гц от источника питания напряжением 50 Гц и наоборот при условии, что будут достигнуты предписанные 4.2.3 и 4.2.4 значения тока.

Данная процедура требует соответствующей корректировки напряжения питания по отношению к номинальному напряжению трансформатора.

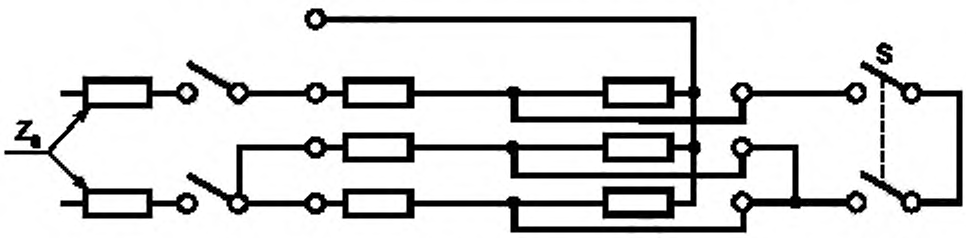
4.2.5.4 Для трехфазных трансформаторов должно быть использовано трехфазное питание при условии соблюдения требований 4.2.4. В противном случае допускается использовать однофазное питание, как описано ниже. Для обмоток, соединенных в треугольник, однофазное питание подается между двумя углами треугольника, а напряжение во время опыта должно быть таким же, как напряжение между фазами во время трехфазного опыта. Для обмоток, соединенных в звезду, однофазное напряжение подается между одним линейным выводом и двумя другими линейными выводами, соединенными вместе. Однофазное напряжение во время опыта должно быть равно $\sqrt{3}/2$ от напряжения между фазами во время трехфазного опыта.

Примеры двух схем однофазных испытаний, эквивалентные трехфазным испытаниям, приведены на рисунках 1 и 2.



Z_s — сопротивление испытательной схемы; S — синхронный выключатель для последующего КЗ или жесткое соединение для предварительного КЗ

Рисунок 1 — Трансформатор со схемой соединения обмоток $У_x/Д$



Z_s — сопротивление испытательной схемы; S — синхронный выключатель для последующего КЗ или жесткое соединение для предварительного КЗ

Рисунок 2 — Автотрансформатор со схемой соединения обмоток $У_x$авто

Примечания

1 Однофазные испытания в основном используются для трансформаторов категорий II и III и редко для трансформаторов категории I.

2 Для соединенных в звезду обмоток с неполной изоляцией нейтрали необходимо проверить, достаточна ли изоляция нейтрали для однофазного испытания.

3 Если для обмоток, соединенных в звезду, мощность питания недостаточна для однофазного испытания, описанного выше, и имеется выведенная нейтраль, то изготовитель и заказчик могут придти к соглашению о применении однофазного питания между линейным выводом и нейтралью при условии, что нейтраль рассчитана на соответствующий ток. При такой схеме может быть удобным взаимное соединение соответствующих выводов неиспытываемых фаз для лучшего контроля их напряжения при условии, что это реализуемо и схема является корректной.

4.2.5.5 При отсутствии определенных требований со стороны заказчика количество опытов КЗ на трехфазных и однофазных трансформаторах определяется следующим образом (не включая наладочные опыты при токе, меньшем 80% от заданного, необходимые для проверки правильности работы испытательного оборудования в отношении момента включения, текущих настроек, затухания и продолжительности).

Для однофазных трансформаторов категории I количество опытов должно составлять пять. Если не установлено иное, то на однофазном трансформаторе с ответвлениями должны быть проведены пять опытов на разных положениях переключателя, т.е. два опыта — в положении, соответствующем максимальному коэффициенту трансформации, один опыт — на основном ответвлении и два опыта — в положении, соответствующем минимальному коэффициенту трансформации.

Для трехфазных трансформаторов категории I количество опытов должно быть равно 15, т.е. по пять опытов на каждой фазе. Если не установлено иное, то на трехфазном трансформаторе с ответвлениями должны быть проведены 15 опытов в разных положениях переключателя, т.е. пять опытов — в положении, соответствующем максимальному коэффициенту трансформации на одной из внешних фаз, пять опытов — на основном ответвлении на средней фазе и пять опытов — в положении, соответствующем минимальному коэффициенту трансформации на другой внешней фазе.

Для однофазных трансформаторов категории II количество опытов должно составлять три. Если не установлено иное, то на однофазном трансформаторе с ответвлениями должны быть проведены три опыта на разных положениях переключателя, т.е. один опыт — в положении, соответствующем максимальному коэффициенту трансформации, один опыт — на основном ответвлении и один опыт — в положении, соответствующем минимальному коэффициенту трансформации.

Для трехфазных трансформаторов категории II количество опытов должно быть равно девяти, т.е. по три опыта на каждой фазе. Если не установлено иное, то на трехфазном трансформаторе с ответвлениями должны быть проведены девять опытов на разных положениях переключателя, т.е. три опыта — в положении, соответствующем максимальному коэффициенту трансформации на одной из внешних фаз, три опыта — на основном ответвлении на средней фазе и три опыта — в положении, соответствующем минимальному коэффициенту трансформации на другой внешней фазе.

Примечания

1 Если по результатам расчетов на других ответвлениях имеют место более высокие значения токов КЗ и электродинамических сил, то в обоснованных случаях допускается проводить испытания на других положениях переключателя. В этом случае допускается не проводить испытание третьей фазы при условии, что по результатам расчетов стойкость трансформатора в целом может быть подтверждена испытаниями первых двух фаз.

2 Последовательность испытаний на разных положениях переключателя следует выбирать исходя из условия увеличения электродинамических усилий.

3 Если в НД на отдельные виды трансформаторов не установлено иное, то в программу испытаний двухобмоточных трансформаторов с расщепленными обмотками и регулированием напряжения устройством РПН рекомендуется включать следующие режимы:

- одновременного КЗ на всех частях расщепленной обмотки;
- КЗ на каждой отдельной части расщепленной обмотки.

4 Примечания 1 — 3 направлены на учет Российской национальной стандартизации.

5 См. ДА.6 (приложение ДА).

Для трансформаторов категории III количество опытов и положения переключателя всегда должны быть согласованы между изготовителем и заказчиком. При этом для того, чтобы как можно лучше воспроизвести воздействия повторяющихся в условиях эксплуатации КЗ, обеспечить лучший мониторинг поведения трансформатора при испытаниях и дать обоснованное заключение на основе возможных отклонений измеряемого сопротивления КЗ, рекомендуется следующее количество опытов:

- три — для однофазных трансформаторов;
- девять — для трехфазных трансформаторов.

В отношении положений переключателя и последовательности испытаний рекомендуется такая же процедура, как и для трансформаторов категорий I и II.

Продолжительность каждого опыта (с допускаемым отклонением ±10%):

- 0,5 с — для трансформаторов категории I;
- 0,25 с — для трансформаторов категорий II и III.

4.2.6 Процедура испытаний на стойкость при коротких замыканиях трансформаторов с более чем двумя обмотками и автотрансформаторов

Для трансформаторов с более чем двумя обмотками и автотрансформаторов (см. 3.2.3) должны быть рассмотрены различные режимы КЗ. Как правило, такие режимы имеют более сложную природу по сравнению с трехфазным КЗ, которое может рассматриваться как базовый случай для двухобмоточных трансформаторов (см. 3.2.2.5).

Часто необходимо предусматривать специальные испытательные схемы для воспроизведения при испытаниях возможных эксплуатационных режимов КЗ. Режим испытаний выбирается, как правило, на основе анализа результатов расчета электродинамических сил, возникающих во всех возможных случаях КЗ.

Схема испытаний, значения тока, последовательность и количество опытов всегда являются предметом соглашения между изготовителем и заказчиком.

Рекомендуется, чтобы допуски на согласованные значения тока и продолжительность испытаний соответствовали предписанным для двухобмоточных трансформаторов, а последовательность опытов выбиралась в соответствии с ожидаемым увеличением электродинамических сил.

Примечание — Если в НД на отдельные виды трансформаторов не установлено иное, то в программу испытаний трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов рекомендуется включать следующие режимы:

- двухобмоточные режимы КЗ на соседних по положению основных обмотках;
- трехобмоточный режим КЗ на средней по положению основной обмотке при питании двух других обмоток. Допускается замена трехобмоточного режима на режим с питанием средней по расположению основной обмотки и замыканием двух других обмоток. В этом случае следует принять меры по обеспечению распределения токов КЗ по обмоткам, соответствующего нормированным значениям токов КЗ, например установить токоограничивающие реакторы в одну из закороченных обмоток.

4.2.7 Обнаружение повреждений и оценка результатов испытаний

4.2.7.1. Перед проведением испытаний на стойкость при КЗ необходимо провести измерения и испытания в соответствии с 4.2.2 и проверить состояние газового реле (если имеется). Данные измерения и испытания составляют основу для обнаружения повреждений.

4.2.7.2. Во время каждого опыта (включая наладочные опыты) должно выполняться осциллографирование:

- приложенного напряжения;
- токов (см. 4.2.5.2).

Кроме того, следует выполнять визуальный наружный осмотр трансформатора и непрерывную видеозапись.

Примечания

1 Для более полной оценки результатов опытов можно использовать дополнительные средства получения информации, например запись тока между баком (изолированным) и землей, шума и вибраций, изменения давления масла в различных точках внутри бака во время протекания тока КЗ и т.д.

2 При проведении испытаний в результате вибраций может происходить случайное размыкание газового реле. Если в реле не обнаружен горючий газ, то данное обстоятельство не свидетельствует о недостаточной стойкости трансформатора.

3 Искрения в сварных швах бака могут возникать при включении, а внутреннее искрение в точках соединений металлоконструкций — при включении и КЗ.

4.2.7.3 После каждого опыта необходимо проанализировать осциллограммы, проверить газовое реле и измерить реактивное сопротивление КЗ. Для трехфазных трансформаторов реактивное сопротивление должно быть определено пофазно или путем прямого измерения по схеме «фаза-нейтраль» в случае обмотки, соединенной в звезду, либо с помощью подходящего метода измерения для обмотки, соединенной в треугольник.

Примечания

1 Можно использовать дополнительные способы оценки результатов испытаний, такие, как измерение сопротивления обмоток постоянному току, метод низковольтных импульсов (для сравнения осциллограмм, полученных в начальном состоянии и после испытания), анализ спектра частотных реакций и передаточных функций, измерение тока холостого хода и сравнение результатов анализа растворенных газов до испытания и после него.

2 Любые различия между результатами измерений до опыта и после него можно использовать в качестве критерия определения возможных деформаций. Это особенно важно для регистрации в ходе нескольких опытов возможных изменений реактивного сопротивления КЗ после каждого опыта, которое может как возрастать, так и снижаться.

3 Для определения межвитковых замыканий рекомендуется проводить измерение реактивного сопротивления КЗ как со стороны НН, так и со стороны ВН.

4 В случае, если в во время трех опытов имеет место изменение реактивного сопротивления КЗ, соизмеримое с указанными в 4.2.7.4 пределами, то рекомендуется по соглашению между изготовителем и заказчиком провести один или два дополнительных опыта КЗ.

5 При испытании первой пары основных обмоток трехобмоточных трансформаторов возможно изменение реактивного сопротивления КЗ второй пары основных обмоток. По этой причине для этих трансформаторов рекомендуется проводить повторное измерение реактивного сопротивления перед первым опытом в каждом из последующих режимов.

6 Примечания 4 и 5 направлены на учет Российской национальной стандартизации.

4.2.7.4 По окончании испытаний необходимо проверить трансформатор снаружи, а также состояние газового реле. Результаты измерений реактивного сопротивления КЗ и осциллограммы, полученные в каждом из опытов, должны быть проанализированы для индикации возможных изменений во время испытаний, особенно для индикации изменения реактивного сопротивления КЗ.

Примечание 1 — Если обмотки имеют регулировочные ответвления, то по окончании испытаний реактивное сопротивление КЗ должно быть измерено для всех ответвлений, на которых проводились испытания.

Примечание 2 — В общем случае значение реактивного сопротивления КЗ имеет тенденцию к стабилизации в ходе испытаний. Определенное изменение реактивного сопротивления КЗ возможно с течением времени после проведения испытаний. Поэтому при наличии изменений, превышающих допуск на основании измерений сразу после испытаний, можно через некоторое время повторить измерения для проверки того, что изменения есть. Это последнее значение реактивного сопротивления КЗ принимается в качестве окончательного при определении соответствия требованиям данного стандарта.

Для трансформаторов категории I, II и III предусмотрены различные процедуры и критерии оценки результатов. Данные процедуры и пределы изменений реактивного сопротивления КЗ приведены в пунктах а) и б).

а) Трансформаторы категории I и II

Если не согласовано иное, то активная часть трансформатора вынимается из бака для осмотра магнитопровода и обмоток, а также для сравнения с состоянием до испытаний в целях обнаружения возможных повреждений, таких, как изменения положения отводов, смещения, и т.п., которые, несмотря на успешные приемо-сдаточные испытания, могут повлиять на безопасную работу трансформатора.

Необходимо повторить все приемо-сдаточные испытания, включая испытания изоляции при 100 % предписанных испытательных напряжениях (см. *ГОСТ Р 55195*). Если предусмотрено проведение испытания грозовыми импульсами, то оно должно быть выполнено на данной стадии. Вместе с тем для трансформаторов категории I повторные приемо-сдаточные испытания, за исключением испытаний изоляции, можно не проводить.

Трансформатор считают выдержавшим испытание на стойкость при КЗ при выполнении следующих условий:

1) результаты испытаний на стойкость при КЗ, измерения и проверки, выполненные во время испытаний, не выявили признаков повреждений;

2) успешно проведены повторные испытания изоляции и другие приемо-сдаточные испытания, а также испытание грозовыми импульсами (если предусмотрено);

3) наружная проверка не выявила существенных повреждений, которые могли бы повлиять на безопасную работу трансформатора, таких, как смещения, сдвиг пластин магнитопровода, деформации обмоток, соединений или опорных конструкций;

4) не обнаружено следов внутреннего электрического разряда;

5) значения реактивного сопротивления КЗ, Ом, определенные для каждой фазы в конце испытаний, не отличаются от первоначальных значений более чем на:

- 2 % — для трансформаторов с круглыми концентрическими обмотками[2] и с чередующимися некруглыми обмотками. Однако для трансформаторов номинальной мощностью до 10000 кВ·А с сопротивлением КЗ 3 % и более, в которых в качестве проводника низковольтной обмотки применена металлическая фольга, допустимы более высокие значения, но не более 4 %. Если сопротивление КЗ трансформатора менее 3%, то указанный предел в 4 % должен быть согласован между изготовителем и заказчиком;

- 7,5 % — для трансформаторов с некруглыми концентрическими обмотками с сопротивлением КЗ 3% и более. Значение 7,5 % может быть уменьшено по соглашению между изготовителем и заказчиком, но не менее чем до 4 %;

Примечание 3 — Для трансформаторов с некруглыми концентрическими обмотками с сопротивлением КЗ менее 3 % максимальное изменение реактанса не может быть указано в общем виде. Практический опыт для определенных типов конструкции позволяет рекомендовать для таких трансформаторов допустимое изменение $(22{,}5 - 5{,}0 \cdot Z_t)$ %, где Z_t — сопротивление КЗ в %.

Примечание 4 — Трансформаторы предельных мощностей категории II с наибольшим рабочим напряжением $U_{н.р}$, не превышающим 52 кВ, требуют особого внимания, и для них может потребоваться уточнение указанных выше пределов изменения реактанса.

6) сила прессовки обмоток, измеренная при осмотре активной части после проведения испытаний, снизилась не более чем на 40 % по сравнению со значением до испытаний (либо установленным в НД значением).

Примечание — Данное положение направлено на учет Российской национальной стандартизации.

При невыполнении любого из вышеупомянутых условий трансформатор должен быть подвергнут разборке для установления причин отклонений.

б) Трансформаторы категории III

Должен быть обеспечен доступ к активной части для осмотра магнитопровода и обмоток и сравнения с состоянием до испытаний в целях обнаружения возможных повреждений, таких, как изменения положения отводов, смещения и т.п., что, несмотря на успешные приемо-сдаточные испытания, может повлиять на безопасную работу трансформатора.

Необходимо повторить все приемо-сдаточные испытания, включая испытания изоляции при 100 % испытательных напряжениях (см. *ГОСТ Р 55195*). Если предусмотрено испытание грозовыми импульсами, то оно должно быть проведено на данной стадии.

[2] Круглые обмотки включают все обмотки, намотанные на цилиндрическую форму, даже если, например, в обмотках из металлической фольги при наличии выводов имеют место локальные отклонения от цилиндрической формы.

Трансформатор считается выдержавшим испытание на стойкость при КЗ при выполнении следующих условий:

1) результаты испытаний на стойкость при КЗ, а также измерения и проверки, выполненные во время испытаний, не выявили признаков повреждений;

2) успешно проведены предусмотренные повторные испытания изоляции и др. приемо-сдаточные испытания, а также испытание грозовыми импульсами (если предусмотрено);

3) наружная проверка не выявила существенных повреждений, которые могли бы повлиять на безопасную работу трансформатора, таких, как смещения, сдвиг пластин магнитопровода, деформации обмоток, соединений или опорных конструкций;

4) не обнаружено следов внутреннего электрического разряда;

5) значения реактивного сопротивления КЗ, Ом, определенные для каждой фазы в конце испытаний, не отличаются от первоначальных значений более чем на 1%;

6) сила прессовки обмоток, измеренная при осмотре активной части после проведения испытаний, снизилась не более чем на 40 % по сравнению со значением до испытаний (либо установленным в НД значением).

Примечание — Данное положение направлено на учет Российской национальной стандартизации.

Если изменение реактанса находится в пределах от 1 до 2%, то приемка производится по соглашению между изготовителем и заказчиком. В этом случае может потребоваться более детальное рассмотрение, включая разборку трансформатора для установления причины отклонений. Однако до разборки рекомендуется применить дополнительные методы диагностики (см. 4.2.7.3, примечание 1).

Примечание 5 — Учитывая экономические факторы, такие как высокая стоимость трансформатора категории III и стоимость проведения визуального осмотра активной части, рекомендуется сделать серию фотографий положения отводов, регулировочных ответвлений, положения прокладок, состояния элементов концевой изоляции, и т.п. для точного сравнения этих частей до испытаний и после них. В этой связи может оказаться полезной проверка осевой прессовки обмоток. При необходимости стороны могут согласовать приемку при наличии небольших смещений и изменений при условии, что надежность работы трансформатора не была снижена.

Приложение А
(справочное)

Теоретическая оценка стойкости при коротких замыканиях

А.1 Область применения

В настоящем приложении приведена инструкция по теоретической оценке способности силового трансформатора выдерживать динамические воздействия при КЗ, основанной на расчете и рассмотрении конструкции и производственной практики.

Примечание — Дополнительная информация по техническим вопросам, относящимся к стойкости силовых трансформаторов при КЗ, приведена в [1].

А.2 Общие положения

Теоретическая оценка стойкости при КЗ силового трансформатора состоит в анализе конструкции, охватывающем основные аспекты механической прочности трансформатора. Требуемая для этого документация включает все необходимые технические данные, такие как листы электромагнитного расчета, расчеты токов КЗ, электромагнитных сил и механических напряжений, снабженные чертежами, спецификациями материалов, технологией изготовления и производственными инструкциями и пр., либо подготовленными для специальных целей в рамках электромагнитных и механических расчетов трансформатора, либо являющиеся частью технологической документации изготовителя.

При проведении анализа конструкции трансформатора необходимо проверять наиболее критичные значения механических сил и напряжений, возникающих в конструкции вследствие указанных режимов КЗ. Эти значения должны либо сравниваться с соответствующими значениями успешно испытанного трансформатора-прототипа[1] (см. А.3.3.2) при условии, что рассматриваемый трансформатор подобен ему, либо должны быть проверены в соответствии с нормами проектирования изготовителя в части стойкости при КЗ (см. А.3.3.3). Конструкция крепления и прессовки обмоток и др., а также производственная практика подлежат рассмотрению при данном анализе.

Расчеты механических сил и напряжений должны быть выполнены по методике и нормам проектирования, которые одобрены заказчиком.

Примечание — Данное положение направлено на учет принятой в Российской Федерации практики приемки силовых трансформаторов в части электродинамической стойкости.

Анализ конструкции, описанный в этом приложении, главным образом относится к трансформаторам категорий II и III.

Для трансформаторов категории I, которые обычно закупаются большими партиями, предпочтительной является процедура оценки путем испытаний на стойкость при КЗ одного или двух трансформаторов-представителей. Испытание на стойкость при КЗ одного или двух трансформаторов из большой партии заказа обычно рассматривается как наиболее быстрый и дешевый способ проверки соответствия. Тем не менее для этих трансформаторов также можно применять процедуру оценки, состоящую в анализе конструкции.

Для трансформаторов категорий II и III в некоторых случаях изготовителю сложно найти в своей номенклатуре трансформатор-прототип, подходящий для сравнения по условиям подобия. В этом случае в целях оценки трансформатор может одновременно сравниваться с несколькими прошедшими испытания трансформаторами при условии, что каждая из его характеристик, указанных в приложении Б, равна соответствующей характеристике как минимум одного из трансформаторов, выбранных для сравнения.

Например, оценка конструкции трехфазного автотрансформатора с третичной обмоткой уменьшенной мощности, соединенной в треугольник, может быть произведена в два этапа:

- в отношении последовательной и общей обмоток — сравнение с конструктивными параметрами трехфазного автотрансформатора без третичной обмотки;
- в отношении третичной обмотки — сравнение с трехфазным трансформатором с третичной обмоткой уменьшенной мощности, в котором третичная обмотка также была испытана.

А.3 Инструкции по проведению анализа конструкции

А.3.1 Общие требования

Анализ конструкции должен включать следующие этапы:

1) проверка трансформатора, основанная на соответствующей технической документации;
2) оценка трансформатора путем:
- либо сравнения с успешно испытанным трансформатором-прототипом (расчетное сравнение, А.3.3.2);
- либо проверки по нормам проектирования изготовителя в части стойкости при КЗ (расчетное обоснование, А.3.3.3);

[1] В отношении определения трансформатора-прототипа см. приложение Б.

3) оформление результатов анализа конструкции и подтверждение в установленной форме стойкости при КЗ (см. А.3.4).

А.3.2 Информация о трансформаторе, подлежащая анализу

Для анализа конструкции трансформатора изготовитель представляет следующие документы:

1) электромагнитный расчет;

2) чертежи или эскизы обмотки и изоляции в окне магнитопровода с указанием типа материалов;

3) расчет значений токов КЗ (ударные и установившиеся действующие значения) для каждой обмотки с учетом требований эксплуатации и рассматриваемых типов КЗ, а также положений переключателя в случае наличия обмоток с ответвлениями;

4) расчет основных сил КЗ (максимальные значения при соответствующем ударном токе) для рассматриваемых типов КЗ, положений переключателя, геометрического и относительного положения обмоток, рассматриваемых в целях проектирования. Информация должна быть представлена в полном объеме в случае, если для обмоток, магнитопровода и бака в целях расчета магнитного поля рассеяния и электромагнитных сил приняты упрощенные геометрические конфигурации.

Осевые силы КЗ в стержневых трансформаторах и радиальные силы КЗ в случае броневых трансформаторов очень чувствительны к относительному положению обмоток, имеющих противоположные по знаку магнитодвижущие силы. Изготовитель должен указать, какой допуск на относительное смещение обмоток в производстве он учитывает, какая расчетная модель (плоскости симметрии и граничные условия) принята для расчета сил КЗ.

Необходимо рассматривать следующие электромагнитные силы:

а) для стержневых трансформаторов:

- радиальная сила сжатия или растяжения в каждой физической обмотке;
- максимальная осевая сила сжатия в каждой физической обмотке (F'_c)[4];
- максимальная осевая торцевая сила (вверх/вниз) в каждой физической обмотке;
- максимальная осевая сила (на стержень), действующая на общее прессующее кольцо (или плиту), если оно используется, и на крепления магнитопровода;
- торцевая сила, действующая на отвод каждой основной низковольтной обмотки (F'_t)[5];

б) для броневых трансформаторов:

- осевые силы, действующие на каждую обмотку и на группы обмоток в окне и вне окна магнитопровода;
- радиальные силы, действующие на дисковые катушки;
- суммарная сила, действующая на межфазные распорные клинья и прессующие блоки между магнитопроводом и элементами жесткости бака;
- суммарная сила, действующая на пластины магнитопровода;
- суммарная сила, действующая на элементы жесткости бака.

Для каждой физической обмотки должны быть определены режимы с наибольшими силами, обусловленные видом КЗ и положением переключателя. В отношении всей конструкции силы КЗ должны быть рассмотрены для максимальной реактивной мощности, подводимой от сети (сетей).

5) расчет основных механических напряжений в проводниках обмотки и прилегающих элементах конструкции, вызванных силами КЗ. Должны быть рассмотрены следующие механические напряжения:

а) для стержневых трансформаторов:

- среднее напряжение растяжения в наружных обмотках (σ'_t)[6];
- среднее напряжение радиального сжатия катушечных, винтовых, слоевых (однослойных) внутренних обмоток (σ^*_c)[7];
- эквивалентное среднее напряжение сжатия многослойной внутренней обмотки ($\sigma'_{c\ eq}$)[8];
- напряжение радиального изгиба проводников в пролете между прошивными рейками и прокладками, образующими осевые охлаждающие каналы в пределах радиального размера обмотки (σ^*_{br});
- напряжение осевого изгиба проводников в пролете между прокладками катушечных и винтовых обмоток (σ^*_{ba});
- напряжение сжатия в радиальных прокладках катушечных и винтовых обмоток (σ^*_{sp})[9];
- напряжение сжатия в бумажной изоляции проводника в слоевых обмотках (σ^*_{pi});

---

[4] См. примечание 1 в конце данного приложения.

[5] Для определения и расчета силы, действующей на выводы низковольтных обмоток, см. А.3.3.2.2.

[6] При расчете среднего напряжения растяжения катушечные и винтовые обмотки, имеющие один или более охлаждающих каналов в пределах радиального размера, можно рассматривать как жесткие кольца без каналов.

[7] При расчете среднего радиального напряжения сжатия, катушечные и винтовые обмотки с одним или более охлаждающими каналами в пределах радиального размера следует рассматривать как несколько отдельных жестких колец с каналами между ними (см. ДА.7).

[8] В случае двух одинаковых слоев эквивалентное среднее напряжение сжатия равно среднему арифметическому соответствующих напряжений слоев. В случае трех и более слоев напряжение принимается равным 1,1 среднеарифметического напряжений сжатия, рассчитанных в разных слоях.

[9] Напряжение сжатия в радиальных прокладках рассчитывается с учетом площади опоры неизолированных проводников и без учета влияния радиуса скругления.

- напряжение сжатия в элементах концевой изоляции (σ^*_{ea}) и концевых изоляционных кольцах (σ^*_{ec});
- напряжение сжатия в общих прессующих кольцах (плитах), если они применяются (σ^*_{gr});
- напряжение растяжения в стяжных шпильках (прессующих пластинах) прессующей системы (σ^*_{rod});

б) для броневых трансформаторов:

- напряжение осевого изгиба проводников в промежутке между прокладками катушки (σ^*_{ba});
- напряжение сжатия в бумажной изоляции проводника (σ^*_{pi}) и в прокладках (σ^*_{sp}) в дисковых катушках;
- напряжение сжатия в межфазных распорных клиньях (σ^*_{ve}) и в прессующих блоках между магнитопроводом и элементами жесткости бака (σ^*_{pa});
- напряжения растяжения и изгиба в пластинах магнитопровода (σ^*_{ci});
- напряжения растяжения и изгиба в элементах жесткости бака (σ^*_{ta}).

Для каждой физической обмотки и каждого элемента конструкции должны быть рассмотрены условия наибольших напряжений, возникающих в результате действия сил КЗ;

6) чертежи, эскизы или компьютерные распечатки конструкции опор обмоток и систем прессовки обмоток относительно магнитопровода, в частности:

а) для стержневых трансформаторов:

- конструкция радиальных опор на стержень, конфигурация концевой изоляции, прессующих колец (или пластин), если применяются, схема прессовки обмоток и магнитопровода и пр.;

б) для броневых трансформаторов:

- устройство осевой прессовки, прессующие прокладки, каналы, клинья для катушек и между фазами, изоляционные барьеры между обмотками и магнитопроводом и пр.;
- опоры магнитопровода на бак, конструкция пружин для удержания магнитопровода, элементы жесткости бака, др. устройства крепления и пр.;

В общем случае:

- устройства надежного крепления выводов обмоток и отводов или шин низковольтных обмоток к вводам, отводов к контактам переключателей и пр.;
- средства осевой предварительной прессовки;

7) инструкции по обеспечению и контролю качества материалов и технологии изготовления с обязательным описанием следующих технологических процессов:

- намотка проводов на оправку и контроль усилия натяжения, обеспечение и стабилизация размеров обмоток и катушек, сборка с заданными допусками, сушка и пропитка маслом, предварительная нагрузка (сила прессовки), крепление/фиксация опор обмотки, выводов и устройств прессовки и пр.;
- только для броневых трансформаторов: крепление и прессовка катушек внутри и вне окна магнитопровода с помощью межфазных распорных клиньев, прессующих блоков для раскрепления магнитопровода и элементов жесткости бака и пр.;

8) проверки основных внешних составных частей трансформатора, в частности высоковольтных вводов, особенно в случае, когда они установлены на баке под углом, и пр.

А.3.3 Оценка трансформатора

А.3.3.1 Общие положения

При оценке трансформатора могут быть применены два альтернативных метода — сравнение с трансформатором-прототипом, успешно прошедшим испытания на стойкость при КЗ (см. А.3.3.2), или проверка конструкции по документированным нормам проектирования в части стойкости при КЗ, принятым изготовителем в своем производстве (см. А.3.3.3).

Данные альтернативные методы описаны ниже.

А.3.3.2 Оценка путем сравнения с трансформатором-прототипом

А.3.3.2.1 Признание трансформатора прототипом

Трансформатор считается прототипом для сравнения при условии, если он удовлетворяет следующим требованиям (см. также приложение Б):

- по своим характеристикам он может быть принят подобным рассматриваемому трансформатору;
- для его разработки использованы в основном те же методы расчета и критерии механической стойкости при КЗ, что и для рассматриваемого трансформатора;
- он изготовлен в основном по тем же технологиям и в соответствии с такими же инструкциями обеспечения и контроля качества, что и рассматриваемый трансформатор;
- область распространения норм проектирования в части стойкости при КЗ охватывает характеристики обоих трансформаторов;
- трансформатор должен успешно пройти испытание на стойкость при КЗ.

Признание трансформатора прототипом включает следующие шаги:

- проверка его пригодности для сравнения, как описано выше;
- проверка протокола(ов) испытаний на стойкость при КЗ;

- признание основных электромагнитных данных конструкции, произведенных расчетов, а также критериев механической стойкости, принятых для разработки;

- признание методов, принятых для изготовления и проверки качества, и инструкций контроля качества.

А.3.3.2.2 Сравнительная оценка

Сравнительная оценка должна начинаться с изучения и сравнения конструкции обмоток, основных элементов изоляции и прессовки двух трансформаторов, особенно в отношении их характеристик механической прочности. В результате этой сравнительной оценки должен стать возможным вывод о том, что рассматриваемый трансформатор, в основном, является таким же стойким в отношении его основной механической конструкции, как и трансформатор-прототип.

Далее должны быть сравнены соответствующие значения сил и напряжений (см. А.3.2), рассчитанные для двух трансформаторов. Для этого рекомендуется использовать таблицу А.1 или А.2. Любые сила или напряжение, относящиеся к рассматриваемому трансформатору или к трансформатору- прототипу, должны быть введены в соответствующую ячейку в колонках с пометкой «рассм.» (рассматриваемый) и «прот.» (прототип) соответственно. Для каждой обмотки и ее составных частей, так же как и для механической конструкции трансформатора в целом должны быть использованы наибольшие значения сил и напряжений КЗ.

В результате сравнения рассматриваемый трансформатор будет считаться способным выдерживать воздействие динамических сил КЗ при условии, что ни одна из сил или ни одно из напряжений в таблице А. 1 или А. 2 не превышает соответствующего значения, рассчитанного для трансформатора-прототипа, а соответствующие расчетные коэффициенты запаса в трансформаторе больше, чем 1,0 и выше, чем в прототипе.

Примечание — См. ДА.8 (приложение ДА)

А.3.3.3 Оценка путем проверки по нормам проектирования изготовителя в части стойкости при КЗ

А.3.3.3.1 Признание конструкторской информации изготовителя по стойкости при КЗ

Правила оценки стойкости при КЗ конструкции трансформатора, используемые изготовителем, должны иметь основательную экспериментальную базу. Это означает, что эти правила должны являться результатом анализа либо испытаний на стойкость при КЗ ряда трансформаторов, либо испытаний соответствующих моделей трансформатора в совокупности с любыми косвенными свидетельствами длительной бесперебойной эксплуатации ряда трансформаторов в части стойкости при КЗ, либо обоих результатов. Изготовитель обязан представить следующую информацию:

1) список трансформаторов, выпущенных изготовителем, которые были испытаны на стойкость при КЗ, с указанием основных данных трансформатора, таких, как номинальная мощность, напряжение, диапазон регулирования и сопротивление КЗ;

2) результаты испытаний моделей в случае, если они проводились, и их влияние на нормы проектирования;

3) содержание технических стандартов, касающихся стойкости при КЗ силовых трансформаторов и используемых изготовителем при обычном проектировании и производстве;

4) данные эксплуатации и частота отказов в отношении КЗ;

5) количество выпущенных трансформаторов и число лет их успешной эксплуатации.

На основании этой информации должно быть подтверждено, что изготовитель использует правила проектирования в части стойкости при КЗ надлежащего уровня.

А.3.3.3.2 Процедура проверки

Процедура проверки должна начинаться с предварительного изучения конструкций обмоток и главной изоляции, а также устройства прессовки трансформатора. В результате этого изучения должен быть сделан вывод о том, что конструкции обмоток, изоляции и прессовки совпадают с соответствующими конструкциями, принятыми изготовителем при изготовлении надежных трансформаторов.

Следующий шаг состоит в сравнении расчетных значений сил и напряжений трансформатора (см. А.3.2) с соответствующими допустимыми или критическими значениями, которые применяет изготовитель в своей практике[10]. Эти значения могут быть разными у различных изготовителей.

Для этого рекомендуется использовать таблицу А.1 или А.2. Любые сила или напряжение, относящиеся к рассматриваемому трансформатору, должны быть введены в соответствующую ячейку в колонку «рассм.» (рассматриваемый). Соответствующие допустимые или критические значения сил или напряжений, принятые изготовителем в нормах проектирования, вводятся в соответствующую ячейку в колонку «доп.» (допустимые) или «крит.» (критическое) соответственно. Для каждой обмотки и ее составных частей и трансформатора в целом должны быть использованы наибольшие значения сил и напряжений КЗ в рассматриваемых режимах.

Примечание — Для стержневых трансформаторов особое внимание необходимо уделить радиальному напряжению сжатия в обмотках. Обмотки, в которых возникают такие напряжения, могут повредиться или из-за изгиба проводников «внутрь» в пролете между двумя опорами (вынужденная форма потери устойчивости), или из-за потери стабильности формы кольца, приводящей к сильным радиальным деформациям проводников в одном или нескольких местах по окружности обмотки (свободная форма потери устойчивости).

[10] Под допустимыми значениями понимают такие значения силы или напряжения, которые конструкция может выдержать без потери прочности и функций; под критическими значениями понимают такие значения силы или напряжения, которые вызывают остаточные деформации, потерю устойчивости или повреждение конструкции.

Вынужденная форма потери устойчивости обычно возникает в обмотках с относительно жесткими опорами по внутренней поверхности.

Свободная форма потери устойчивости является наиболее частой формой деформации, которая происходит внезапно, как только достигнуто критическое для данной конструкции значение напряжения радиального сжатия.

Установление критических значений напряжений свободной формы потери устойчивости является очень сложной задачей, что обусловлено как неоднородным характером обмоток, так и влиянием производственных процессов. По этим причинам специальные формулы для определения критических значений напряжения сжатия не приведены.

Дополнительная информация о потере устойчивости и по другим техническим вопросам по динамической стойкости приведена в [1].

В результате проверки трансформатор считается способным выдерживать динамические воздействия КЗ при условии, что ни одно из значений, внесенных в таблицу А.1 или А.2, не превышает соответствующего максимально допустимого значения, принятого изготовителем для проектирования, и не превышает 80 % от соответствующего критического значения, определенного изготовителем.

Допустимые значения сил и напряжений, приведенные ниже в целях руководства, основаны на имеющемся опыте с учетом таких граничных условий, как свойства материалов, допуски, механические особенности конструкции и производственные процессы. Тем не менее они не должны рассматриваться как стандартные допустимые значения и могут быть увеличены при условии, что изготовитель сможет представить убедительные и документально подтвержденные опытным путем результаты с более высокими значениями.

а) Для стержневых трансформаторов:

- среднее радиальное напряжение растяжения в катушечных и винтовых обмотках и в каждом отдельном слое многослойных обмоток[11]

$$\sigma^{*}_{t\ расч} \le 0{,}9\ R_{p0,2};$$

- среднее радиальное напряжение сжатия в катушечных, винтовых и однослойных обмотках:
- из обычных проводников и несклеенных транспонированных проводов (СТС[12])

$$\sigma^{*}_{c\ расч} \le 0{,}35\ R_{p0,2};$$

- из проводников и транспонированных проводов (СТС) с клеящим слоем

$$\sigma^{*}_{c\ расч} \le 0{,}6\ R_{p0,2};$$

- эквивалентное среднее напряжения сжатия в многослойных обмотках:
- из обычных проводников и несклеенного транспонированного провода

$$\sigma^{*}_{c\ экв\ расч} \le 0{,}35\ R_{p0,2};$$

- со склеенными проводниками и транспонированными проводами

$$\sigma^{*}_{c\ экв\ расч} \le 0{,}6\ R_{p0,2};$$

- напряжение радиального изгиба в проводниках в пролете между осевыми рейками или прокладками

$$\sigma^{*}_{br\ расч} \le 0{,}9\ R_{p0,2};$$

- напряжение осевого изгиба в проводниках в пролете между прокладками

$$\sigma^{*}_{ba\ расч} \le 0{,}9\ R_{p0,2};$$

- максимальное осевое усилие сжатия в каждой обмотке на полегание проводников[13]

$$F^{*}_{c\ расч} \le 0{,}8\ F^{*}_{полег};$$

- напряжение сжатия в прокладках[14]:
- при наличии бумажной изоляции на проводниках

$$\sigma^{*}_{kp\ расч} \le 80\ МПа;$$

---

[11] Условный предел текучести $R_{p0,2}$ – напряжение растяжения, при котором непропорциональное удлинение составляет 0,2 % от длины испытываемого на растяжение образца.

[12] CTC (continuously transposed conductors) – непрерывно транспонированные провода.

[13] Для $F^{*}_{полег}$ см. примечание 2 в конце данного приложения.

[14] Действительно для прокладок, сделанных из прессованного электрокартона.

- при наличии только эмалевого покрытия на проводниках

$$\sigma^*_{кр\ рассм} \le 120\ МПа;$$

- напряжение сжатия в бумажной изоляции слоевых обмоток

$$\sigma^*_{рь\ рассм} \le 35\ МПа;$$

- напряжение сжатия в концевых картонных намотанных кольцах (вертикально расположенные слои)

$$\sigma^*_{кг\ рассм} \le 40\ МПа;$$

- напряжение сжатия в концевых картонных слоистых кольцах (горизонтально расположенные слои)

$$\sigma^*_{кг\ рассм} \le 80\ МПа;$$

- напряжение сжатия в картонных общих прессующих кольцах или плитах (если используется)

$$\sigma^*_{рг\ рассм} \le 80\ МПа;$$

- напряжение растяжения в стяжных шпильках (пластинах) прессующей системы[15]

$$\sigma^*_{гоd} \le R_{eL}.$$

б) Для броневых трансформаторов:

- напряжение осевого изгиба проводов в промежутке между прокладками катушек

$$\sigma^*_{бо\ рассм} \le 0{,}9\ R_{p0.2}.$$

- напряжение сжатия в бумажной изоляции проводов и прокладках

$$\sigma^*_{рь\ рассм}, \sigma^*_{пр\ рассм} \le 35\ МПа;$$

- напряжение сжатия в межфазных распорных клиньях и в прессующих блоках, выполненных из электрокартона

$$\sigma^*_{кв\ рассм}, \sigma^*_{рb\ рассм} \le 80\ МПа;$$

- напряжение сжатия в межфазных распорных клиньях и в прессующих блоках, выполненных из прочного стеклопластика или клееной древесины

$$\sigma^*_{кв\ рассм}, \sigma^*_{рb\ рассм} \le 120\ МПа;$$

- напряжение растяжения и изгиба в шихтованном магнитопроводе

$$\sigma^*_{с\ рассм} \le R_{eL}$$

- напряжение растяжения и изгиба в элементах жесткости бака

$$\sigma^*_{tr\ рассм} \le R_{eL}$$

- давление на участках перекрытия шихтованных пластин[16]

$$P_{рассм} \le P.$$

А.3.4 Результаты анализа конструкции трансформатора и заключение по рассматриваемому трансформатору

Результаты анализа конструкции трансформатора считаются положительными в случаях, если:

- требования спецификации проверены на должное соответствие фактическим условиям работы сети;
- конструкция трансформатора полностью соответствует спецификации;
- проверка конструкции выполнена в соответствии с А.3.1 и А.3.2 для определения всех результирующих усилий и напряжений;
- анализ конструкции трансформатора проведен в соответствии с А.3.3.2 или А.3.3.3 и из таблицы А.1 или А.2 следует соответствие усилий и напряжений КЗ критериям, указанным в данном приложении;
- конструкция трансформатора и процессы его производства/изготовления признаны достаточными для обеспечения необходимой стойкости трансформатора при КЗ.

---

[15] R_{eL} – нижнее значение предела текучести материала, практически равное $R_{p0.2}$.

[16] Для давления P см. примечание 3 в конце данного приложения.

От заказчика требуется в установленной форме подтвердить, что анализ конструкции трансформатора проведен с положительным результатом при соблюдении инструкций, описанных в данном приложении. При этом изготовителем и заказчиком должен быть подписан соответствующий документ.

Подпись заказчика не освобождает изготовителя от любого из его обязательств в отношении отсутствия несоответствий и обеспечения динамической стойкости трансформатора при КЗ в соответствии с заданными требованиями эксплуатации.

Информация, передаваемая покупателю для анализа конструкции трансформатора, остается интеллектуальной собственностью изготовителя. При этом должна соблюдаться ее конфиденциальность.

Таблица А.1 — Сравнение сил и напряжений в стержневых трансформаторах

Тип силы напряжения	Обмотка НН				Обмотка СН				Обмотка ВН				Регулировочная обмотка			
	рассм	прот.	доп	крит	рассм.	прот	доп	крит	рассм	прот	доп	крит	рассм	прот	доп	крит.
Среднее напряжение растяжения от радиальных усилий в катушечных, винтовых и многослойных обмотках (МПа)																
Среднее напряжение сжатия от радиальных усилий в катушечных, винтовых, однослойных обмотках (МПа)																
Эквивалентное среднее напряжение сжатия от радиальных усилий в многослойных обмотках (МПа)																
Напряжение радиального изгиба проводников в пролете между осевыми рейками и прокладками (МПа)																
Напряжение осевого изгиба проводников между радиальными прокладками (МПа)																
Сила, действующая на выводы низковольтных обмоток (кН)																
Максимальная осевая сила сжатия в каждой обмотке (кН)																
Максимальная осевая сила сжатия в обмотке в сравнении с критическим усилием полегания (кН)																
Максимальные осевые силы, действующие на опоры каждой обмотки: - верх (кН); - низ (кН)																
Напряжение сжатия в бумажной изоляции проводов и прокладках (МПа)																
Напряжение сжатия в ярмовой изоляции и концевом кольце (МПа)																
Напряжение сжатия в общем прессующем кольце (или плите) (МПа)	рассм.				прот.				доп.				крит.			
Напряжение растяжения в стяжных шпильках (прессующих пластинах) (МПа)	рассм.				прот.				доп.				крит.			
Сила прессовки на один стержень (кН)	рассм.				прот.				доп.							

рассм. — расчетное значение, относящееся к рассматриваемому трансформатору.
прот. — расчетное значение, относящееся к трансформатору-прототипу.
доп. — допустимое значение, основанное на нормах проектирования изготовителя.
крит. — критическое значение, основанное на нормах проектирования изготовителя.

Таблица А.2 — Сравнение сил и напряжений в броневых трансформаторах

Тип силы напряжения	Обмотка НН				Обмотка СН				Обмотка ВН				Регулировочная обмотка			
	рассм.	прот	доп.	крит	рассм.	прот	доп	крит	рассм.	прот	доп.	крит	рассм.	прот	доп	крит
Напряжение осевого изгиба проводов в промежутке между прокладками катушек (МПа)																
Напряжение сжатия в бумажной изоляции и прокладках (МПа)																
Общее усилие на межфазные распорные клинья и прессующие блоки (кН)	рассм.				прот.				доп.				крит.			
Полная сила на пластины магнитопровода (кН)	рассм.				прот.				доп.				крит.			
Полная сила на элементы жесткости бака (кН)	рассм.				прот.				доп.				крит.			
Напряжение сжатия в межфазных распорных клиньях и прессующих блоках (МПа)	рассм.				прот.				доп.				крит.			
Напряжение растяжения/ изгиба на пластинах магнитопровода вследствие радиальных сил (МПа)	рассм.				прот.				доп.				крит.			
Напряжение растяжения/ изгиба на элементах жесткости бака вследствие осевых сил (МПа)	рассм.				прот.				доп.				крит.			
Давление на зоны перекрытия листов магнитопровода (МПа)	рассм.				прот.				доп.				крит.			
рассм. — расчетное значение, относящееся к рассматриваемому трансформатору. прот. — расчетное значение, относящееся к трансформатору-прототипу. доп. — допустимое значение, основанное на нормах проектирования изготовителя. крит. — критическое значение, основанное на нормах проектирования изготовителя.																

Примечания

1 Символ * «звездочка» использован в данном приложении для определения значения усилия или напряжения, которое соответствует максимальному значению ожидаемого ударного тока КЗ.

2 В стержневых трансформаторах обмотки могут потерять осевую устойчивость при возникновении больших осевых сил сжатия. В этом случае проводники обмотки «полегают»: целый ряд смежных проводов в пределах радиального размера обмотки поворачивается в одном направлении. При этом следующий в осевом направлении ряд проводов поворачивается в противоположном направлении. Следствием этого является зигзагообразная форма деформации, принимаемая обмоточными проводами.

Поэтому необходимо, чтобы максимальная осевая сжимающая сила F^*_c, действующая на обмотку, была меньше, чем критическая сила $F^*_{полег}$, которая вызывает полегание проводов. При этом необходим определенный запас.

Необходимо различать два случая:

а) катушечные, винтовые и многослойные обмотки из склеенного транспонированного провода — для них конструктивные ограничения по максимальному осевому усилию сжатия на полегание достаточно высоки. Фактически такие проводники очень устойчивы к полеганию независимо от степени прочности меди. В этом случае проверка на полегание должна быть выполнена по методике, одобренной заказчиком;

б) катушечные, винтовые и многослойные обмотки из проводов, состоящих из элементарных проводников, или несклеенного транспонированного провода — для них может быть рассчитано соответствующее критическое усилие полегания $F^*_{полег}$, кН, по следующей формуле

$$F^*_{полег} = \left[K_1 E_0 \frac{n b_{экв} h^2}{D_{ср}} + K_2 \frac{n X b^3_{экв} \pi D_{ср} \gamma}{h} \right] K_3 / K_4 \cdot 10^{-3},$$

где E_0 — модуль упругости меди, $E_0 = 1{,}1 \cdot 10^5$ МПа;

n — количество проводников или сдвоенных подразделенных проводов в радиальном направлении обмотки в случае плоских проводов, а в случае транспонированного провода $n = g(f - 1)/2$, где g — количество транспонированных проводов в радиальном размере обмотки;

f — количество элементарных проводников в одиночном транспонированном проводе;

$b_{экв}$ — эквивалентная ширина проводника, мм, принимаемая равной:

- радиальному размеру элементарного проводника — в случае плоского провода;
- удвоенному радиальному размеру элементарного проводника — в случае склеенного сдвоенного подразделенного провода;
- радиальному размеру элементарного проводника — в случае несклеенного транспонированного провода (мм);

$D_{ср}$ — средний диаметр обмотки, мм;

$X = \frac{cz}{\pi D_{ср}}$ — коэффициент закрытия прокладками для катушечных и винтовых обмоток, где

c — ширина радиальной прокладки (в направлении по окружности), мм;

z — количество прокладок по окружности;

$X = 1,0$ — для слоевых обмоток;

h — высота элементарного проводника в случае плоского провода, мм, принимаемая равной:

- удвоенной высоте одного элементарного проводника — в случае, если два параллельных элементарных проводника в осевом направлении покрыты общей бумажной изоляцией;
- высоте одного элементарного проводника — в случае транспонированного провода;

γ — константа формы проводника, принимаемая равной:

- 1,0 — для стандартного радиуса скругления проводника;
- 0,85 — для полностью скругленных элементарных проводников или проводов;

K_1 — коэффициент скручивания, $K_1 = 0,5$;

K_2 — коэффициент вдавливания, Н/мм^3, принимаемый равным:

- 45 — для одиночного и сдвоенного подразделенного провода;
- 22 — для несклеенного транспонированного провода;

K_3 — коэффициент, учитывающий степень жесткости меди (см. таблицу А.3);

K_4 — коэффициент, учитывающий динамическое полегание (см. таблицу А.4).

Таблица А.3 — Значения коэффициента K_3

$R_{p0,2}$, МПа	K_3
Отожженная медь	1,0
150	1,1
180	1,2
230	1,3
> 230	1,4

Таблица А.4 — Значения коэффициента K_4

Тип провода	Тип обмотки	
	катушечная или винтовая	слоевая
Обычный или сдвоенный подразделенный	1,2	1,1
Несклеенный транспонированный провод	1,7	1,3

Необходимо отметить, что данная формула для расчета $F^*_{полн}$ относится к динамическому полеганию и основана на эмпирическом подходе. Фактическое критическое значение силы будет зависеть от конструкции обмотки, типа и толщины изоляции провода.

3 Давление P,МПа, приложить которое необходимо к зонам перекрытия листов магнитопровода для того, чтобы обеспечить сохранение магнитной цепи, должно быть не менее

$$P = \frac{F^* 10^3}{2Sath},$$

где F^* — сила K_3 (ударное значение), воздействующая на торцевое ярмо, кН;

S — площадь углового участка перекрытия слоев магнитопровода, мм^2;

a — коэффициент прилегания;

t — количество листов в пакетах магнитопровода на единицу высоты, мм$^{-1}$;

h — высота магнитной цепи, мм.

Приложение Б
(справочное)

Определение трансформатора-прототипа

Трансформатор считается подобным другому трансформатору, взятому для сравнения (прототипу), если с момента испытания прототипа прошло не более 10 лет и он имеет следующие общие с ним характеристики:

- один и тот же режим работы, например генераторный, распределительный или трансформатор межсистемной связи;
- одна и та же принципиальная конструкция, например трансформатор сухой, масляный, стержневой с концентрическими обмотками, чередующимися обмотками, бронестержневой с круглыми обмотками, некруглыми обмотками;
- одни и те же расположение и последовательность основных обмоток;
- один и тот же тип обмоточных проводов, например алюминиевые, из сплава алюминия, отожженной или упрочненной меди, металлической фольги; круглый, прямоугольный провод, непрерывно транспонированный провод с эпоксидным покрытием, если используется;
- один и тот же тип основных обмоток, например винтовые, катушечные, слоевые, чередующиеся, с осевыми каналами;
- выдерживаемую при КЗ мощность (номинальная мощность, отнесенная к сопротивлению КЗ в относительных единицах) в диапазоне от 30 % до 130 % от мощности трансформатора-прототипа;
- по результатам сопоставительного расчета изготовителя трансформатор-прототип должен иметь более высокие механические усилия и нагрузки (напряжения, деформации, осевые силы на опоры), меньшие запасы прочности и устойчивости;
- одно и то же предприятие-изготовитель и один и тот же технологический процесс;
- одни и те же системы прессовки и крепления обмоток.

Примечание — См. ДА.9 (приложение ДА).

Приложение ДА
(справочное)

Оригинальный текст положений МЭК 60076-5:2006, которые применены в настоящем стандарте, с изменением их содержания для учета технических особенностей объекта стандартизации, принятых в Российской Федерации

ДА.1 Мощности короткого замыкания сети

Таблица ДА.1 — Мощность короткого замыкания сети

Наибольшее рабочее напряжение оборудования, U_m, кВ	Мощность КЗ сети, МВ·А	
	Принятая европейская практика	Принятая североамериканская практика
7,2; 12; 17,5 и 24	500	500
36	1000	1500
52 и 72,5	3000	5000
100 и 123	6000	15000
145 и 170	10000	15000
245	20000	25000
300	30000	30000
362	35000	35000
420	40000	40000
525	60000	60000
765	83500	83500
Примечание — Если не указано иное, то значение соотношения между сопротивлениями нулевой и прямой последовательностей должно быть принято в диапазоне от 1 до 3.		

ДА.2 Значение симметричного тока короткого замыкания

Для трехфазных двухобмоточных трансформаторов действующее значение симметричного тока КЗ в килоамперах следует рассчитывать по формуле

$$I = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_t + Z_s)}, \quad (1)$$

где Z_s — сопротивление КЗ сети, Ом;

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S} \quad (2)$$

на одну фазу (эквивалентное соединение в звезду).

где U_s — номинальное напряжение сети, кВ;

S — мощность КЗ системы, МВ·А.

U и Z_t определяются следующим образом:

a) для основного ответвления:

U — номинальное напряжение U_r рассматриваемой обмотки, кВ;

Z_t — сопротивление КЗ трансформатора, приведенное к рассматриваемой обмотке, в омах следует рассчитывать по формуле

$$Z_t = \frac{z_t \cdot U_r^2}{100 \cdot S_r}, \quad (3)$$

в омах (Ом), на одну фазу (эквивалентное соединение в звезду)[17],

где z_t — измеренное сопротивление КЗ при номинальном токе и частоте на основном ответвлении и расчетной температуре, в процентах;

S_r — номинальная мощность трансформатора, в МВ·А;

b) для других ответвлений, кроме основного:

U — если не установлено иное, то напряжение ответвления[18] обмотки, кВ;

Z_t — сопротивление КЗ трансформатора, приведенное к рассматриваемой обмотке и ответвлению, на фазу, Ом.

[17] Символы Z_t и z_t использованы здесь вместо Z и z соответственно и приняты для тех же значений МЭК 60076-1 для большей ясности в связи с содержанием 4.2.3.

[18] Определение напряжения ответвления см. 5.2 МЭК 60076-1.

Для трансформаторов с более чем двумя обмотками, автотрансформаторов, вольтодобавочных трансформаторов и трансформаторов, непосредственно соединенных с другим оборудованием, сверхтоки рассчитываются в соответствии с 3.2.3, 3.2.4 или 3.2.5 в зависимости от конкретного случая.

Для всех трансформаторов, за исключением случая, описанного в 3.2.2.2, должно учитываться влияние сопротивления КЗ сети.

Примечание — При соединении обмоток в зигзаг ток междуфазного КЗ может достигать более высоких значений, чем при трехфазном КЗ. Это увеличение тока следует принимать во внимание при расчете превышения температуры обмотки, соединенной в зигзаг.

ДА.3 Продолжительность симметричного тока короткого замыкания

Если не установлено иное, то продолжительность тока *I* для расчета термической стойкости КЗ должна быть 2 с.

Примечание — Для автотрансформаторов и трансформаторов с током КЗ, превышающим более чем в 25 раз номинальный ток, продолжительность тока КЗ менее 2 с может быть принята по соглашению между изготовителем и покупателем.

ДА.4 Динамическая стойкость при коротких замыканиях

По требованию потребителя динамическая стойкость при КЗ демонстрируется либо испытаниями, либо расчетом и экспертизой конструкции и производства.

Выбор метода демонстрации должен быть согласован между покупателем и изготовителем до размещения заказа.

Если выбрано испытание на КЗ, то оно должно рассматриваться как специальное испытание (см. 3.11.3 МЭК 60076-1) и должно быть указано до размещения заказа. Испытания проводятся в соответствии с требованиями 4.2.2 — 4.2.7.

Иногда мощные силовые трансформаторы невозможно испытать в соответствии с данным стандартом, например, из-за технических ограничений. В этом случае условия испытаний должны быть согласованы между покупателем и заказчиком.

Если выбрана демонстрация на основе расчета и экспертизы конструкции и производства, то следует руководствоваться инструкциями приложения А.

ДА.5 Если не указано иное, то в случае X/R >14 коэффициент $k\sqrt{2}$ принимается равным:

- $1{,}8\sqrt{2} = 2{,}55$ — для трансформаторов категории II;
- $1{,}9\sqrt{2} = 2{,}69$ — для трансформаторов категории III.

ДА.6 Для однофазных трансформаторов категорий I и II количество опытов составляет три. Если не установлено иное, то на однофазном трансформаторе с ответвлениями выполняются три опыта на разных положениях переключателя, т.е. один опыт — в положении, соответствующем наибольшему коэффициенту трансформации, один опыт — на основном ответвлении и один опыт — в положении, соответствующем минимальному коэффициенту трансформации.

Для трехфазных трансформаторов категорий I и II количество опытов должно быть равно девяти, т.е. по три опыта на каждой фазе. Если не указано иное, то на трехфазном трансформаторе с ответвлениями выполняются девять опытов на разных положениях переключателя, т.е. три опыта — в положении, соответствующем наибольшему коэффициенту трансформации на одной из внешних фаз, три опыта — на основном ответвлении на средней фазе и три опыта — в положении, соответствующем наименьшему коэффициенту трансформации на другой внешней фазе.

ДА.7 При расчете среднего радиального напряжения сжатия катушечные и винтовые обмотки с одним или более охлаждающими каналами в пределах радиального размера можно рассматривать как жесткие кольца без каналов.

ДА.8 Сравнительная оценка

В результате сравнения рассматриваемый трансформатор будет считаться способным выдерживать воздействие динамических сил КЗ при условии, что ни одна из сил или ни одно из напряжений в таблице А.1 или А.2 не превышает более чем в 1,2 раза соответствующее значение, рассчитанное для трансформатора-прототипа, за исключением следующих сил и напряжений стержневых трансформаторов, для которых рекомендованы более строгие требования:

- среднее радиальное напряжение сжатия в катушечных, винтовых и однослойных обмотках:

$$\sigma'_{c\ расч} \le 1{,}1\ \sigma'_{c\ прот};$$

- эквивалентное радиальное напряжение сжатия для многослойных обмоток:

$$\sigma'_{c\ экв\ расч} \le 1{,}1\ \sigma'_{c\ экв\ прот};$$

- сила, действующая на выводы низковольтных обмоток[*1]:

$$T'_{t\ расч} \le 1{,}1\ T'_{t\ прот}.$$

[*1] Обычно считается, что сила, действующая на выводы низковольтной обмотки (кН), равна произведению среднего радиального напряжения сжатия обмотки (кН/мм^2) на площадь сечения вывода (мм^2). Это усилие может деформировать обмотку путем скручивания. В редких случаях низковольтная обмотка бывает наружной, при этом имеет место напряжение растяжения и обмотка имеет тенденцию к раскручиванию.

ДА. 9 Определение трансформатора-прототипа

Трансформатор считается подобным другому трансформатору, взятому для сравнения (прототипу), если он имеет следующие общие с ним характеристики:

- один и тот же режим работы, например генераторный, распределительный или трансформатор межсистемной связи;
- одна и та же принципиальная конструкция, например, трансформатор сухой, масляный, стержневой с концентрическими обмотками, чередующимися обмотками, бронестержневой с круглыми обмотками, некруглыми обмотками;
- одни и те же расположение и последовательность основных обмоток;
- один и тот же тип обмоточных проводов, например алюминиевые, из сплава алюминия, отожженной или упрочненной меди, металлической фольги; круглый, прямоугольный провод, непрерывно транспонированный провод с эпоксидным покрытием, если используется;
- один и тот же тип основных обмоток, например винтовые, катушечные, слоевые и чередующиеся;
- потребляемая мощность [КЗ] (номинальная мощность, отнесенная к сопротивлению КЗ в относительных единицах) составляет от 30 % до 130 % от мощности трансформатора-прототипа;
- осевые силы и напряжения в обмотках, возникающие при КЗ, не превышают 120 % соответствующих значений для трансформатора-прототипа;
- одинаковые технологии изготовления;
- одни и те же системы прессовки и крепления обмоток.

Библиография

[1] Брошюра СИГРЭ 209. «Стойкость силовых трансформаторов к коротким замыканиям», Август 2002 (CIGRE Brochure 209. «The Short-circuit Performance of Power Transformers», August 2002).

УДК 621.314.222.6:006.354 ОКС 29.180 Е64 ОКП 34 1100

Ключевые слова: трансформаторы силовые, область применения, нормативные ссылки, требования, требования к стойкости при коротких замыканиях, режимы сверхтоков, демонстрация стойкости при коротких замыканиях, термическая стойкость, стойкость к динамическим воздействиям, трансформатор-прототип.

Редактор *Г.В. Зотова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.С. Кабашова*
Компьютерная верстка *Т.В. Серегиной*

Сдано в набор 10.04.2014. Подписано в печать 13.05.2014. Формат 60×84⅛ Гарнитура Ариал
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,30. Тираж 76 экз. Зак. 2033.

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru