ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

П Р Е Д В А Р И Т Е Л Ь Н Ы Й
Н А Ц И О Н А Л Ь Н Ы Й
С Т А Н Д А Р Т

ПНСТ____ -
(проект)

ТРАНСФОРМАТОРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
Часть 2
Технические условия на трансформаторы тока

Настоящий проект стандарта не подлежит применению до его утверждения

2017

Предисловие

1. РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Эльмаш (УЭТМ)» (ООО «Эльмаш (УЭТМ)»)

2. ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика»

3. УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от _____201_г. №_____

4. Настоящий стандарт разработан с учетом основных положений МЭК 61869-2:2012 "Трансформаторы измерительные. Часть 2. Дополнительные требования к трансформаторам тока" (IEC 61869-2:2012 Instrument transformers - Part 2: Additional requirements for current transformers)

5. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта и проведения его мониторинга установлены в ГОСТ Р 1.16-2011 (разделы 5 и 6).

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии собирает сведения о практическом применении настоящего стандарта. Данные сведения, а также замечания и предложения по содержанию стандарта можно направить не позднее, чем за девять месяцев до истечения срока его действия, разработчику настоящего стандарта по адресу: Grigoriy_Vedernikov@uetm.ru, и в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии по адресу: 109074, г Москва, Китайгородский проезд, д. 7, стр. 1 и tk16@so-ups.ru, pk2@rosseti.ru.

В случае отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячно издаваемых информационном указателе «Национальные стандарты» и журнале «Вестник технического регулирования». Уведомление будет размещено также на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.gost.ru).

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 .....
2 Нормативные ссылки .....
3 Термины, определения, обозначения и сокращения .....
4 Классификация .....
5 Основные параметры .....
6 Технические требования .....
7 Требования безопасности .....
8 Правила приемки .....
9 Методы контроля .....
10 Транспортирование и хранение .....
11 Указания по эксплуатации .....
12 Гарантии изготовителя .....
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....

Введение

Настоящий стандарт относится к серии стандартов на измерительные трансформаторы (преобразователи) тока и напряжения и устанавливает требования к трансформаторам тока (далее трансформатор).

Настоящий стандарт разработан на основе ГОСТ 7746.

Перечень стандартов в серии «Трансформаторы измерительные» представлен ниже:

Серия, объединяющая стандарты	Разрабатываемый/ разработанный стандарт	Наименование стандарта на трансформаторы конкретных видов
ПНСТ *(проект)* - *1*	ПНСТ *(проект)* - 1	Трансформаторы измерительные. Общие технические условия
	ПНСТ *(проект)* - 2	Технические условия на трансформаторы тока
	ПНСТ *(проект)* - 3	Технические условия на индуктивные трансформаторы напряжения
	ПНСТ *(проект)* - 4	Технические условия на комбинированные трансформаторы
	ПНСТ *(проект)* - 5	Технические условия на емкостные трансформаторы напряжения
	ПНСТ *(проект)* - 6	Зарезервировано для технических условий на электронные трансформаторы
	ПНСТ *(проект)* - 7	
	ПНСТ *(проект)* - 8	

Каждый раздел настоящего стандарта следует применять совместно с разделом стандарта ПНСТ (*проект*) - 1 «Трансформаторы измерительные. Общие технические условия».

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ

ТРАНСФОРМАТОРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ.

Часть 2

Технические условия на трансформаторы тока

Instrument transformers.
Part 2: Requirements for current transformers

Дата введения* – с _____
по _____

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на трансформаторы тока от 3 до 750 кВ, предназначенных для применения в электрических цепях переменного тока частотой 50 или 60 Гц, с целью передачи сигнала измерительной информации приборам измерения, защиты, автоматики, сигнализации и управления, разработанных после 1 января 20__ г.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 8.217-2003 Государственная система обеспечения единства измерений. Трансформаторы тока. Методика поверки

ГОСТ 6827-76 Электрооборудование и приемники электрической энергии. Ряд номинальных токов

ГОСТ 8024 Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний

* Для электрооборудования, разработанного до 01.01.20___ г., действуют ГОСТ 7746-2015

ГОСТ 9920-89 Электроустановки переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Длина пути утечки внешней изоляции

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

ГОСТ Р 52565-2006 Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия

ГОСТ Р 52735-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ

ГОСТ Р 55438-2013 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Релейная защита и автоматика. Взаимодействие субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии при создании (модернизации) и эксплуатации. Общие требования

ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015 Трансформаторы измерительные. Часть 2: Дополнительные требования к трансформаторам тока

ПНСТ (*проект*) - 1 Трансформаторы измерительные. Часть 1: Общие технические условия

3 Термины, определения, обозначения и сокращения

3.1 В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **трансформатор тока для защиты класса точности P**: Трансформатор тока для защиты, для которого не задается требование ограничения остаточного потокосцепления, а уровень насыщения определяется действующим значением тока короткого замыкания при значениях всех прочих параметров, соответствующих номинальным данным.

3.1.2 **трансформатор тока для защиты класса точности PR**: Трансформатор тока для защиты, для которого требование ограничения остаточного потокосцепления задано, а уровень насыщения определяется действующим значением тока короткого замыкания при значениях всех прочих параметров, соответствующих номинальным данным.

3.1.3 **трансформатор тока для защиты класса точности TPY**: Трансформатор тока для защиты, для которого задано требование ограничения остаточного потокосцепления, уровень насыщения определяется максимальным амплитудным значением тока короткого замыкания с максимальным содержанием апериодической составляющей, а предел допускаемой погрешности при протекании тока короткого замыкания в переходном режиме определяется пиковым значением мгновенной погрешности.

П р и м е ч а н и е – Полностью трансформирует апериодическую составляющую во вторичную цепь.

3.1.4 **трансформатор тока для защиты класс точности TPZ**: Трансформатор тока для защиты, для которого задано требование ограничения остаточного, потокосцепления, уровень насыщения определяется максимальным амплитудным значением тока короткого замыкания с максимальным содержанием апериодической составляющей, а предел допускаемой погрешности при протекании тока короткого замыкания в переходном режиме определяется амплитудой периодической составляющей погрешности.

П р и м е ч а н и е – Ограничивает трансформацию апериодической составляющей во вторичную цепь.

3.1.5 **предельная кратность**: Наибольшее значение кратности первичного тока, при котором полная погрешность при номинальной вторичной нагрузке не превышает полной погрешности, заданной классом точности.

3.1.6 **номинальный коэффициент безопасности $K_{Бном}$**: Отношение номинального первичного предельного тока для измерений к номинальному первичному току, при котором полная погрешность трансформатора превышает 10 %.

3.1.7 **постоянная времени вторичного контура T_s**: Постоянная времени контура, образуемого вторичной обмоткой трансформатора тока и присоединенной к ней внешней электрической цепью, определяемая отношением суммарной индуктивности намагничивания и рассеяния вторичной обмотки и индуктивности нагрузки к суммарному активному сопротивлению нагрузки и вторичной обмотки.

П р и м е ч а н и я

1 Понятие постоянной времени вторичного контура обычно применяется к трансформаторам тока, предназначенным для работы в условиях переходного режима короткого замыкания, для которых нормируется чисто активная нагрузка ($\cos \varphi_2 = 1$). В общем случае, индуктивность нагрузки также должна учитываться.

2 Индуктивность вторичной обмотки состоит из индуктивности, определяемой параметрами магнитопровода (индуктивность намагничивания), и индуктивности рассеяния обмотки. При измерениях, выполняемых на выводах вторичной обмотки при разомкнутой первичной обмотке, измеряемой величиной является их сумма. Однако, при конструкторских расчетах трансформатора, они вычисляются раздельно, по разным методикам. В большинстве случаев индуктивностью рассеяния можно пренебречь, но возможность такого пренебрежения следует проверять в каждом конкретном случае.

3.1.8 **вольтамперная характеристика ВАХ**: Зависимость между действующими значениями тока намагничивания и напряжения.

3.1.9 **потокосцепление насыщения Ψ_{sat}**: Максимальное значение магнитного потока, соответствующее насыщению материала магнитопровода, умноженное на число витков обмотки.

3.1.10 **остаточное потокосцепление Ψ_r**: Значение потокосцепления, определяемое магнитным потоком, остающимся в магнитопроводе после отключения тока с амплитудным значением, обеспечивающим потокосцепление насыщения Ψ_{sat}.

3.1.11 **номинальный коэффициент остаточной намагниченности K_r**: Отношение остаточного потокосцепления Ψ_r к потокосцеплению насыщения Ψ_{sat}, выраженному в процентах.

3.1.12 **нормированный цикл**: Одно или несколько протеканий токов короткого замыкания через трансформатор с нормируемыми длительностями протекания и пауз.

3.1.13 **номинальная постоянная времени затухания апериодической составляющей первичного тока $T_{P.ном}$**: Постоянная времени затухания апериодической составляющей первичного тока, при которой, в нормированном цикле, соблюдаются требования к точности трансформатора тока в переходном режиме короткого замыкания.

3.1.14 **эквивалентная постоянная времени $T_{P.экв}$:** Постоянная времени затухания свободной апериодической составляющей тока, затухающей по экспоненциальному закону, которой заменяют сумму свободных апериодических составляющих, имеющих неодинаковые постоянные времени затухания.

3.1.15 **ток погрешности** i_{ε}: Разность между мгновенными значениями вторичного тока, умноженного на номинальный коэффициент трансформации, и первичного тока.

3.1.16 **погрешность трансформатора в переходном режиме** $\varepsilon_{\max}$: Максимальное мгновенное значение тока погрешности в нормированном цикле, выраженное в процентах от амплитудного значения периодической составляющей тока, протекающего в первичной цепи.

3.1.17 **периодическая составляющая погрешности переходного режима** $\varepsilon_{ac\max}$: Амплитуда периодической составляющей тока погрешности переходного режима, выраженная в процентах от амплитудного значения периодической составляющей тока, протекающего в первичной цепи.

3.1.18 **переходный коэффициент $K_{п.р}(t)$**: Зависимость изменения от времени, характеризующая изменение во времени отношения мгновенного значения потокосцепления при наличии апериодической составляющей к амплитудному значению потокосцепления, соответствующего току погрешности при токе номинальной предельной кратности, не содержащем апериодической составляющей.

П р и м е ч а н и е – Переходный коэффициент численно равен отношению мгновенного значения тока погрешности при наличии апериодической составляющей к амплитудному значению тока погрешности при токе номинальной предельной кратности, не содержащем апериодической составляющей.

3.1.19 **номинальный коэффициент переходного режима $K_{п.р.ном}$**: Коэффициент, равный отношению потокосцепления, соответствующего напряжению намагничивания, к потокосцеплению, соответствующему току погрешности при токе номинальной предельной кратности, не содержащем апериодической составляющей.

П р и м е ч а н и е – Коэффициент характеризует предел допустимого увеличения потокосцепления (до начала насыщения) в результате наличия апериодической составляющей в токе короткого замыкания.

3.1.20 **напряжение намагничивания $U_{нам}$**: Действующее значение напряжения на выводах вторичной обмотки при протекании по ней тока намагничивания.

3.1.21 **расчетное значение напряжения намагничивания $U_{нам.расч}$**: Напряжение, рассчитанное при номинальном значении тока намагничивания.

3.1.22 **ток намагничивания**: Действующее значение тока, протекающего во вторичной обмотке трансформатора тока при синусоидальном напряжении номинальной частоты, приложенном к вторичным выводам, причем первичная и остальные обмотки разомкнуты.

3.1.23 **номинальный ток намагничивания $I_{2нам}$**: Действующее значение тока намагничивания, равное действующему значению тока погрешности при токе предельной кратности, при прочих номинальных параметрах.

П р и м е ч а н и е – Для трансформаторов, предназначенных для работы в переходных режимах короткого замыкания: действующее значение тока намагничивания, амплитудное значение которого равно максимальному мгновенному значению тока погрешности переходного режима при прочих номинальных параметрах.

3.2 В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

T_s	–	постоянная времени вторичного контура;
$T_{s.ном}$	–	номинальная постоянная времени вторичного контура;
T_P	–	постоянная времени затухания апериодической составляющей первичного тока;
$T_{P.ном}$	–	номинальная постоянная времени затухания апериодической составляющей первичного тока;
$T_{P.экв}$	–	эквивалентная постоянная времени;
L_s	–	индуктивность вторичного контура;
L_m	–	индуктивность намагничивания;
$L_{m.ном}$	–	номинальная индуктивность намагничивания;
L_2	–	индуктивность рассеяния вторичной обмотки
$L_н$	–	индуктивность нагрузки
R_s	–	сопротивление вторичного контура постоянному току;
R_2	–	сопротивление вторичной обмотки постоянному току;
$R_н$	–	сопротивление нагрузки постоянному току;
$Z_{2ном}$	–	номинальная вторичная нагрузка;
$S_{2ном}$		
Z_{2SUM}	–	полное сопротивление ветви вторичного тока без учета индуктивности рассеяния вторичной обмотки;
ω	–	угловая частота;
Ψ_{sat}	–	потокосцепление насыщения;
Ψ_r	–	остаточное потокосцепление;
ВАХ	–	вольтамперная характеристика;
$U_{нам}$	–	напряжение намагничивания;
$U_{нам.расч}$	–	расчетное значение напряжения намагничивания;
ε	–	полная погрешность;
ε_{max}	–	погрешность переходного режима;
$\varepsilon_{ac\,max}$	–	периодическая составляющая погрешности переходного режима;
i_2	–	мгновенное значение вторичного тока;
i_1	–	мгновенное значение первичного тока;
i_ε	–	мгновенное значение тока погрешности;
$i_{\varepsilon\,max}$	–	максимальное значение мгновенного тока погрешности;
$i_{\varepsilon ac\,max}$	–	амплитуда периодической составляющей тока погрешности;
$i_д$	–	ток электродинамической стойкости;
$I_{1ном}$	–	номинальный первичный ток трансформатора тока;

$I_{2ном}$ – номинальный вторичный ток трансформатора;
$I_{1нр}$ – наибольший рабочий первичный ток;
$I_{КЗ,эфф}$ – действующее значение первичного тока короткого замыкания;
$I_{Т}$ – ток термической стойкости;
$I_{2нам}$ – номинальный ток намагничивания;
I_{1} – действующее значение периодической составляющей первичного тока
$I_{1исп}$ – действующее значение периодической составляющей испытательного первичного тока
$n_{ном}$ – номинальный коэффициент трансформации;
$K_{ном}$ – номинальная предельная кратность;
$K_{Б.ном}$ – номинальный коэффициент безопасности;
$K_{п.р}(t)$ – переходный коэффициент;
$K_{п.рном}$ – номинальный коэффициент переходного режима;
$K_{Д}$ – кратность тока электродинамической стойкости;
$K_{Т}$ – кратность тока термической стойкости;
$K_{г}$ – коэффициент остаточной намагниченности;
$K_{г.ном}$ – номинальный коэффициент остаточной намагниченности;
$t_{к}$ – время протекания тока короткого замыкания;
$t_{кз}$ – длительность протекания тока короткого замыкания без автоматического повторного включения (АПВ);
$t_{кз1}$ – время протекания тока в первом коротком замыкании в цикле с АПВ;
$t_{кз2}$ – время протекания тока во втором коротком замыкании в цикле с АПВ;
$t_{бт}$ – длительность бестоковой паузы между двумя короткими замыканиями при АПВ;
А – расстояние между осями проводников соседних фаз в месте установки трансформатора в эксплуатации;
Б – расстояние в свету от трансформатора до места ближайшего изгиба проводника, служащего в эксплуатации первичной обмоткой трансформатора.

4 Классификация

4.1 Трансформаторы тока подразделяют по следующим основным признакам

4.1.1 По роду установки (категории размещения и климатическому исполнению) - по ГОСТ 15150.

4.1.2 По типу конструкции, в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 – Обозначение трансформаторов по типу конструкции

Конструктивное исполнение трансформатора	Условное обозначение
Опорный	О
Проходной (втулочный)	П
Шинный	Ш
Встроенный	В
Разъемный	Р

Одноступенчатый	-
Каскадный	К

4.1.3 По виду изоляции, в соответствии с таблицей 3.

Т а б л и ц а 3 – Обозначение трансформаторов по виду изоляции

Вид изоляции	Условное обозначение
Внешняя	
С фарфоровой покрышкой	Ф
С полимерной покрышкой	П
Литая	Л
Внутренняя	
Масляная	М
Газовая	Г
Маслобарьерная	МБ
Воздушная	В
Литая или с элементами литой изоляции	-

4.1.4 По назначению вторичных обмоток в соответствии с таблицей 4. Допускается сочетание назначений, например, для измерения и защиты или для измерения и учета. В этом случае в обозначении обмотки указываются оба класса точности, вначале указывается класс точности для измерения, а в скобках класс точности для защиты, например, 0,5(5P).

Т а б л и ц а 4 – Обозначение трансформаторов по назначению вторичных обмоток

Назначение вторичной обмотки трансформатора	Условное обозначение
Для измерений	Указывают класс точности
Для защиты[1)]	То же
[1)] Здесь и далее под словом "защита" подразумеваются все виды защит по ГОСТ Р 55438.	

4.1.5 По числу коэффициентов трансформации: с одним коэффициентом трансформации (однодиапазонный), с несколькими коэффициентами трансформации (многодиапазонный), получаемые путем изменения числа витков первичной или (и) вторичной обмотки.

4.2 Условное обозначение трансформатора

П р и м е ч а н и я

1 Буквенная часть условного обозначения представляет серию; совокупность буквенного обозначения и значения номинального напряжения - тип; полное обозначение в целом - типоисполнение трансформатора.

2 Для встроенных трансформаторов допускается применение упрощенного условного обозначения.

3 В стандартах на трансформаторы конкретных типов допускается вводить в буквенную часть один или несколько признаков, а также дополнительные буквы и (или) цифры, исключать или заменять отдельные буквы (кроме Т) для обозначения особенностей конкретного трансформатора.

Пример - Условное обозначение опорного трансформатора тока с газовой изоляцией типа ТРГ-110 с категорией исполнения по длине пути утечки внешней изоляции II, имеющего обмотку для измерения с классом точности 0,2, три обмотки для защиты с классами точности 5Р, наибольший рабочий ток 1800А (номинальный ток 1200А с длительно допустимой перегрузкой 50 %), предназначенного для эксплуатации в районах с умеренным климатом категорией размещения 1:*

ТРГ- 110 II-0,2/5Р/5Р/5Р-1800 У1*

5 Основные параметры

5.1 Значения основных параметров следует выбирать из приведенных в таблице 5.

Т а б л и ц а 5 – Основные параметры

Наименование параметра	Значение
1 Номинальный первичный ток трансформатора $I_{1ном}$, А	Устанавливают в стандартах на трансформаторы конкретных типов [1)]
2 Номинальный вторичный ток $I_{2ном}$, А [2)]	1; 5
3 Наибольший рабочий первичный ток $I_{1нр}$, А	Устанавливают в стандартах на трансформаторы конкретных типов по п. 6.8
4 Номинальная вторичная нагрузка $S_{2ном}$ с коэффициентом мощности $\cos\varphi_2 = 1$, В·А[2)]	0,5; 1; 2; 2,5;
5 Номинальная вторичная нагрузка $S_{2ном}$ с индуктивно-активным коэффициентом мощности $\cos\varphi_2 = 0{,}8$, В·А[1)]. Соответствующие значения номинальной вторичной нагрузки $Z_{2ном}$, Ом, определяют по формуле: $$Z_{2ном} = \frac{S_{2ном}}{I_{2ном}^2}$$	3; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75; 100
6 Класс точности трансформатора или вторичной обмотки:	
6.1 для измерений	0,1; 0,2; 0,2S; 0,5; 0,5S; 1;3;5;10
6.2 для защиты	5P; 10P; 5PR; 10PR; TPY, TPZ
7 Номинальная предельная кратность вторичных обмоток для защиты $K_{ном}$	Устанавливают в стандартах на трансформаторы конкретных типов
8 Номинальный коэффициент безопасности $K_{Бном}$, вторичных обмоток для измерений	Устанавливают в стандартах на трансформаторы конкретных типов. Не устанавливают для вторичных обмоток сочетающих назначение для измерения и защиты.
9 Номинальный коэффициент переходного режима $K_{п.рном}$ для трансформаторов класса TPY, TPZ	Устанавливают в стандартах на трансформаторы конкретных типов
10 Нормированный цикл $t_{кз}$ и/или $t_{кз1}$-$t_{бт}$-$t_{кз2}$ для трансформаторов класса TPY, TPZ, с	Устанавливают в стандартах на трансформаторы конкретных типов
11 Номинальный коэффициент остаточной намагниченности $K_{г.ном}$ для обмоток классов 5PR и 10PR TPY,TPZ	Не более 10 %
12 Номинальная постоянная времени затухания апериодической составляющей первичного тока $T_{P.ном}$, мс	Устанавливают в стандартах на трансформаторы конкретных типов
13 Номинальная постоянная времени вторичной цепи $T_{S.ном}$, мс и индуктивность намагничивания $L_{m.ном}$, Гн.	Устанавливают в стандартах на трансформаторы конкретных типов
[1)] Рекомендуется выбирать в соответствии с ГОСТ 6827. [2)] По требованию заказчика в стандартах на трансформаторы конкретных типов допускается устанавливать другие значения.	

6 Технические требования

6.1 Общие требования – по 6.1 ПНСТ (*проект*) - 1.

6.2 Требования по устойчивости к внешним воздействиям окружающей среды – по 6.2 ПНСТ (*проект*) - 1.

6.3 Требования по сейсмостойкости – по 6.3 ПНСТ (*проект*) - 1.

6.4 Требования к изоляции – по 6.4 ПНСТ (*проект*) - 1 со следующими дополнительными условиями:

а) изоляция вторичных обмоток трансформатора тока, у которых значение напряжения намагничивания больше или равно 1,8 кВ, должна выдерживать напряжение промышленной частоты 5 кВ в течение 1 мин.

б) при стандартных атмосферных условиях по 6.2.3 ПНСТ (*проект*) - 1 значение сопротивления изоляции обмоток трансформаторов должно быть не менее:

1) 1000 МОм – для первичных обмоток трансформаторов на номинальные напряжения 3-35 кВ;
2) 3000 МОм – для первичных обмоток трансформаторов на номинальные напряжения 110-220 кВ;
3) 5000 МОм – для первичных обмоток трансформаторов на номинальные напряжения 330 кВ и выше;
4) 50 МОм – для вторичных обмоток трансформаторов;

в) Междувитковая изоляция вторичных обмоток трансформатора должна выдерживать без пробоя или повреждения в течение 1 мин индуктируемое в них напряжение при протекании по первичной обмотке тока, при этом амплитуда напряжения между выводами разомкнутой вторичной обмотки не должна превышать предельных значений:

– 4,5 кВ для трансформаторов тока с напряжением намагничивания менее 1,8 кВ;

– 10 кВ для трансформаторов тока с напряжением намагничивания большим или равным 1,8 кВ.

Значение тока в первичной обмотке принимается равным номинальному, если не достигнуто предельное значение амплитуды напряжения между выводами разомкнутой

вторичной обмотки, или меньшим номинального и соответствующим предельному значению амплитуды напряжения между выводами разомкнутой вторичной обмотки.

6.5 Сопротивление вторичных обмоток постоянному току – по 6.5 ПНСТ (*проект*) - 1. Для трансформаторов с ответвлениями на вторичных обмотках сопротивление вторичных обмоток постоянному току должно быть указаны для каждого ответвления в эксплуатационной документации на конкретный тип трансформатора.

6.6 Требования в части радиопомех – по 6.6 ПНСТ (*проект*) - 1.

6.7 Метрологические характеристики

6.7.1 Метрологические характеристики следует устанавливать для следующих рабочих условий применения трансформаторов:

а) частота переменного тока (50^{+1}_{-2}) Гц или (60^{+1}_{-2}) Гц;

б) первичный ток - в соответствии с 6.7.2 и 6.7.3;

в) значение вторичной нагрузки - в соответствии с 6.7.2 и 6.7.3;

г) температура окружающего воздуха - в соответствии с климатическим исполнением и категорией размещения, если иное не указано в стандартах на трансформаторы конкретных типов;

д) высота установки трансформаторов над уровнем моря по 6.2.4 ПНСТ (*проект*) - 1.

е) размеры первичного токоведущего контура - значения размеров А и Б в соответствии с указанными в стандартах на трансформаторы конкретных типов.

П р и м е ч а н и е : для трансформаторов, применяемых в КРУ и КРУЭ размеры А и Б должны быть указаны в руководстве по эксплуатации.

6.7.2 Пределы допускаемых погрешностей вторичных обмоток для измерений и учета в рабочих условиях применения по 6.7.1 при установившемся режиме должны соответствовать значениям, указанным в таблице 6.

Для трансформаторов с классом точности от 0,1 до 1,0 допускается расширять диапазон номинальных первичных токов в сторону уменьшения до 0,1 % или в сторону увеличения до 150 %, 200 %, либо совмещать, например, от 0,1 % до 200 %.

Т а б л и ц а 6 – Пределы допускаемых погрешностей вторичных обмоток для измерений

Класс точности	Первичный ток, % номинального значения	Предел допускаемой погрешности			Диапазон вторичной нагрузки, % номинального значения[1)]
		токовой, %	угловой		
			(мин)	срад	
0,1	0,1[2)]	±1,6	±60	±1,8	25-100
	5	±0,4	±15	±0,45	
	20	±0,2	±8	±0,24	
	100-120	±0,1	±5	±0,15	
	150-200[2)]	±0,1	±5	±0,15	
0,2	0,1[2)]	±3,0	±120	±3,6	
	5	±0,75	±30	±0,9	
	20	±0,35	±15	±0,45	
	100-120	±0,2	±10	±0,3	
	150-200[2)]	±0,2	±10	±0,3	
0,2S	0,1[2)]	±1,5	±60	±1,8	
	1	±0,75	±30	±0,9	
	5	±0,35	±15	±0,45	
	20	±0,2	±10	±0,3	
	100	±0,2	±10	±0,3	
	120	±0,2	±10	±0,3	
	150-200[2)]	±0,2	±10	±0,3	
0,5	0,1[2)]	±6	±360	±10,8	
	5	±1,5	±90	±2,7	
	20	±0,75	±45	±1,35	
	100-120	±0,5	±30	±0,9	
	150-200[2)]	±0,5	±30	±0,9	
0,5S	0,1[2)]	±3	±180	±5,4	
	1	±1,5	±90	±2,7	
	5	±0,75	±45	±1,35	
	20	±0,5	±30	±0,9	
	100	±0,5	±30	±0,9	
	120	±0,5	±30	±0,9	
	150-200[2)]	±0,5	±30	±30	
1	0,1[2)]	±12,0	±720	±21,6	
	5	±3,0	±180	±5,4	
	20	±1,5	±90	±2,7	
	100-120	±1,0	±60	±1,8	
	150-200[2)]	±1,0	±60	±1,8	
3	50-120	±3,0	Не нормируют		50-100
5		±5,0			
10		±10			

[1)]для трансформаторов с номинальными вторичными нагрузками 2; 2,5; 3; 5 и 10 В•А устанавливать нижний предел вторичных нагрузок – 1 В•А. Для трансформаторов с номинальной вторичной нагрузкой 1 В•А устанавливать нижний предел вторичных нагрузок – 0,8 В·А.
[2)] значения для расширенных диапазонов токов

6.7.2.1 Допускается для трансформаторов тока устанавливать диапазон вторичной нагрузки, отличающийся от указанного в таблице 6, их значения должны быть указаны в эксплуатационной документации.

6.7.2.2 При расширении диапазона номинальных первичных токов в эксплуатационной документации должны быть указаны их значения.

6.7.3 Пределы допускаемых погрешностей вторичных обмоток для защиты в рабочих условиях применения по 6.7.1 при установившемся и переходном режиме при номинальной вторичной нагрузке должны соответствовать указанным в таблице 7.

Т а б л и ц а 7 – Пределы допускаемых погрешностей вторичных обмоток для защиты

Класс точности	Предел допускаемой погрешности				
	При номинальном первичном токе			полной, при токе номинальной предельной кратности, ε, %	погрешности при переходном режиме, %
	токовой, %	угловой			
		мин	срад		
5P, 5PR	±1	±60	±1,8	5	Не нормируют
10P, 10PR	±3	Не нормируют	Не нормируют	10	Не нормируют
TPY	±1	±60	±1,8	10	$\varepsilon_{\max} \le 10$
TPZ	±1	180±18	5,3±0,6	10	$\varepsilon_{ac\max} \le 10$
П р и м е ч а н и е – Оценку работоспособности трансформаторов тока для защиты в переходных режимах можно выполнить по рекомендациям приложения Б.					

6.7.4 Для трансформаторов с ответвлениями класс точности, номинальная нагрузка и номинальный коэффициент безопасности или номинальная предельная кратность, а для трансформаторов, предназначенных для работы в переходных режимах, также коэффициент переходного режима $K_{п.рном}$, должны быть указаны для каждого ответвления в эксплуатационной документации на конкретный тип трансформатора.

Для трансформаторов, у которых изменение коэффициента трансформации достигается последовательно-параллельным соединением секций первичной обмотки, дополнительно указываются все значения номинальных первичных токов с указанием первичного тока, на который был собран трансформатор на заводе изготовителе.

6.7.5 Значение напряжения намагничивания

6.7.5.1 Напряжение намагничивания, определяемое при значении тока намагничивания по (1), должно быть меньше расчетного напряжения намагничивания $U_{нам.расч.}$ по (2) для измерительных трансформаторов и больше расчетного для трансформаторов для защиты.

$$I_{2нам} = \frac{I_{2ном} \cdot K}{100} \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

$$U_{нам\ расч.} = I_{2ном} \cdot K \cdot Z_{2SUM}, \quad (2)$$

где К – $K_{Б.ном}$, обмоток для измерения;

– $K_{ном}$, обмоток для защиты классов P, PR

– $К_{ном}$·$К_{п.рном}$ обмоток для защиты, классов TPY, TPZ;

ε – обмоток для защиты в соответствии с таблицей 7, обмоток для измерения принимается равной 10 %;

Z_{2SUM} – полное сопротивление ветви вторичного тока без учета индуктивности рассеяния вторичной обмотки, определяемое по формуле

$$Z_{2SUM} = \sqrt{(R_2 + Z_{2HOM} \cdot \cos\varphi_2)^2 + (Z_{2HOM} \cdot \sin\varphi_2)^2} \quad (3)$$

6.7.5.2 По требованию заказчика может быть предоставлена ВАХ в табличном или графическом виде с указанием контрольных точек.

6.7.5.3 Фактические значения напряжения и тока намагничивания вторичных обмоток должны быть указаны в паспорте на трансформатор.

6.7.6 Фактическое значение коэффициента остаточной намагниченности указывается в паспорте трансформатора.

6.8 Требование к нагреву – по 6.8 ПНСТ (*проект*) - 1 со следующими дополнительными условиями:

а) наибольший рабочий первичный ток должен быть равен номинальному первичному току или в зависимости от перегрузочной способности может быть больше номинального первичного тока на 20 %, 50 % или 100 %;

б) трансформаторы с наибольшим рабочим первичным током, равным номинальному первичному току, должны выдерживать повышение первичного тока на 20 % суммарной продолжительностью не более 2 часов в неделю;

в) для трансформатора с обмотками, имеющими различные номинальные первичные токи, наибольший рабочий первичный ток трансформатора устанавливается по наименьшему значению номинального первичного значения тока обмотки с учетом длительного перегрева.

6.9 Требования к стойкости при токах короткого замыкания

6.9.1 Трансформаторы тока должны быть устойчивы к электродинамическому и термическому воздействиям токов короткого замыкания, параметры которых не превышают установленных значений:

а) тока электродинамической стойкости $i_д$ или его кратности $К_Д$ по отношению к амплитуде номинального первичного тока;

б) тока термической стойкости I_T или его кратности K_T по отношению к номинальному первичному току;

в) времени протекания тока короткого замыкания $t_к$ равного:

1) 3 с – для трансформаторов на номинальные напряжения до 220 кВ включительно;

2) 2 с – для трансформаторов на номинальные напряжения выше 220 кВ.

6.9.2 Значения тока электродинамической стойкости $i_д$ и тока термической стойкости I_T должны соответствовать следующему условию

$$i_д \geq (1 + e^{-\frac{1}{2 f_{ном} T_р}}) \cdot \sqrt{2} \cdot I_T . \qquad (4)$$

Примечание – Для трансформаторов, для которых постоянная времени первичного тока $T_р$ не задана, она принимается равной 45 мс.

6.9.3 В стандартах на трансформаторы конкретных типов должны быть установлены: значение тока термической стойкости или его кратность к номинальному току, время протекания тока, а также значение тока электродинамической стойкости или его кратность к номинальному току.

6.9.4 К шинным, встроенным и разъемным трансформаторам требование по электродинамической стойкости не предъявляют.

6.10 Обозначение выводов обмоток

Выводы первичных и вторичных обмоток и вторичные обмотки трансформаторов следует обозначать в соответствии с таблицей 8.

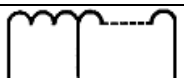
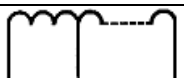
Линейные выводы первичной обмотки, а также соответствующие им стороны шинных, встроенных и разъемных трансформаторов, не имеющих собственной первичной обмотки, обозначают $Л_1$ и $Л_2$.

Обозначения наносят таким образом, чтобы в один и тот же момент времени выводы $Л_1$, $Н_1$, ..., $Н_n$ и $И_1$, ..., $И_n$ имели одинаковую полярность, т.е. чтобы при направлении тока в первичной обмотке от $Л_1$, $Н_1$, ..., $Н_n$ к $К_1$, $К_2$, ..., $Л_2$ вторичный ток проходил по внешней цепи (приборам) от $И_1$ к $И_2$, …, $И_n$.

Обозначения выполняют прописными буквами русского алфавита в сочетании с цифрами. Цифры располагают в одну строку с буквами (например Л1) или в индексе (например $Л_1$).

Допускается использовать обозначения латинскими буквами, например, для вторичных обмоток S_1-S_2 , для первичных P_1-P_2 .

Т а б л и ц а 8 – Обозначения выводов и обмоток трансформаторов

Обмотка трансформатора	Обозначения выводов и обмоток	
Первичная	С одной секцией	С несколькими секциями
	$Л_1$_____$Л_2$	$Л_1$_____$К_1$
		$Н_2$_____$К_2$
		$Н_n$_____$Л_2$
Вторичная	Трансформатор с одной вторичной обмоткой:	
	без ответвлений	с ответвлениями
	$И_1$ $И_2$	 $И_1$ $И_2$ $И_n$
	Трансформатор с несколькими вторичными обмотками:	
	без ответвлений	с ответвлениями
	$1И_1$ $1И_2$ $2И_1$ $2И_2$	 $3И_1$ $3И_2$ $3И_n$

6.11 Требования к конструкции – по 6.11 ПНСТ (*проект*) - 1.

6.12 Требования к надежности – по 6.12 ПНСТ (*проект*) - 1.

6.13 Комплектность – по 6.13 ПНСТ (*проект*) - 1.

6.14 Маркировка – по 6.14 ПНСТ (*проект*) - 1. При этом на табличке должны быть указаны следующие параметры:

а) номер вторичной обмотки (только для трансформаторов с двумя или более вторичными обмотками);

б) номинальный коэффициент трансформации обмоток (в виде отношения номинальных первичных и вторичных токов).

П р и м е ч а н и я

1 Для трансформаторов, у которых, коэффициент трансформации изменяется путем изменения числа витков первичных обмоток, номинальные первичные токи указываются через тире «-», например, 300-600-1200/5 А.

2 Для трансформаторов, у которых, коэффициент трансформации изменяется путем изменения числа витков вторичных обмоток, номинальные первичные токи указываются через дробь «/», например, 300/600/1200/5 А.

в) класс точности для вторичных обмоток согласно 6.7;

г) номинальный коэффициент безопасности $К_{Бном}$ (для вторичных обмоток,

предназначенных для измерения);

д) значение номинальной предельной кратности $K_{ном}$ (для вторичных обмоток, предназначенных для защиты);

е) номинальная вторичная нагрузка $S_{2ном}$ или $Z_{2ном}$, В·А или Ом;

ж) диапазон токов, для которых нормированы метрологические характеристики (при использовании расширенного диапазона, например $0,1 \div 200\ \% \cdot I_{1ном}$);

и) номинальный коэффициент переходного режима $K_{п.рном}$ (для классов TPY, TPZ).

Для трансформаторов с ответвлениями на вторичных обмотках метрологические параметры указывают для каждого ответвления.

При недостатке места на табличке допускается данные наносить в сочетании и последовательности согласно следующим примерам:

5P/30 10 (номинальный класс точности 5P номинальная вторичная нагрузка 30 В·А, номинальная предельная кратность 10);

0,5/20 10 (номинальный класс точности 0,5 номинальная вторичная нагрузка 20 В·А, номинальный коэффициент безопасности 10).

6.15 Упаковка - по 6.15 ПНСТ (*проект*) - 1.

7 Требования безопасности

В соответствии с разделом 7 ПНСТ (*проект*) - 1

8 Правила приемки

В соответствии с разделом 8 ПНСТ (*проект*) - 1. При этом для трансформаторов тока устанавливаются испытания по таблице 9.

Т а б л и ц а 9 - Испытания для трансформаторов тока

Наименование испытания и проверки	Необходимость проведения испытаний				Техничес-кие тре-бования	Методы контроля	Расположение пунктов, часть ПНСТ *(проект)* -
	в целях утвержде-ния типа	квалифи кацион-ных	приемо-сдаточ-ных	периоди ческих			
1 Проверка на соответствие требованиям сборочного чертежа	+	+	+	+	6.1; 6.10;	9.1	-1
2 Испытание электрической прочности изоляции первичной обмотки одноминутным напряжением промышленной частоты	-	+	+	+	6.4.1	9.2.1	-1
3 Испытание электрической прочности изоляции первичной обмотки одноминутным напряжением промышленной частоты газонаполненных трансформаторов при избыточном давлении газа, равном нулю.	-	+	-	-	6.4.9	9.2.10	-1
4 Испытание электрической прочности изоляции напряжениями грозовых импульсов	-	+	-	-	6.4.1	9.2.1	-1
5 Испытание электрической прочности изоляции первичной обмотки трансформаторов с номинальным напряжением 330 кВ и выше напряжением коммутационного импульса	-	+	-	-	6.4.1	9.2.1	-1
6 Испытание внутренней изоляции первичной обмотки маслонаполненных трансформаторов на стойкость к тепловому пробою	-	О	-	-	6.4.2	9.2.2	-1
7 Испытания электрической прочности изоляции вторичных обмоток одноминутным напряжением промышленной частоты	-	+	+	+	6.4.3	9.2.3	-1,-2
8 Измерение сопротивления изоляции обмоток	-	+	+	+	6.4.4	9.2.4	-1
9 Испытание изоляции первичной обмотки маслонаполненных трансформаторов с номинальным напряжением 330 кВ и выше многократными срезанными импульсами	-	О	-	-	6.4.5	9.2.5	-1
10 Измерение уровня частичных разрядов	-	+	+	+	6.4.6	9.2.6	-1
11 Измерение тангенса угла диэлектрических потерь масляной и маслобарьерной изоляции первичной обмотки трансформаторов	-	+	+	+	6.4.7	9.2.7	-1
12 Испытание масла масляных трансформаторов: - определение пробивного напряжения, - определение тангенса угла диэлектрических потерь масла - определение влаго- и газосодержания (хроматографический анализ).	 - - -	 + + +	 + + -	 + + +	 6.4.7 6.4.7 6.11.2.1	 9.2.8 9.2.8	-1
13 Проверка длины пути утечки внешней изоляции	-	+	-	-	6.4.8	9.2.9	-1
14 Измерение сопротивления вторичных обмоток постоянному	+	+	+	+	6.5	9.5	-1

Наименование испытания и проверки	Необходимость проведения испытаний				Технические требования	Методы контроля	Расположение пунктов, часть ПНСТ *(проект)* -
	в целях утверждения типа	квалификационных	приемо-сдаточных	периодических			
току							
15 Испытание внешней изоляции в отношении уровня радиопомех	-	+	-	-	6.6	9.3	-1
16 Определение количественной утечки газа газонаполненных трансформаторов	-	+	+	+	6.11.3.2	9.4	-1
17 Испытание маслонаполненных трансформаторов на герметичность	-	+	+	+	6.11.2.1	9.6	-1
18 Испытания на устойчивость к воздействию климатических факторов внешней среды	+	+	-	О	6.2.1	9.7	-1
19 Испытания на устойчивость к воздействию механических факторов	-	+	-	О	6.2.5	9.7	-1
20 Испытание на прочность при транспортировании	-	+	-	-	6.15.2; 10.1	9.8	-1
21 Испытание упаковки на сбрасывание	-	+	-	-	6.15.2; 10.1	9.9	-1
22 Подтверждение средней наработки до отказа [1)]	-	-	-	+	6.12.1	9.13	-1
23 Испытание на степень защиты оболочек	-	+	-	-	7.3	9.11	-1
24 Испытание на внутреннее дуговое короткое замыкание трансформаторов	-	+	-	-	6.11.6	9.10	-1
25 Испытание газонаполненных трансформаторов повышенным давлением	-	+	+	+	6.11.3.6	9.12	-1
26 Испытание на нагрев при продолжительном режиме работы	-	+	-	-	6.8	9.14	-1,-2
27 Испытания междувитковой изоляции	-	+	+	+	6.4	9.2	-2
28 Проверка полярности	+	+	+	+	6.10	9.15	-2
29 Определение погрешностей	+	+	+	+	6.7.2 6.7.3	9.15	-2
30 Проверка предельной кратности (определение полной погрешности) вторичных обмоток для защиты	+	+	-	+	5.1 6.7.3	9.16	-2
31 Проверка коэффициента безопасности вторичных обмоток для измерений	+	+	-	+	5.1	9.16	-2
32 Определение напряжения намагничивания вторичных обмоток (ВАХ)	+	+	+	+	6.7.5	9.17	-2
33 Испытание на стойкость к токам короткого замыкания (испытания на электродинамическую и термическую стойкость)	-	+	-	-	6.9	9.18	-2
34 Определение коэффициента остаточной намагниченности Kr	+	+	+	+	5.1	А1.1	-2 Приложение А
35 Определение индуктивности намагничивания L_m и постоянной времени T_s,	+	+	+	+	5.1	А1.2	-2 Приложение А
36 Определение погрешности в переходном режиме короткого замыкания	+	+	-	+	6.7.3	А2	-2 Приложение А

[1)] Подтверждение средней наработки до отказа первый раз проводят через 10 лет после начала серийного производства, затем – не реже одного раза в 5 лет.

Примечание: Знак «+» означает, что испытание проводят; знак «-» - не проводят, буква «О» означает, что испытание проводят, если это указано в стандарте на трансформатор конкретного типа

9 Методы контроля

9.1 Проверка на соответствие требованиям сборочного чертежа по 9.1 ПНСТ (*проект*) - 1.

9.2 Испытание изоляции – по 9.2 ПНСТ (*проект*) - 1 и следующими дополнительными условиями испытания междувитковой изоляции:

а) при испытаниях междувитковой изоляции испытуемая вторичная обмотка должна быть разомкнута, а остальные вторичные обмотки (если они имеются) - замкнуты накоротко; через первичную обмотку трансформатора пропускают ток, значение которого определяют в соответствии с требованиями 6.4;

П р и м е ч а н и е – Целью настоящего испытания является не воспроизведение условий работы трансформатора при разомкнутой вторичной цепи, а проверка качества междувитковой изоляции, поэтому форму волны тока и напряжения не нормируют. Допускается проведение испытания при нескольких одновременно разомкнутых вторичных обмотках, если сравнительными испытаниями на одной и той же установке доказано, что результаты испытаний не ухудшаются.

б) допускается имитировать первичную обмотку трансформатора одним или несколькими витками провода, при этом за номинальный первичный ток принимают такое значение, при котором сохраняется значение номинальных ампервитков;

в) индуктируемое во вторичной обмотке напряжение допускается определять:

1) непосредственным измерением напряжения на выводах испытуемой вторичной обмотки;

2) измерением напряжения на выводах первичной или «контрольной» обмотки, наложенной временно поверх испытуемой обмотки, и умножением измеренного значения напряжения на отношение чисел витков вторичной или контрольной и первичной обмоток.

г) первичный ток (действующее значение) следует измерять с помощью трансформатора тока и амперметра классов точности не ниже 1.

Трансформатор считают выдержавшим испытание, если в процессе испытания междувитковой изоляции вторичных обмоток не произошло резкого увеличения первичного тока или уменьшения индуктируемого напряжения.

Напряжение, индуктируемое во вторичной обмотке (амплитудное значение), следует определять с погрешностью не более 10 % приборами, имеющими высокое

входное сопротивление, например, электронным вольтметром или электронно-лучевым или цифровым осциллографом с делителем напряжения. Допускается использовать для измерения напряжения вольтметр, реагирующий на амплитудное значение напряжения, но градуируемый в действующих значениях синусоидальной кривой. В этом случае напряжение, показываемое прибором, должно быть умножено на $\sqrt{2}$.

Допускается вместо измерения тока ограничиваться контролем за его изменением в случае, когда определяющей величиной при испытании является амплитудное значение напряжения, и, аналогично, допускается вместо измерения напряжения ограничиваться контролем за его изменением в случае, когда определяющей величиной при испытании является первичный ток.

9.3 Испытание на радиопомехи - по 9.3 ПНСТ (*проект*) - 1.

9.4 Определение количественной утечки газа газонаполненных трансформаторов - по 9.4 ПНСТ (*проект*) - 1.

9.5 Измерение сопротивления вторичных обмоток постоянному току - по 9.5 ПНСТ (*проект*) - 1.

9.6 Испытание маслонаполненных трансформаторов на герметичность - по 9.6 ПНСТ (*проект*) - 1.

9.7 Испытания на устойчивость к воздействию климатических факторов внешней среды и механическим внешним воздействующим факторам - по 9.7 ПНСТ (*проект*) - 1.

9.8 Испытание на прочность при транспортировании - по 9.8 ПНСТ (*проект*) - 1.

9.9 Испытание упаковки на сбрасывание - по 9.9 ПНСТ (*проект*) - 1.

9.10 Испытание на внутреннее дуговое короткое замыкание трансформаторов - по 9.10 ПНСТ (*проект*) - 1.

9.11 Испытание на степень защиты оболочек - по 9.11 ПНСТ (*проект*) - 1.

9.12 Испытание газонаполненных трансформаторов повышенным давлением - по 9.12 ГОСТ Р -1.

9.13 Подтверждение средней наработки до отказа - по 9.13 ПНСТ (*проект*) - 1.

9.14 Испытание на нагрев

9.14.1 Трансформаторы испытывают по ГОСТ 8024 при наибольшем рабочем первичном токе.

9.14.2 Испытание проводят при нормальной температуре испытаний по ГОСТ 15150, если в стандартах на трансформаторы конкретных типов не предусмотрены иные условия.

9.14.3 При испытании трансформаторов, имеющих собственную первичную обмотку, ток к выводам первичной обмотки следует подводить проводами или шинами длиной не менее 1,5 м.

Трансформаторы, предназначенные для эксплуатации с конкретным типом провода или шины, допускается испытывать без учета температуры проводников, подводящих ток к первичной обмотке. В этом случае проводники, подводящие ток при испытании, должны соответствовать условиям их эксплуатации.

9.14.4 Шинные, втулочные, встроенные и разъемные трансформаторы испытывают в первичном токоведущем контуре, размеры которого должны быть установлены в стандартах на трансформаторы конкретных типов.

9.14.5 Трансформаторы с несколькими коэффициентами трансформации, получаемыми переключением секций первичной обмотки, испытывают при всех коэффициентах трансформации.

9.14.6 Вторичные обмотки трансформаторов при испытании должны быть замкнуты на номинальную нагрузку.

9.14.7 Значения превышения температур обмоток трансформаторов на частоту 60 Гц следует корректировать следующим образом:

а) для трансформаторов до 1000 А или для трансформаторов без собственной первичной обмотки на любые номинальные токи

$$\Delta T_{60} = 1{,}0\,\Delta T_{50}, \qquad (5)$$

где ΔT_{60} - превышение температуры, соответствующее частоте 60 Гц;

ΔT_{50} - превышение температуры, определенное опытным путем при частоте 50 Гц;

б) для трансформаторов с собственной первичной обмоткой на номинальные токи свыше 1000 А

$$\Delta T_{60} = 1{,}1\,\Delta T_{50}, \qquad (6)$$

9.15 Определение погрешностей

9.15.1 Проверка полярности и определение токовых и угловых погрешностей

9.15.1.1 Проверку полярности и определение токовых и угловых погрешностей

проводят на трансформаторах, подвергнутых размагничиванию. Методы размагничивания, проверка полярности и определение погрешностей - по ГОСТ 8.217.

Определение погрешностей проводят на каждой вторичной обмотке.

Если обмотке присвоено несколько классов точности и (или) несколько нагрузок, то при приемосдаточных испытаниях определение погрешностей допускается проводить только в высшем классе точности в условиях, согласованных с потребителем, а при других видах испытаний - во всех классах точности и при всех нагрузках, установленных в стандарте на данный трансформатор.

Методика измерения погрешностей трансформаторов тока с расширенным диапазоном рабочих токов приведена в приложении Г.

9.15.1.2 Погрешность испытуемой обмотки каскадных трансформаторов должна определяться при минимальном и максимальном значениях нагрузок, подключенных одновременно ко всем вторичным обмоткам.

9.15.1.3 При квалификационных, типовых испытаниях и в целях утверждения типа погрешности следует определять в первичном токоведущем контуре согласно рисунку 1.

Если возможности испытательной установки не позволяют обеспечить требуемые геометрические размеры. А и Б, то размеры А и Б могут быть уменьшены до 10 кратного расстояния от оси проводника с током до средней линии магнитопровода.

При приемосдаточных испытаниях допускается уменьшение размеров контура, если при квалификационных, типовых испытаниях или в целях утверждения типа установлено, что разница в значениях погрешностей, не превышает 25 % нормируемых значений

а *б*

Рисунок 1
1 - испытуемый трансформатор

9.15.1.4 Погрешности шинных, втулочных, встроенных и разъемных трансформаторов на номинальные токи свыше 2000 А при испытаниях приемосдаточных допускается определять с первичной обмоткой, состоящей из нескольких витков, и при

соответственно уменьшенном значении номинального тока (таким образом, чтобы значение номинальных ампервитков оставалось неизменным), если при квалификационных, типовых испытаниях или в целях утверждения типа установлено, что разница в значениях погрешностей, измеренных подобным образом и при условиях установки трансформатора согласно 9.15.1.3, не превышает 25 % нормируемых значений. Месторасположение витков первичной обмотки, должно быть указано в стандарте на трансформатор конкретного типа.

9.15.2 При необходимости проверки стабильности метрологических характеристик в качестве критерия успешности других испытаний, ее следует проводить непосредственным определением погрешностей или проверкой контрольных точек на ВАХ согласно 9.17. Значение допустимого изменения погрешностей или контрольных точек должно быть установлено в стандарте на трансформатор конкретного типа.

9.15.3 При приемосдаточных испытаниях погрешности допускается измерять при меньшем числе значений токов и нагрузок, чем указано в 6.7 (таблица 6), если это обосновано результатами квалификационных, типовых испытаний или в целях утверждения типа.

9.16 Проверка предельной кратности и коэффициента безопасности

9.16.1 Проверку предельной кратности и коэффициента безопасности следует проводить по схеме, приведенной на рисунке 2.

К элементам схемы предъявляют следующие требования:

а) коэффициенты трансформации трансформаторов ТТПО и ТТПИ должны быть такими, чтобы выполнялось условие, по формуле (7)

$$n_о n_{по} = n_и n_{пи}, \qquad (7)$$

где $n_о$- коэффициент трансформации ТТО;

$n_{по}$ - коэффициент трансформации ТТПО;

$n_и$ - коэффициент трансформации ТТИ;

$n_{пи}$ - коэффициент трансформации ТТПИ.

Если образцовый трансформатор имеет коэффициент трансформации, при котором выполняется условие $n_о = n_и n_{пи}$, то промежуточный трансформатор в его цепи может отсутствовать;

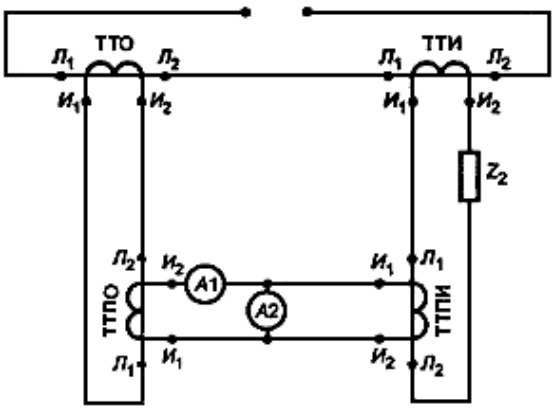


Рисунок 2

ТТО - образцовый трансформатор тока; ТТИ - испытуемый трансформатор тока; ТТПИ - промежуточный трансформатор тока, находящийся в цепи испытуемого трансформатора тока; ТТПО - промежуточный трансформатор тока, находящийся в цепи образцового трансформатора тока; А1- амперметр для измерения испытательного тока; А2 - амперметр для измерения тока погрешности; Z_2 - вторичная нагрузка в цепи испытуемого трансформатора тока.

б) амперметры А1и А2должны измерять действующие значения тока.

Амперметр А2 должен иметь малое внутреннее сопротивление.

Класс точности амперметров должен быть не ниже 1.

Класс точности промежуточных трансформаторов должен быть не ниже 0,5.

Образцовый трансформатор должен иметь:

– класс точности не ниже 0,5 или полную погрешность не более 0,5 % при испытании вторичной обмотки класса 5Р;

– класс точности не ниже 1 или полную погрешность не более 1 % при испытании вторичной обмотки класса 10Р;

в) значение нагрузки и ее коэффициент мощности должны быть выбраны так, чтобы полное сопротивление внешней вторичной цепи испытуемого трансформатора (включая сопротивление проводов и промежуточного трансформатора) и ее коэффициент мощности были равны заданным значениям (с точностью 5 %).

Через первичные обмотки ТТО и ТТИ пропускают ток частотой (50^{+1}_{-2}) Гц практически синусоидальной формы, значение которого соответствует предельной кратности или коэффициенту безопасности. Значение первичного тока измеряют амперметром А1.

Полную погрешность ε, %, определяют по формуле

$$\varepsilon = \frac{I_{A2}}{I_{A1}} \cdot 100 \ , \qquad (8)$$

где I_{A1} - ток по амперметру А1, А;

I_{A2} - ток по амперметру А2, А.

Не допускается определять ток погрешности как математическую разность испытательного тока и тока, измеренного испытуемым трансформатором. Предел измерения прибора, измеряющего ток погрешности (амперметра А2 или другого регистрирующего прибора) должен быть выбран таким образом, чтобы измеряемое значение тока погрешности было в средней части предела измерения.

9.16.2 Если испытательная установка и (или) нормируемая термическая стойкость испытуемого трансформатора ограничивает длительность протекания требуемого тока, необходимую для успокоения амперметров, допускается определять ток другим способом, например, осциллографированием.

Для трансформаторов с несколькими номинальными коэффициентами трансформации, получаемыми переключением секций первичной обмотки при неизменном значении номинальных ампервитков, полную погрешность допускается измерять при минимальном коэффициенте трансформации.

9.16.3 Трансформаторы следует испытывать в испытательном контуре согласно рисунку 1. При проверке предельной кратности размеры А и Б не должны быть превышены, а при проверке коэффициента безопасности должны быть не менее установленных значений.

Если возможности испытательной установки не позволяют обеспечить требуемые геометрические размеры А и Б, то размеры А и Б могут быть уменьшены до 10 кратного расстояния от оси проводника с током до средней линии магнитопровода.

9.16.4 Предельную кратность и коэффициент безопасности допускается проверять другим способом, который должен быть установлен в стандарте на трансформатор конкретного типов, если при испытаниях квалификационных, типовых или в целях утверждения типа доказано, что этот способ обеспечивает получение результатов, не отличающихся более чем на 10 %, например, путем измерения напряжения намагничивания по 9.17.

9.17. Определение напряжения намагничивания

9.17.1 Перед началом определения напряжения намагничивания трансформатор должен быть размагничен.

9.17.2 Для определения напряжения намагничивания, напряжение, приложенное ко вторичным выводам, плавно увеличивают до установления значения тока намагничивания, определяемого по формуле (1) в 6.7.5.1. При установившемся значении тока измеряют напряжение намагничивания $U_{нам}$ на выводах вторичной обмотки. Допускается не выполнять подъем напряжения до установившегося значения тока намагничивания, если измеренное напряжение намагничивания равно или больше расчетного.

9.17.3 Источник, должен обеспечивать синусоидальную форму напряжения во всем диапазоне измеряемых токов, включая и те участки кривой намагничивания, где, вследствие насыщения трансформатора тока, форма тока становится несинусоидальной. Для этого источник должен иметь достаточную мощность. Коэффициент амплитуды (отношение амплитудного значения к среднеквадратичному) напряжения источника при всех измерениях должен быть в пределах $\sqrt{2} \pm 5$ %.

9.17.4 Класс точности измерительных приборов не хуже 0,5. Прибор измерения тока должен обеспечивать правильность измерения на нелинейном участке ВАХ, вплоть до значения коэффициента амплитуды тока, равного 3. Прибор для измерения напряжения должен реагировать на средневыпрямленное значение; если прибор отградуирован в средневыпрямленных значениях, то показания прибора должны быть умножены на коэффициент 1,11.

9.17.5 Измерение напряжения выполняется непосредственно на выводах испытуемой вторичной обмотки при разомкнутых первичной обмотке и всех остальных выводах вторичных обмоток на данном сердечнике.

9.17.6 ВАХ определятся как совокупность значений напряжений намагничивания для ряда значений токов намагничивания и приводится в табличном или графическом виде с указанием контрольных точек. Предпочтительными являются значения токов 10, 20, 80, 100, 120 % от значения тока намагничивания, определяемого по формуле (1) в 6.7.5.1.

9.18 Испытание на стойкость к токам короткого замыкания

9.18.1 Испытание проводят при замкнутых накоротко вторичных обмотках и любом подходящем для опыта напряжении частотой (50^{+1}_{-5}) Гц пропусканием через

первичную обмотку следующих испытательных токов:

а) тока, наибольший пик которого должен быть (1,0-1,05) $i_д$, начальное действующее значение периодической составляющей которого не должно превышать (1,0-1,1)$I_Т$. Время протекания тока - 3-10 полупериодов.

Увеличение наибольшего пикового значения тока и/или начального значения периодической составляющей тока допускается с согласия изготовителя.

При испытании шинных, втулочных, встроенных и разъемных трансформаторов испытания по подпункту а) не проводят.

б) тока $I_{1исп}$, действующее значение которого в течение времени протекания $t_н$ должно быть таким, чтобы выполнялось соотношение

$$1{,}1 I_Т^2 t_К \geq I_{1ИСП}^2 t_И \geq I_Т^2 t_К \quad , \qquad (9)$$

Если при времени протекания испытательного тока $t_И$, соответствующем времени протекания тока термической стойкости $t_К$, в результате затухания периодической составляющей тока, соотношение (9) не выполняется, допускается увеличить время протекания тока, но не более 5 с.

При наличии технических возможностей испытания по перечислениям *а* и *б* могут быть совмещены.

Перед испытанием температура трансформатора должна быть (20±10) °С.

9.18.2 Испытание проводят в однофазном испытательном контуре. Размеры и конфигурация контура при испытании трансформаторов категорий размещения 2, 3, 4 и 5, а также расстояния от выводов первичной обмотки трансформатора до ближайших точек фиксации проводников контура должны соответствовать указанным в стандартах на трансформаторы конкретных типов.

Испытание шинных, втулочных, встроенных и разъемных трансформаторов допускается проводить при имитации их первичной обмотки несколькими первичными витками, располагаемыми равномерно относительно вторичных обмоток.

9.18.3 Трансформатор считают выдержавшим испытание, если:

а) не произошло повреждений, препятствующих его дальнейшей работе;

б) после охлаждения до температуры (20±10) °С трансформатор выдержал испытания по 2, 7, 29 таблицы 9;

в) погрешности вторичных обмоток, измеренные после размагничивания, соответствуют установленным классам точности и не изменились по сравнению с первоначальными более чем на половину значений, установленных для этих классов.

В стандартах на трансформаторы конкретных типов, у которых плотность односекундного тока термической стойкости превышает значения:

а) у трансформаторов на частоту 50 Гц:

– 160 А/мм^2 - для медных проводников;

– 105 А/мм^2 - для алюминиевых проводников;

б) у трансформаторов на частоту 60 Гц:

– 154 А/мм^2 - для медных проводников;

– 101 А/мм^2 - для алюминиевых проводников

должны быть установлены дополнительные критерии, подтверждающие, что трансформатор выдержал испытания на стойкость к токам короткого замыкания.

10 Транспортирование и хранение

В соответствии с разделом 10 ПНСТ (*проект*) - 1

11 Указания по эксплуатации

В соответствии с разделом 11 ПНСТ (*проект*) - 1

12 Гарантии изготовителя

В соответствии с разделом 12 ПНСТ (*проект*) - 1

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Методы испытаний трансформаторов тока для защиты с малой остаточной намагниченностью, а также предназначенных для работы в условиях переходного режима короткого замыкания.

А.1. Определяемые характеристики:

– коэффициент остаточной намагниченности K_r;

– индуктивность намагничивания вторичной обмотки L_m;

– постоянная времени вторичного контура при номинальной нагрузке T_s;

– мгновенная погрешность в переходном режиме ε_{max} для трансформаторов класса TPY;

– периодическая составляющая погрешности переходного режима $\varepsilon_{ac\,max}$ для трансформаторов класса TPZ.

Непосредственно перед измерением характеристик обмотки трансформаторов тока должны быть размагничены.

Допускается проверять характеристики другими способами, которые должны быть установлены в стандартах на трансформаторы конкретных типов, если при испытаниях квалификационных, типовых или в целях утверждения типа доказано, что этот способ обеспечивает получение результатов, не отличающихся более чем на 10 %.

А.1.1. Определение коэффициента остаточной намагниченности K_r.

Определение коэффициента остаточной намагниченности K_r выполняется методом разряда конденсатора на вторичную обмотку трансформатора тока при разомкнутой первичной обмотке.

Схема проведения испытаний приведена на рисунке А.1.

Параметры контура подбираются таким образом, чтобы частота колебательного процесса в контуре L – C отличалась от номинальной частоты не более чем на ±10 %.

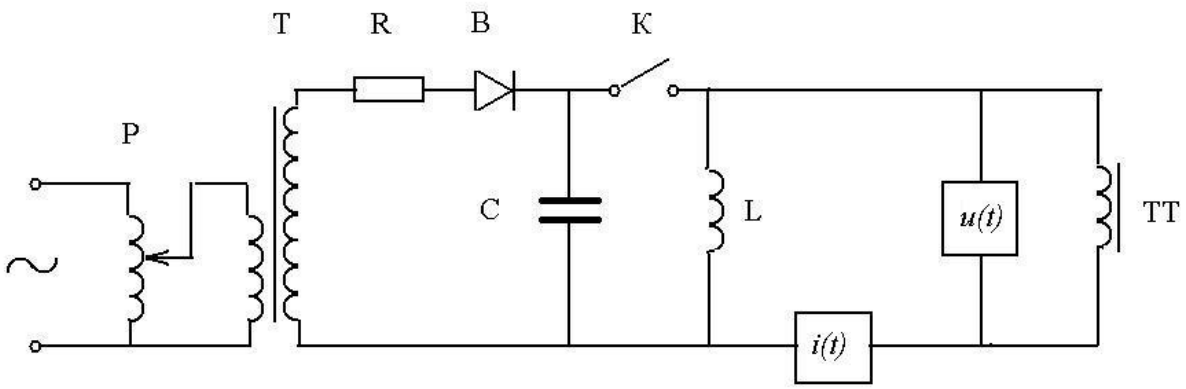


Рисунок А.1. Схема определения остаточной намагниченности методом разряда конденсатора.

Р – регулятор напряжения; Т – зарядный трансформатор; R – зарядный резистор; С – конденсатор; L – регулировочная (разрядная) индуктивность; ТТ – испытуемый трансформатор тока; u(t), i(t) – устройства регистрации тока и напряжения, В- выпрямитель, К- коммутирующее устройство (ключ).

Конденсатор С заряжается от зарядного трансформатора Т до значения напряжения, необходимого для насыщения испытуемого трансформатора тока ТТ. После чего замыкается ключ К и конденсатор С разряжается на включенные параллельно вторичную обмотку испытуемого трансформатора тока ТТ и разрядную индуктивность L (может отсутствовать). Значения тока через вторичную обмотку i(t) и падение напряжения на ее выводах u(t) регистрируются цифровым осциллографом.

Для получения правильного значения коэффициента остаточной намагниченности K_r, необходимо обеспечить достижение полностью насыщенного состояния трансформатора перед тем, как ток начнет уменьшаться до нуля. Критерием достаточности насыщения служит форма первой полуволны тока, от начала приложения напряжения до первого перехода тока через нуль см. рисунок А.2. На ней можно выделить характерный пик, свидетельствующий о наступлении насыщения. Степень насыщения считается достаточной, если коэффициент амплитуды этой полуволны (отношение амплитудного значения к среднеквадратичному) не менее 2,5.

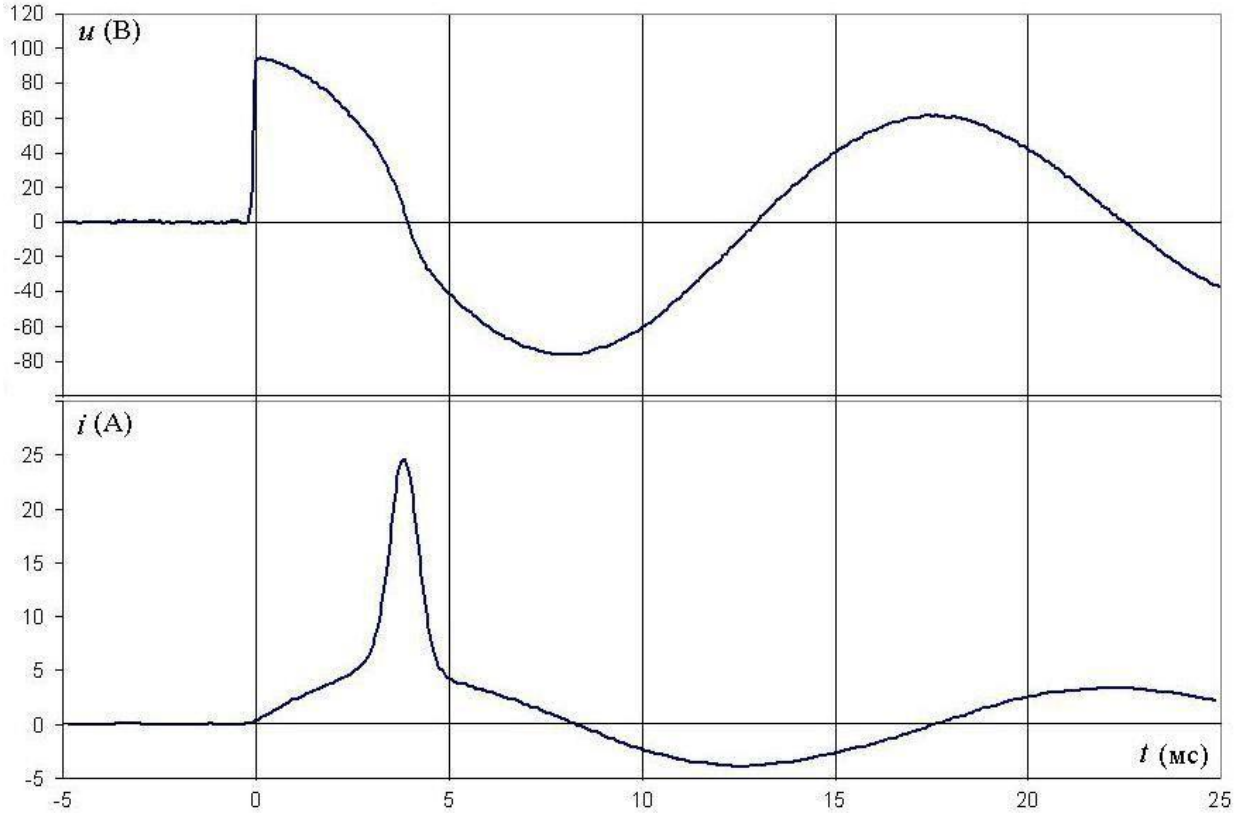


Рисунок А.2. Характерная осциллограмма по методу разряда конденсатора.

Потокосцепление вычисляется по формуле:

$$\Psi(t) = \int_0^t \left[u(t) - R_2 i(t)\right] dt, \qquad (A.1)$$

R_2 – сопротивление вторичной обмотки постоянному току.

u(t) и *i(t)* – мгновенные значения напряжения и тока, осциллографируемые в опыте.

Зависимость потокосцепления $\Psi(t)$, определенного по формуле А.1 от тока $i(t)$ графически представляет собой часть петли гистерезиса (рисунок А.3). Значение остаточного потокосцепления Ψ_r отсчитывается в момент, когда, после достижения потокосцеплением значения насыщения Ψ_{sat}, ток становится равным нулю. Ψ_{sat} определятся при максимальном мгновенном значении тока.

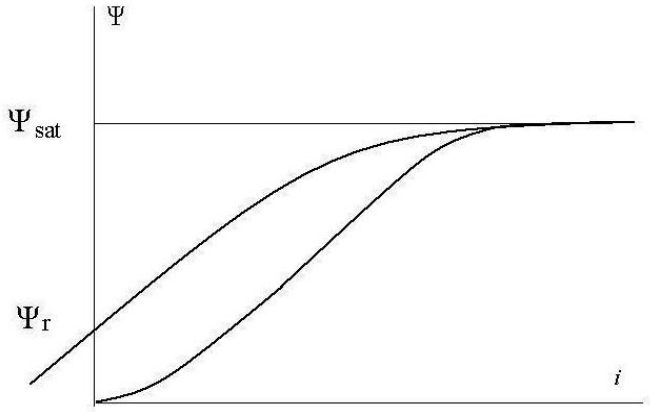


Рисунок А.3. Часть петли гистерезиса, воспроизводимая методом разряда конденсатора

Коэффициент остаточной намагниченности определяется как:

$$K_r = \frac{\Psi_r}{\Psi_{sat}} 100\ \%, \qquad (A.2.)$$

А.1.2. Определение индуктивности намагничивания L_m и постоянной времени T_S.

Индуктивность намагничивания L_m определяется как отношение $\Delta\Psi$ к Δi на участке кривой намагничивания, который, с достаточной степенью приближения, можно считать линейным (рисунок А.4.)

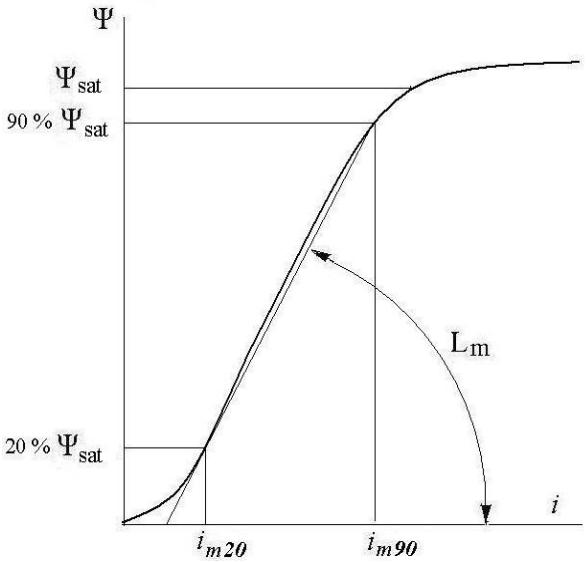


Рисунок А.4. Определение индуктивности намагничивания

В качестве границ этого участка принимаются значения 20 % и 90 % от потокосцепления Ψ_{sat}, соответствующего напряжению намагничивания $U_{нам.расч.}$, определенного по 9.17.

Индуктивность намагничивания принимается равной:

$$L_m = \frac{0{,}9 \cdot \Psi_{sat} - 0{,}2 \cdot \Psi_{sat}}{i_{m\max 90} - i_{m\max 20}} = \frac{0{,}9 \cdot U_{нам.расч.} - 0{,}2 \cdot U_{нам.расч.}}{\omega \cdot (I_{m90} - I_{m20})}, \qquad (A.3)$$

где I_{m90} и I_{m20} –действующие значения токов, измеренных при напряжениях, равных 90 % и 20 % от напряжения $U_{нам.расч.}$, соответственно; $i_{m\ max\ 90}$ и $i_{m\ max20}$ – их амплитудные значения.

Постоянная времени вторичного контура определяется как отношение индуктивности намагничивания к активному сопротивлению вторичного контура:

$$T_S = \frac{L_m}{R_S}, \qquad (A.4.)$$

где:

- L_m - индуктивность намагничивания, рассчитанная по формуле (А.3), Гн;

- R_s - сопротивления вторичного контура постоянному току;

$$R_S = R_2 + Z_{2ном} \qquad (A.5)$$

R_2 - сопротивление вторичной обмотки постоянному току, приведенное к температуре, при которой измеряют токи намагничивания, Ом;

А.2 Определение погрешности в переходном режиме короткого замыкания

Принципиальная схема испытаний и измерений – в соответствии с 9.16 настоящего стандарта. Конкретная реализация схемы зависит от испытательных возможностей испытательной лаборатории. Допускается вместо эталонных и промежуточных трансформаторов тока использовать измерительные шунты, цифровую измерительную и регистрирующую аппаратуру.

Через первичную обмотку пропускается ток промышленной частоты. К вторичной обмотке должна быть подключена номинальная нагрузка. Действующее значение периодической составляющей испытательного первичного тока должно быть в пределах:

$$I_{1исп} = (1{,}0 \div 1{,}05) \cdot I_{1ном} \cdot K_{ном}. \qquad (A.6)$$

Регистрируется мгновенная величина тока погрешности:

$$i_{\varepsilon} = n_{ном} \cdot i_2 - i_1, \qquad (A.7)$$

Абсолютная погрешность измерения тока погрешности не должна превышать 10 % предела допустимой погрешности, соответствующего классу испытуемого трансформатора.

Выполняются два испытательных режима:

А.2.1. Током короткого замыкания, соответствующим значению предельной кратности, при отсутствии апериодической составляющей, для сравнения измеренного значения полной погрешности с рассчитанным по формуле (А.9) значением. Длительность протекания тока выбирается такой, чтобы, по возможности, затухли все переходные процессы, не устраненные настройкой испытательного оборудования, но не менее 0,5 с и не более допустимого времени протекания тока термической стойкости. Полная погрешность определяется как среднеквадратичное значение I_ε мгновенной погрешности тока $i_\varepsilon(t)$, отнесенное к действующему значению периодической составляющей испытательного первичного тока $I_{1исп}$.

Проверяется выполнение соотношений:

$$\varepsilon\% = \frac{I_\varepsilon}{I_{1исп}} \cdot 100 \le \varepsilon \text{ \% по таблице 7;} \qquad (А.8)$$

$$\varepsilon = \frac{I_\varepsilon}{I_{1исп}} \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_s}, \qquad (А.9)$$

где f – частота испытательного тока.

А.2.2. Нормированный цикл с максимальным содержанием апериодической составляющей. Апериодическая составляющая должна быть максимальной, а для трансформаторов тока, предназначенных для работы в условиях АПВ – одной и той же полярности в обоих интервалах времени протекания тока. Под максимальной апериодической составляющей тока имеется в виду такая апериодическая составляющая, начальное значение которой равно амплитудному значению периодической составляющей тока.

Периодическая составляющая испытательного тока равна току предельной кратности. Постоянная времени затухания апериодической составляющей испытательного тока не должна отличаться от нормированного значения более чем на ±5 %.

Первый пик тока, в обоих периодах протекания тока, должен быть не меньше

$$i_{\varepsilon\,max} = I_{1\,max} \cdot K_{TP} \cdot \left(e^{\frac{t}{T_{пр}}} - 1\right), \qquad (A.10.)$$

Максимальное значение мгновенной погрешности не должно превышать нормированного значения, указанного в таблице 7.

$$\varepsilon_{max} = \frac{i_{\varepsilon\,max}}{\sqrt{2}\, I_{1\,исп}} \cdot 10^{2}, \qquad (A.11.)$$

А.2.2.1. Измеряются значения тока погрешности, показанные на рисунке А.5

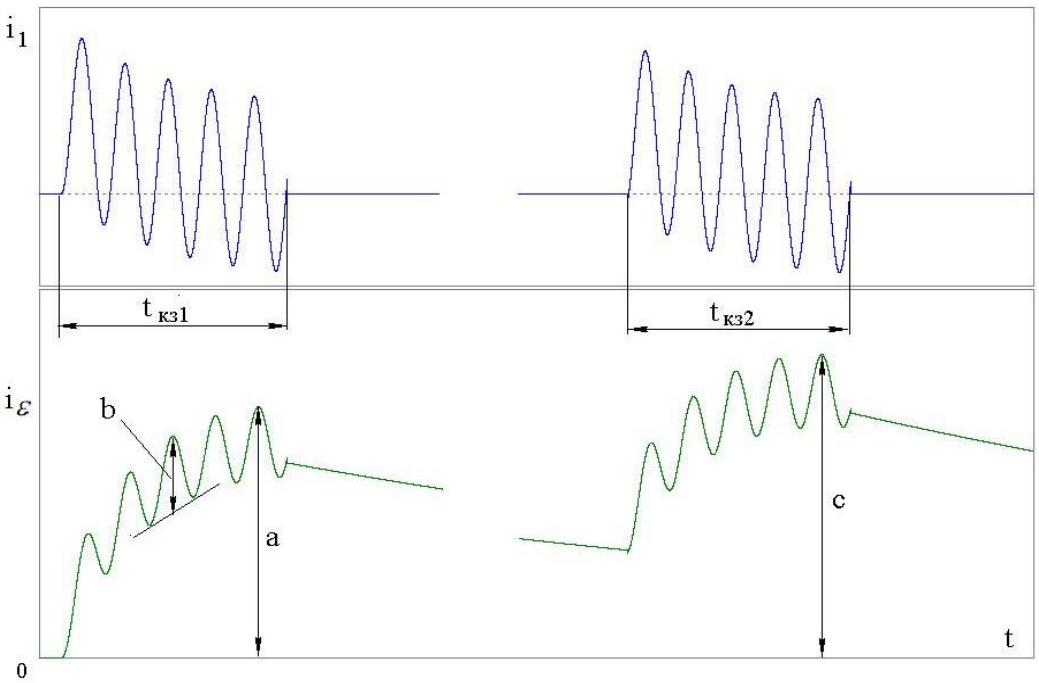


Рисунок А.5. Измеряемые значения тока погрешности

a – для трансформатора класса TPY, не предназначенного для АПВ;

b – для трансформатора класса TPZ; c – для трансформатора класса TPY, предназначенного для АПВ.

Для трансформаторов класса TPY максимальное значение мгновенной погрешности определяется выражением:

$$\varepsilon_{max} = \frac{i_{\varepsilon\,max}}{\sqrt{2}\, I_{1\,исп}} \cdot 10^{2}, \qquad (A.12.)$$

где $i_{\varepsilon\,max}$ = a или $i_{\varepsilon\,max}$ = c, в зависимости от нормированного цикла.

Для трансформаторов класса TPZ периодическая составляющая погрешности переходного режима определяется как:

$$\varepsilon_{max} = \frac{i_{max}}{I_{ucn}\sqrt{2}} \qquad \text{(A.13.)}$$

где $i_{\varepsilon ac\,max}$ = b/2.

Полученные значения не должны превышать значений, указанных в таблице 7.

А.2.3. Если требования пункта А.2.2. выполняются, а требования по точности измерения тока погрешности, или отсутствия апериодической составляющей первичного тока, при выполнении испытания по пункту А.2.1., не удается выполнить, то допускается проверку по пункту А.2.1. заменить определением постоянной времени вторичного контура T_s по осциллограмме опыта по пункту А.2.2. Для этого на интервале времени, соответствующем бестоковой паузе $t_{бт}$, (а для трансформаторов, для которых не нормируется цикл АПВ – после окончания протекания тока в первичной цепи), выбираются два момента времени t_1 и t_2, измеряются мгновенные значения тока погрешности i_1 и i_2, соответствующие этим моментам времени. Значение постоянной времени определяется как:

$$T_S = \frac{t_2 - t_1}{\ln\frac{i_1}{i_2}} \qquad \text{(A.14.)}$$

Полученное значение не должно отличаться от значения по пункту А.1.2. более, чем на 10 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Краткие сведения по работе трансформаторов тока в переходных режимах короткого замыкания

Б1. Схема замещения трансформатора тока и основные воздействующие факторы.

Схема замещения трансформатора тока приведена на рисунке Б.1. В этой схеме приняты следующие допущения: пренебрегается активными потерями в стали сердечника трансформатора и индуктивностью рассеяния первичной обмотки.

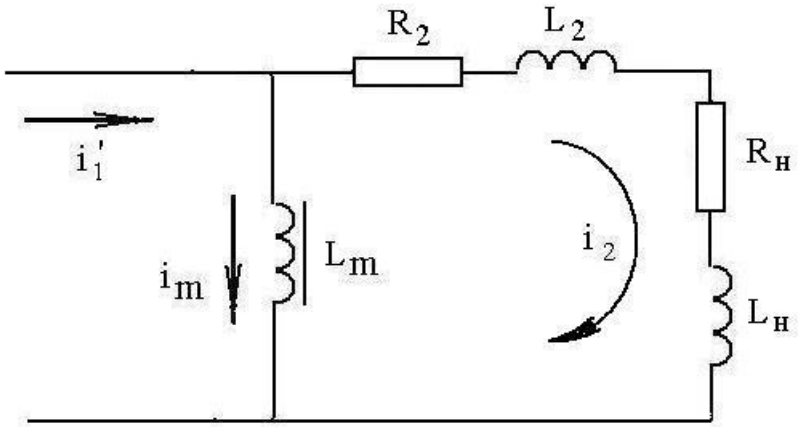


Рисунок Б.1. Расчетная схема.

i_1' – приведенный ко вторичной обмотке первичный ток i_1 ($i_1' = i_1/n_{ном}$, где $n_{ном}$ – коэффициент трансформации); i_m – ток намагничивания, являющийся также и током погрешности $i_\varepsilon = i_m$; i_2 – ток вторичной цепи; L_m – индуктивность намагничивания вторичной обмотки на том участке кривой намагничивания магнитопровода, который можно считать линейным (до начала насыщения); R_2 – сопротивление вторичной обмотки постоянному току; L_2 – индуктивность рассеяния вторичной обмотки; $R_н$ – сопротивление нагрузки постоянному току; $L_н$ – индуктивность нагрузки.

Поведение трансформатора тока в переходном режиме определяется постоянной времени вторичного контура, образуемого индуктивностью вторичного контура, и суммарным активным сопротивлением контура:

$$T_S = \frac{L_S}{R_S} \qquad (Б.1)$$

где:

- L_S - суммарная индуктивность вторичного контура;

$$L_s = L_m + L_2 + L_н \qquad (Б.2)$$

- L_m – в соответствии с А1.2;

- L_2 – индуктивность рассеяния вторичной обмотки (в большинстве случаев ею можно пренебречь);

- $L_н$ – индуктивность нагрузки.

- R_S – фактическое суммарное сопротивление вторичного контура постоянному току:

$$R_s = R_2 + R_н \ . \qquad (Б.3)$$

Относительно тока в первичной цепи в переходном режиме приняты следующие допущения:

- отсутствуют составляющие второй и последующих гармоник;

- не учитывается изменение амплитуды периодической составляющей тока (первой гармоники) в ходе переходного процесса (например, действием АРВ генераторов и вследствие электромеханических переходных процессов).

Ток в первичной цепи в переходном режиме характеризуется, кроме эффективного значения периодической составляющей, наличием апериодической составляющей (на рисунке Б.2 ток переходного режима изображен в относительных единицах, считая за единицу амплитуду периодической составляющей тока).

Количественно характеристики апериодической составляющей определяются двумя параметрами: фазой периодической (синусоидальной) составляющей тока в момент его возникновения $\varphi_{нач}$ и постоянной времени затухания апериодической составляющей тока T_P в сети, в которую включена первичная обмотка трансформатора.

$$i_1^{'}(t) = \frac{I_1 \cdot \sqrt{2}}{n_{ном}} \{ e^{-\frac{t}{T_P}} \sin\varphi_{нач} - \sin(\omega \cdot t + \varphi_{нач}) \} . \qquad (Б.4)$$

где ω – угловая частота, соответствующая номинальной частоте напряжения сети $f_{ном}$:

$$\omega = 2\pi f_{ном} \ . \qquad (Б.5)$$

Для целей разработки и производства трансформаторов тока, наиболее удовлетворяющих требованиям работы в переходных режимах короткого замыкания, рассматривается, в качестве наиболее тяжелого случая, ток первичной обмотки с максимальным содержанием апериодической составляющей. Под максимальной апериодической составляющей тока имеется в виду такая апериодическая составляющая, начальное значение которой равно амплитудному значению периодической составляющей тока.

Для этого случая выражение для тока будет следующим:

$$i_1^{'}(t) = \frac{I_1 \cdot \sqrt{2}}{n_{ном}} \{ e^{-\frac{t}{T_p}} - \cos(\omega \cdot t) \}, \qquad (Б.6)$$

где I_1 – действующее значение периодической составляющей первичного тока;

t – текущее время;

Примечание:

В общем случае, в первичном токе может содержаться несколько составляющих тока с разными постоянными времени затухания апериодических составляющих. В таких случаях можно применить принцип наложения, вычисляя соответствующие составляющие магнитного потока от каждой составляющей тока и определяя результат как сумму составляющих, либо использовать эквивалентную постоянную времени, например, в соответствии с выражением:

$$T_{Р.Э} = \frac{\sum_{k=1}^{n} I_{Н.k} \cdot T_{Р.k}}{\sum_{k=1}^{n} I_{Н.k}},$$

где $T_{Р.Э}$ – эквивалентная постоянная времени,

$I_{Н.k}$ – начальное значение k-й апериодической составляющей тока,

$T_{Р.k}$ – значение k-й постоянной времени,

n – число составляющих.

Продолжительность переходного процесса определяется постоянной времени затухания апериодической составляющей тока первичной обмотки.

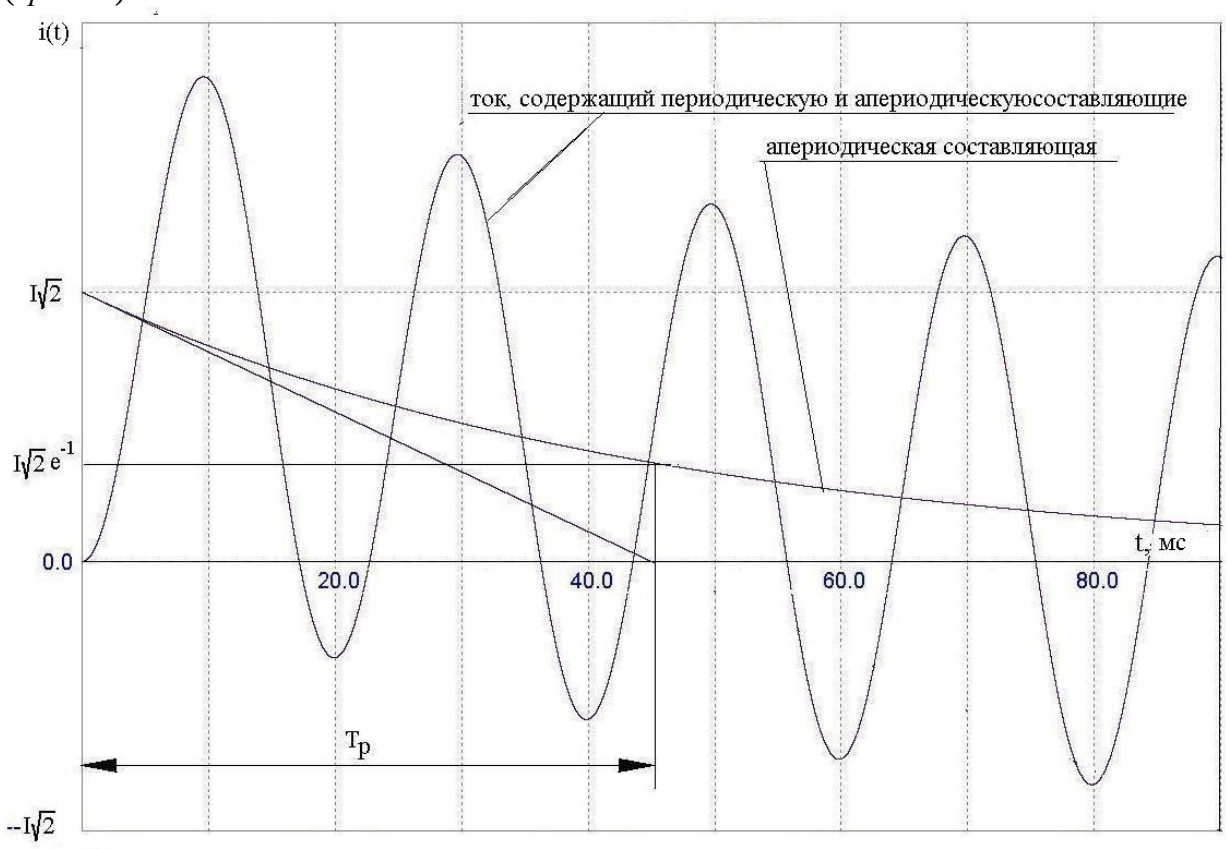


Рисунок Б.2. Ток при коротком замыкании в сети.

Графически постоянная времени затухания апериодической составляющей первичного тока представляет собой отрезок оси времени, отсекаемый касательной к апериодической составляющей, или время уменьшения начального значения апериодической составляющей в е раз, где е – основание натурального логарифма. Сведения о численных значениях постоянной времени затухания апериодической составляющей первичного тока при различных случаях коротких замыканий приведены в ГОСТ Р 52735. Номинальное значение постоянной времени затухания апериодической составляющей первичного тока указывается в стандартах на конкретные типы трансформаторов и в эксплуатационной документации.

Б.2. Выражения для потокосцепления и тока погрешности

Процессы в схеме на рисунке Б.1 описываются уравнением:

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{(L_2 + L_i)}{L_S} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{i - i_m}{T_S}, \qquad (Б.7)$$

Учитывая, что индуктивность ветви вторичного тока, в большинстве случаев, много меньше индуктивности намагничивания, то есть, $L_2+L_н << L_S$, можно пренебречь, для упрощения, первым членом в правой части уравнения, и рассматривать уравнения для тока намагничивания и потокосцепления магнитопровода в следующем виде:

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{R_S}{L_m}(i - i_m) = \frac{i - i_m}{T_S} \qquad (Б.8)$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = R_S \cdot (i - i_m) \qquad (Б.9)$$

Для установившегося режима первичного тока решениями будут:

$$i_m(t) = I_{m.max} \sin\omega t, \qquad (Б.10)$$

$$\Psi(t) = \Psi_{max} \sin\omega t, \qquad (Б.11)$$

где $I_{m.max} = \dfrac{I_1 \cdot \sqrt{2}}{n_{\text{нн}} \cdot \omega \cdot T_S}$, (Б.12)

$$\Psi_{max} = \frac{I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot R_S}{n_{\text{нн}} \cdot \omega}. \qquad (Б.13)$$

Для переходного режима удобно выразить решение в безразмерной форме в виде переходного коэффициента, приняв за базовые значения амплитудные значения установившегося режима. Безразмерная функция времени будет одинаковой и для тока погрешности и для потокосцепления:

$$K_{п.р}(t) = \frac{i_m(t)}{I_{m.max}} = \frac{\Psi(t)}{\Psi_{max}}, \qquad (Б.14)$$

Полное решение для $K_{п.р}$ (t) составит:

$$K_{п.р}(t) = \frac{\omega \cdot T_P \cdot T_S}{T_P - T_S}\left(e^{-\frac{t}{T_P}} - e^{-\frac{t}{T_S}}\right) + \frac{\omega \cdot T_S}{1 + (\omega \cdot T_S)^2}\left\{e^{-\frac{t}{T_S}} - \sqrt{1 + (\omega \cdot T_S)^2}\sin\left(\omega \cdot t + \operatorname{arctg}\frac{1}{\omega \cdot T_S}\right)\right\} \qquad (Б.15)$$

П р и м е ч а н и е - Начальные условия считаются нулевыми, т.е. пренебрегается остаточной намагниченностью, зависящей от предыстории, так как к трансформаторам тока, предназначенным для работы в условиях переходного режима короткого замыкания, предъявляются специальные требования по ограничению остаточной намагниченности.

После упрощений, связанных с тем, что, как правило, $\omega \cdot T_S >> 1$, выражение принимает вид:

$$K_{п.р}(t) = \frac{\omega \cdot T_P \cdot T_S}{T_P - T_S}\left(e^{-\frac{t}{T_P}} - e^{-\frac{t}{T_S}}\right) - \sin(\omega \cdot t) \qquad (Б.16)$$

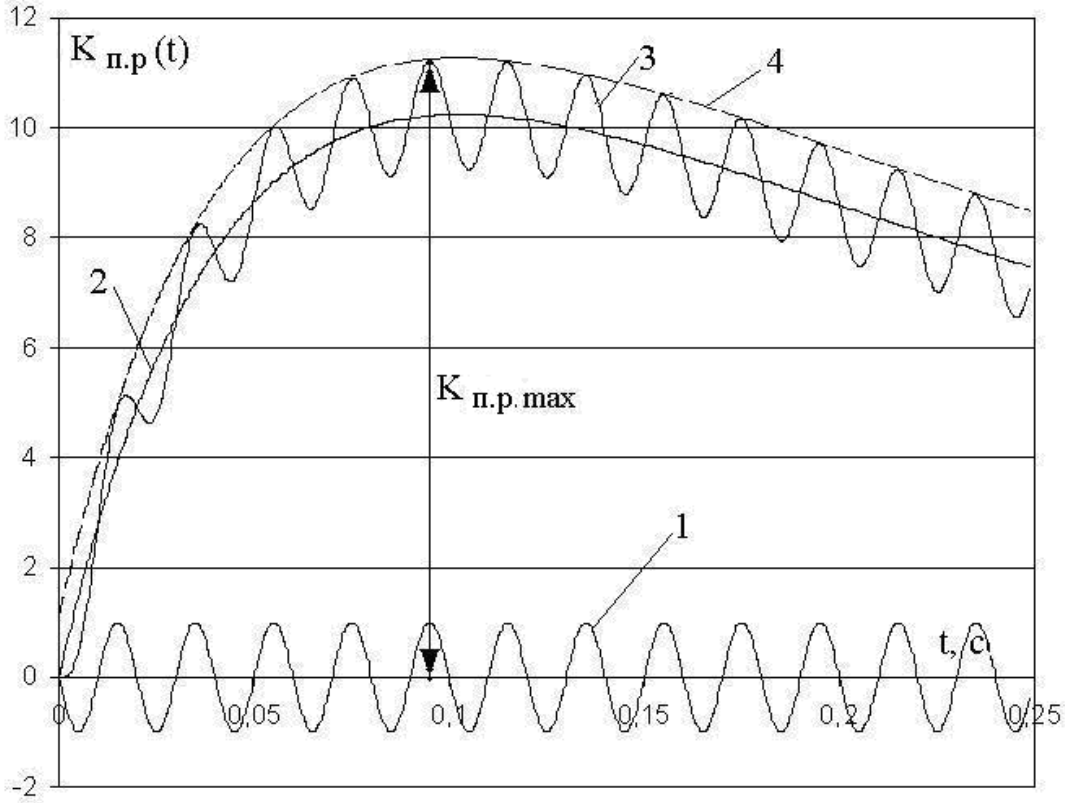


Рисунок Б.3. Пример изменения потокосцепления во времени

Кривая 1 – периодическая составляющая потокосцепления; 2 – апериодическая составляющая потокосцепления; 3 – результирующее потокосцепление переходного режима КЗ; 4 – огибающая.

В приведенном примере T_P = 45 мс, T_S = 318 мс. Значение T_S соответствует полной погрешности трансформатора, равной 1 % при периодическом токе. Мгновенное значение погрешности переходного режима, в каждый момент времени, принимает значение большее, по сравнению с амплитудой полной погрешности установившегося режима, в $K_{п.р}(t)$ раз и максимум мгновенной погрешности соответствует $K_{п.pmax}$.

Для упрощения определения максимального значения $K_{п.pmax}$ можно принять его равным максимуму огибающей линии к линии $K_{п.р}(t)$. Выражение для огибающей:

$$K_{п.р.огиб}(t) = \frac{\omega \cdot T_P \cdot T_S}{T_P - T_S}\left(e^{-\frac{t}{T_P}} - e^{-\frac{t}{T_S}}\right) + 1, \qquad (Б.17)$$

Момент наступления максимума огибающей равен:

$$t_{max} = \frac{T_P \cdot T_S}{T_P - T_S} \ln \frac{T_P}{T_S}, \qquad (Б.18)$$

и значение максимума определяется по выражению (Б.17) подстановкой (Б.18). После преобразований:

$$K_{п.р.max} = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s}\left[\left(\frac{T_s}{T_p}\right)^{\frac{T_p}{T_s - T_p}} - \left(\frac{T_s}{T_p}\right)^{\frac{T_s}{T_s - T_p}}\right] - 1. \qquad (Б.19)$$

Фактически, коэффициент $K_{п.р}(t)$ показывает, во сколько раз апериодическая составляющая тока короткого замыкания увеличивает потокосцепление по сравнению с тем, какой был бы при периодическом токе при той же нагрузке. В номинальных данных трансформатора есть коэффициент $K_{п.р.ном}$, который характеризует точку на вольтамперной характеристике трансформатора, до которой изготовитель должен обеспечить отсутствие насыщения при всех прочих параметрах, равных номинальным. Условием отсутствия насыщения трансформатора в эксплуатации, при конкретных параметрах нагрузки и первичной сети, которые могут отличаться от номинальных, является:

$$\frac{A K_{п.р.ном}}{K_{п.р.max}} \geq 1, \qquad (Б.20)$$

где A – коэффициент, учитывающий соотношение между номинальными параметрами трансформатора тока и реальными параметрами в месте его установки:

$$A = \frac{I_{1ном} \cdot K_{ном} \cdot \sqrt{(R_2 + R_{н.ном})^2 + (Z_{н.ном} \cdot \sin\varphi_{н.ном})^2}}{I_{кз} \cdot \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + \omega^2 \cdot (L_2 + L_{н.факт})^2}}, \qquad (Б.21)$$

где $I_{кз}$ – реальное значение периодической составляющей тока первичной обмотки при коротком замыкании;

$R_{н.ном}$ и $R_{н.факт}$ - номинальное и фактическое сопротивление нагрузки постоянному току;

$Z_{н.ном} \cdot \sin\varphi_{н.ном}$ и $L_{н.факт}$ – номинальная и фактическая индуктивные составляющие сопротивления нагрузки;

R_2 – сопротивление вторичной обмотки постоянному току;

L_2 – индуктивность рассеяния вторичной обмотки (если ею нельзя пренебречь).

В тех случаях, когда это условие (Б.20) не удается выполнить, потребителю важно знать время до насыщения. Оно определяется из уравнения:

$$K_{пр.max} = A K_{п.р.огиб}(t), \qquad (Б.22)$$

Ввиду трансцендентности выражения (Б.17) для $K_{п.р.огиб}(t)$, точное решение уравнения может быть найдено численными методами, например, методом

последовательных приближений. Для приближенной оценки времени до насыщения ($t_{нас}$) может быть применено упрощенное выражение:

$$t_{нас} = T \cdot \ln \frac{\omega \cdot T}{\omega \cdot T - A \cdot K_{п.р.ном} + 1}, \qquad (Б.23)$$

где T – наименьшее из двух значений постоянных времени T_p и T_s.

Выражение (Б.23) имеет решение при условии соблюдения двух неравенств:

$$\omega \cdot T + 1 > A \cdot K_{ï.ð.îì} \quad , \qquad (Б.24)$$

$$A \cdot K_{ï.ð.îì} > 1, \qquad (Б.25)$$

При подстановке реальных значений, они могут не всегда быть удовлетворены. Невыполнение первого неравенства (Б.24) имеет тот физический смысл, что точка пересечения кривой изменения потокосцепления с уровнем насыщения отсутствует, то есть насыщения не наступает и, соответственно, не существует и время насыщения.

При невыполнении второго неравенства (Б.25), точка пересечения уровня насыщения с огибающей кривой изменения потокосцепления находится в отрицательной области оси времени, так как уровень насыщения меньше, чем амплитуда периодической составляющей потокосцепления. В этом случае A<1, и сердечник трансформатора будет насыщаться знакопеременно на каждый полупериод тока промышленной частоты. Использование трансформатора тока в таких условиях не допустимо т.к, ток предельной кратности меньше действующего тока короткого замыкания.

Выражение (Б.23) дает несколько меньшее значение времени до насыщения, чем точное решение уравнения (Б.22), что гарантированно обеспечивает отсутствие насыщения трансформатора тока до этого времени. Если требуется более точная оценка, следует применять другие, например, численные, методы для решения уравнений (Б.8) и (Б.9).

Б.3. Работа в циклах АПВ

Для трансформаторов тока, предназначенных для установки в тех точках сетей, где возможно применение при коротких замыканиях автоматического повторного включения (АПВ), нормируется стандартный цикл, состоящий из двух коротких замыканий и бестоковой паузы между ними (рисунок Б.4). В качестве наиболее тяжелых условий рассматриваются такие, когда, в обоих коротких замыканиях, апериодическая составляющая имеет наибольшее значение и одну и ту же полярность. При этих условиях, трансформатор считается удовлетворяющим нормированным требованиям, если он выдерживает показатели, характеризующие класс точности, при всех

длительностях коротких замыканий, не превышающих нормированных значений $t_{кз1}$ и $t_{кз2}$ и при длительности бестоковой паузы, не меньшей нормированного значения $t_{бт}$.

Весь промежуток времени работы трансформатора, в этом случае, состоит из нескольких интервалов. Каждый из интервалов времени может рассматриваться по отдельности, но с учетом начальных условий, созданных в результате процесса во время предыдущего интервала.

Выражение (Б.15), в котором начальные условия предполагались нулевыми, что справедливо для интервала $t_{КЗ1}$, а для интервала времени $t_{кз2}$, принимает вид:

$$K_{п.р}(t) = K_{п.р}(t_{нач}) + \frac{\omega \cdot T_P \cdot T_S}{T_P - T_S}\left(e^{-\frac{t-t_{нач}}{T_P}} - e^{-\frac{t-t_{нач}}{T_S}}\right) - \sin[\omega \cdot (t - t_{нач})], \qquad (Б.26)$$

где $K_{п.р}(t_{нач})$ – начальное значение;

$t_{нач}$ – момент начала протекания тока при очередном коротком замыкании в цикле АПВ.

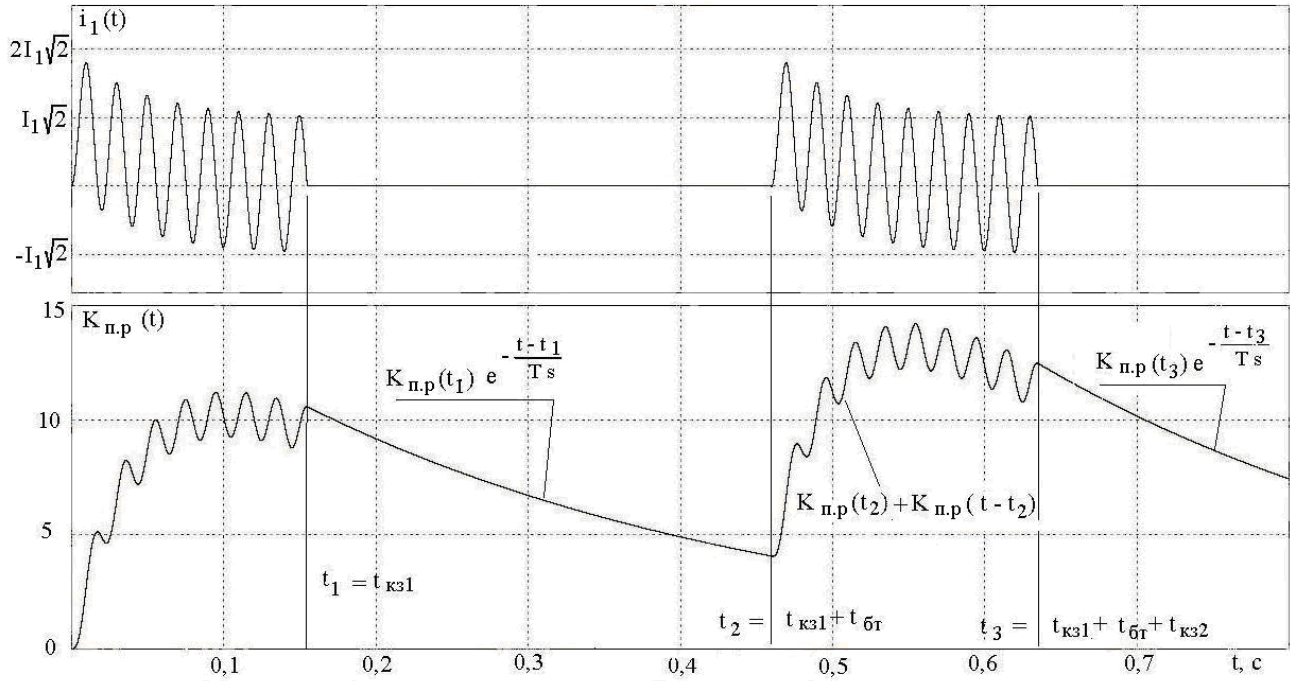


Рисунок Б.4. Работа трансформатора тока в цикле АПВ

Для первого интервала времени $t_{кз1}$ в цикле АПВ, также, как и при одиночном коротком замыкании, $K_{п.р}(0) = 0$. Для второго короткого замыкания в цикле АПВ, начальный момент времени $t_{нач} = t_{кз1} + t_{бт}$, $K_{п.р}(t_{нач})$ равен тому значению, которым закончилась бестоковая пауза.

Во время бестоковой паузы $K_{п.р}(t)$ изменяется (затухает) по экспоненциальному закону начиная от такого значения, какое он имел в момент прекращения тока, с постоянной времени вторичного контура, причем отсчет времени идет от начала бестоковой паузы.

$$K_{п.р}(t) = K_{п.р}(t_{кз1}) \cdot e^{-\frac{t-t_{кз1}}{T_S}}, \qquad (Б.27)$$

Б.4. Выражения для определения погрешностей.

Для трансформаторов класса TPY нормируется наибольшее значение мгновенной погрешности в переходном режиме, которое составит:

$$\varepsilon_{max} = \frac{K_{п.р.max}}{\omega \cdot T_s} \cdot 100\%, \qquad (Б.28)$$

где $K_{п.р\ max}$ – максимальное значение $K_{п.р}(t)$ во всем интервале времени.

Для трансформаторов класса TPZ нормируется периодическая составляющая погрешности выражающаяся как:

$$\varepsilon_{amax} = \frac{1}{\omega T_s} \cdot 100, \qquad (Б.29)$$

Полученные значения не должны превышать значений, указанных в таблице 7.

Выражения (Б.28) и (Б.29) справедливы только при отсутствии насыщения магнитопровода трансформатора.

Б.5. Работа при достижении уровня насыщения.

Положение о равенстве $K_{п.р}(t)$ для тока погрешности и для потокосцепления (Б.16) справедливо только на участке кривой намагничивания (вольтамперной характеристики), которую можно считать линейной, т.е. от нуля до начала участка насыщения. При достижении уровня насыщения, характер их изменения становится различным. Если насыщение ограничивает рост потокосцепления, то ток погрешности (ток намагничивания) резко возрастает. На рисунке Б.5 приведен тот же пример, что на рисунке Б.4, но с заданным уровнем насыщения, соответствующим $K_{п.р}(t) = 9$.

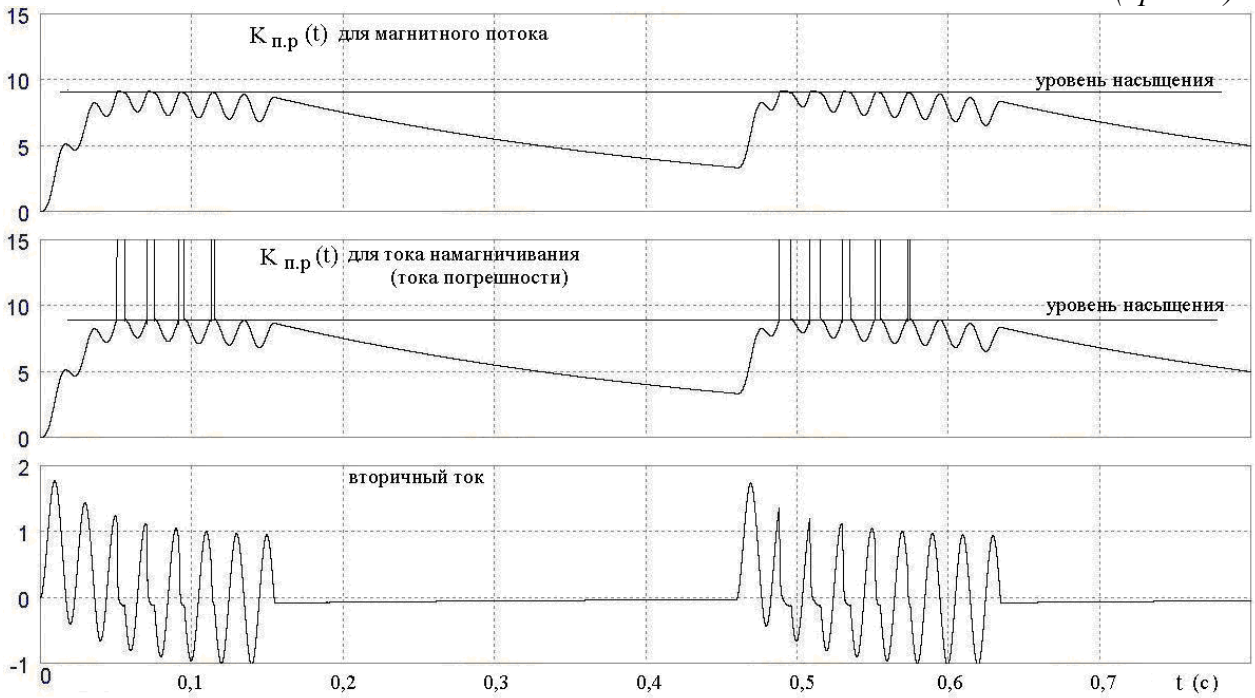


Рисунок Б.5. Работа трансформатора тока при наличии насыщения.

После момента достижения уровня насыщения, процесс во вторичном контуре уже не соответствует выражениям (Б.16), (Б.17), (Б.19) до самого конца протекания тока короткого замыкания, несмотря на то, что потокосцепление может снизиться ниже уровня насыщения раньше. Для бестоковой паузы можно считать применимым выражение (Б.27), с той разницей, что за начальное значение следует принять уровень насыщения.

Значение времени до насыщения в первом коротком замыкании $t_{нас}'$ можно определить по выражению (Б.23). Для времени насыщения во втором коротком замыкании $t_{нас}''$ следует учесть начальное значение в момент начала второго короткого замыкания $K_{п.р}(t_2)$:

$$t_{нас}'' = T \cdot \ln \frac{\omega \cdot T}{\omega \cdot T + K_{п.р}(t_2) - A \cdot K_{п.р.ном} + 1}, \qquad (Б.30)$$

Неравенства (Б.24) и (Б.25) в этом случае принимают вид:

$$\omega \cdot T + 1 > A \cdot K_{п.р.ном} - K_{п.р}(t_2), \qquad (Б.31)$$

$$A \cdot K_{п.р.ном} - K_{п.р}(t_2) > 1, \qquad (Б.32)$$

Б.6 Эквивалентность расчетных и экспериментальных данных.

Расчетные формулы для косвенных испытаний получены в предположении об отсутствии влияния магнитных потоков рассеяния и собственных емкостей вторичной обмотки – межвитковых, межслоевых. Кроме того, результаты косвенных испытаний

могут зависеть от характеристик испытательных стендов и используемых измерительных приборов. Степень влияния всех неучтенных факторов и допустимость применения косвенных методов испытаний при различных видах испытаний, в первую очередь, приемосдаточных, может быть оценена путем сравнения значения постоянной времени вторичного контура при номинальной нагрузке T_s, полученного исходя из кривой намагничивания по А.1.2 (приложение А) со значением, полученным из опыта прямых испытаний по А.2 (приложение А). Эти значения не должны отличаться друг от друга более, чем на 10 %.

Дополнительно, для наглядности, по результатам опыта прямых испытаний по А.2.2 (приложение А), может быть рассчитан коэффициент эквивалентности:

$$F_C = \frac{\Psi_{косв}}{\Psi_{прям}}, \qquad (Б.33)$$

образуемый соотношением потокосцеплений, определенных при прямых испытаниях прямым и косвенным методами. Для обеспечения сравнимости $\Psi_{прям}$ и $\Psi_{косв}$, параметры первичного тока и нагрузки, их определяющие должны быть одинаковыми.

Потокосцепление, как функция времени, по прямому методу, определяется выражением:

$$\Psi_{прям}(t) = \frac{R_2 + R_н}{n_{ном} \cdot R_н} \cdot \int_0^t i_1(t)\,dt, \qquad (Б.34)$$

Потокосцепление по косвенному методу определяется как:

$$\Psi_{косв}(t) = \frac{I_{1исп} \cdot \sqrt{2} \cdot (R_2 + R_н)}{n_{ном} \cdot \omega} \cdot K_{п.р}(t), \qquad (Б.35)$$

В этих выражениях: $i_1(t)$ – первичный ток, определенный по осциллограмме эталонного трансформатора тока в опыте по А.2.2 (приложение А); $I_{1исп}$ – действующее значение периодической составляющей испытательного первичного тока. Для вычисления $K_{п.р}(t)$ используется значение постоянной времени затухания апериодической составляющей первичного тока T_P и интервалы времени $t_{кз1}$, $t_{бт}$ и $t_{кз2}$, определенные по той же осциллограмме опыта. Коэффициент эквивалентности, характеризующий применимость формул Приложения Б к данному трансформатору, а также адекватность характеристик используемых для косвенных испытаний испытательных стендов, определяется для максимальных значений потокосцеплений и должен быть равен:

$$F_C = 1{,}0 \pm 0{,}1\ . \qquad (Б.36)$$

Б.7. Влияние остаточной намагниченности.

Приведенные выше расчетные формулы получены исходя из предположения о нулевых начальных условиях для решения уравнения (Б.6), что соответствует применению трансформаторов, конструкция которых обеспечивает малое значение остаточной намагниченности (классы PR, TPY, TPZ). Трансформаторы тока, в технических данных которых не содержится требования ограничения остаточной намагниченности (классы P по ГОСТ Р *ПРОЕКТ* -2 и классы P, PX и TPX по ГОСТ Р МЭК 61869-2, которые, в части переходных процессов короткого замыкания, являются аналогами класса P) тоже подвергаются действию переходных процессов. Для того, чтобы учесть этот факт, при применении указанных классов трансформаторов, в расчетные формулы настоящего приложения следует подставлять, в качестве начального условия $K_{п.р}(0)$, ожидаемое значение остаточной намагниченности на момент начала короткого замыкания.

Считая, в общем случае, для совместимости с математическим аппаратом пунктов Б.1 – Б.5, что уровень насыщения обозначен гарантированным значением $K_{п.р.ном}$, в качестве начального значения в (Б.16) и (Б.17) следует подставить значение $K_{п.р.ном} \cdot K_г$:

$$K_{п.р}(t) = K_{п.р.ном} \cdot K_г + \frac{\omega \cdot T_P \cdot T_S}{T_P - T_S}\left(e^{-\frac{t}{T_P}} - e^{-\frac{t}{T_S}}\right) - \sin(\omega \cdot t), \qquad (Б.37)$$

$$K_{п.р.огиб}(t) = K_{п.р.ном} \cdot K_г + \frac{\omega \cdot T_P \cdot T_S}{T_P - T_S}\left(e^{-\frac{t}{T_P}} - e^{-\frac{t}{T_S}}\right) + 1, \qquad (Б.38)$$

где $K_г$ – значение коэффициента остаточной намагниченности на момент начала короткого замыкания (в долях единицы). Для трансформаторов класса P, для которых не установлен параметр $K_{п.р.ном}$ принимается значение $K_{п.р.ном}=1$.

П р и м е ч а н и е - Для трансформаторов класса TPX по МЭК 61869-2 также значение $K_{п.р.ном}=1$, а нормируемый для них параметр K_x является аналогом коэффициента предельной кратности $K_{ном}$.

С учетом этого, условие отсутствия насыщения (Б.20) принимает вид:

$$\frac{A \cdot (1 - K_г) \cdot K_{п.р.ном}}{K_{п.р.max}} \geq 1, \qquad (Б.39)$$

а выражение (Б.19) для максимума переходного коэффициента принимает вид:

$$K_{\text{ï.ð. max}} = A \cdot K_r + \frac{\omega \cdot T_P \cdot T_S}{T_P - T_S}\left[\left(\frac{T_P}{T_S}\right)^{\frac{T_S}{T_S - T_P}} - \left(\frac{T_P}{T_S}\right)^{\frac{T_P}{T_S - T_P}}\right] + 1, \qquad (Б.40)$$

В эксплуатационной практике для трансформаторов класса Р часто применяется приближенное представление в виде прямоугольной характеристики намагничивания (ПХН). Учитывая, что при таком представлении, значение $T_S \to \infty$, выражения (Б.37),(Б.38) и (Б.40) еще более упростятся:

$$K_{\text{п.р}}(t) = A \cdot K_r + \omega \cdot T_P \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_P}}) - \sin(\omega \cdot t), \qquad (Б.41)$$

$$K_{\text{ï.ð. îãèá}}(t) = A \cdot K_r + \omega \cdot T_P \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_P}}) + 1. \qquad (Б.42)$$

$$K_{\text{ï.ð.max}} = A \cdot K_r + \omega \cdot T_P + 1 \qquad (Б.43)$$

и уравнение (Б.22) принимает вид:

$$A \cdot K_r + \omega \cdot T_P \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_P}}) - \sin(\omega \cdot t) = A, \qquad (Б.44)$$

или по огибающей кривой:

$$A \cdot K_r + \omega \cdot T_P \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_P}}) + 1 = A. \qquad (Б.45)$$

Приближенная оценка времени до насыщения, при несоблюдении условия (Б.39):

$$t_{\text{íàñ}} = T_P \cdot \ln \frac{\omega \cdot T_P}{\omega \cdot T_P - A \cdot (1 - K_r) + 1}, \qquad (Б.46)$$

Неравенства (Б.24) и (Б.25) в этом случае принимают вид:

$$\omega \cdot T_P + 1 > A \cdot (1 - K_r), \qquad (Б.47)$$

$$A \cdot (1 - K_r) > 1. \qquad (Б.48)$$

П р и м е ч а н и я :

1 . Приведенная формула при времени до насыщения менее 15 мс завышает требования к ТТ, что гарантированно обеспечивает отсутствие насыщения ТТ до этого времени. Если требуется более точная оценка, то фактическое время до насыщения должно быть рассчитано путем точного решения уравнений (Б.8) и (Б.9), например, численными методами, с учетом фактической начальной фазы тока по (Б.6).

2. При несоблюдении неравенства (Б.48), значение $t_{нас}$ по (Б.46) принимает отрицательное значение. Это следует понимать как предупреждение, что уровень насыщения, с учетом его сокращения за счет остаточной намагниченности, меньше, чем амплитуда периодической составляющей потокосцепления. Для определения реального времени насыщения следует применять методы расчета, упомянутые в Примечании 1.

Значение допустимого тока короткого замыкания, с учетом сопротивления нагрузки, выбирается в соответствии с (Б.21) с таким расчетом, чтобы выполнялось условие (Б.39) или обеспечивалось достаточное время до насыщения по (Б.46).

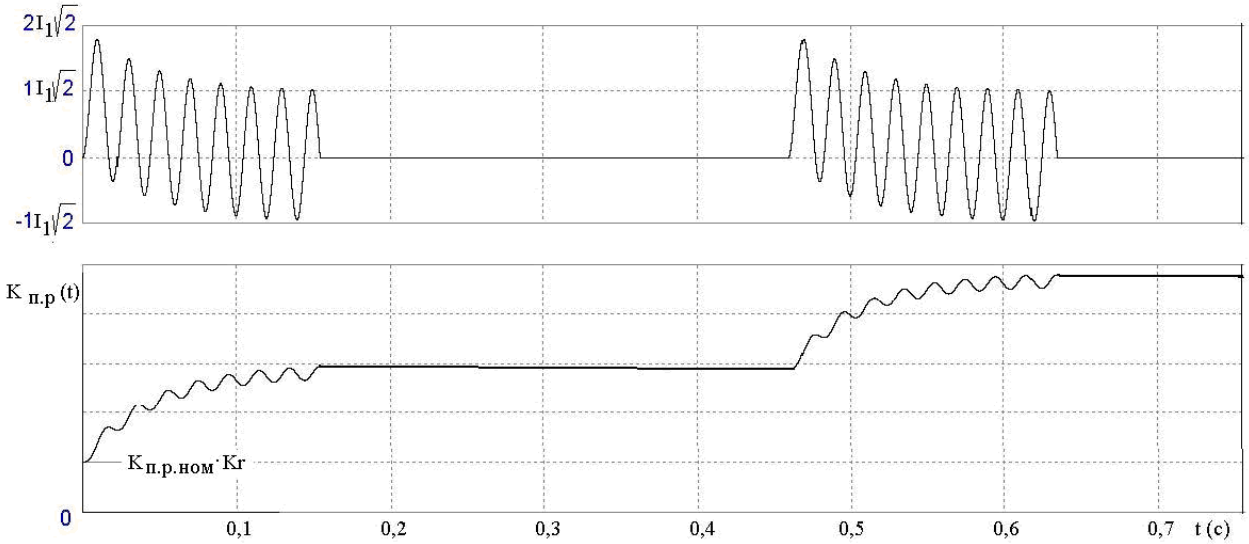


Рисунок Б.6. Характер изменения потокосцепления в трансформаторе тока класса Р при отсутствии насыщения.

Значение остаточной намагниченности на любой момент времени зависит от всей предыстории трансформатора, начиная от операций, совершаемых при вводе его в эксплуатацию, и включая все случаи протекания аварийных токов, при каждом из которых состояние остаточной намагниченности магнитопровода может измениться. Поскольку предугадать всю совокупность воздействий, которым может подвергнуться трансформатор, невозможно, остаточную намагниченность на момент начала короткого замыкания следует рассматривать как случайную величину.

Статистическая обработка по ГОСТ 8.207-76 данных измерений остаточной намагниченности, проведенных на отдельных присоединениях ОРУ-500 Ростовской АЭС дала результаты, приведенные в таблице Б.1. Измерения выполнялись прибором CT Analyzer Omicron на трансформаторах тока типа SAS 550/5G класса 10P производства TRENCH. Оценивалась только случайная составляющая результатов измерения.

Таблица Б.1 Оценка доверительных интервалов остаточной намагниченности

Количество измерений (сердечников) N	Значения в % от потокосцепления насыщения				
	среднее значение Ã	Дисперсия σ	Доверительная вероятность P	Коэффициент Стьюдента t	Границы доверительного интервала (с округлением до целых %)
13	49,41	6,85	0,95	2,179	50 ± 15
			0,99	3,055	50 ± 21

Следует отметить, что максимальное из измеренных значений составляло 86 % от уровня насыщения. Такое же значение (86 %) было максимальным при лабораторных экспериментах с остаточной намагниченностью на отечественных трансформаторах тока аналогичного класса.

Согласно этим данным, значение K_r следует принимать равным 0,65 – 0,71, а в особо ответственных случаях – до 0,86. Приведенные результаты исследований, ввиду их немногочисленности, нельзя считать исчерпывающими. Эксплуатирующим организациям следует устанавливать допустимые значения K_r в своей нормативной документации на основании более расширенных исследований.

Б.8. Пример расчета времени до насыщения трансформатора тока ТФЗМ-500-2000/1-10Р.

Исходные данные. Суммарный ток однофазного КЗ на шинах ОРУ – 500 кВ равен 26 900 А. Значения токов в ветвях, питающих точку КЗ, и постоянные времени затухания апериодических составляющих токов в ветвях приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ ветви	Наименование ветви	$T_p^{(1)}$, мс	$I_{КЗ}^{(1)}$, А
1	Блок генератор-трансформатор	217	20910
2	Автотрансформатор связи	60	2366
3	Воздушные линии	32,4	3380

Номинальные параметры трансформатора ТФЗМ-500-2000/1-10Р:

R_2 = 10 Ом; Cos φ2 = 1; $R_{н.ном}$ = 50 Ом; $I_{1.ном}$ =2000 А; $K_{ном}$ =18.

Б.8.1. Расчётное сопротивление нагрузки при однофазном КЗ вычислено по выражению:

$$R_{н.факт} = 2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S} = 12{,}6 \text{ Ом},$$

где ρ = 0,0175 Ом*мм^2/м, длина контрольного кабеля l = 900 м, поперечное сечение жилы S = 2,5 мм^2.

Б.8.2. По выражению в примечании 2 к формуле (Б.6) вычислена эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ:

$$T_{p.\acute{y}\hat{e}}^{(1)} = \frac{20910*0{,}217 + 2366*0{,}060 + 3380*0{,}0324}{20910 + 2366 + 3380} = 0{,}18\ \text{с}.$$

Б.8.3. По выражению (Б.21) определен параметр A режима ТТ при заданном токе КЗ $I_{КЗ}$ и фактической нагрузке $R_{\text{н.факт}}$ во вторичной цепи:

$$A = \frac{I_{1.\text{ном}} \cdot K_{\text{п.р.ном}} \cdot (R_2 + R_{\text{н.ном}})}{I_{\text{кз}} \cdot (R_2 + R_{\text{н.факт}})} = \frac{2000 \cdot 18 \cdot (10 + 50)}{26900 \cdot (10 + 12{,}6)} = 3{,}55.$$

Произведение $A(1 - K_r)$ при отсутствии остаточной магнитной индукции равно 3,55, а при K_r = 0,86 равно 0,497.

Б.8.4. Приближенная оценка $t_{\text{нас}}$ по выражению (Б.46):

– без учёта остаточной индукции

$$t_{\text{нас}} = T_p \ln \frac{\omega \cdot T_p}{\omega \cdot T_p - A + 1} = 0{,}18 \cdot \ln \frac{\omega \cdot 0{,}18}{\omega \cdot 0{,}18 - 3{,}55 + 1} = 8{,}3\ \text{мс};$$

– с учетом остаточной индукции расчет с использованием огибающей невозможен, см. Примечание 2 к выражению (Б.48).

Б.8.5. Расчет графоаналитическим методом с использованием формулы (Б.41).

Уравнение принимает вид:

$$\omega \cdot \mathrm{T_P} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_P}}) - \sin(\omega \cdot t) = \mathrm{A} \cdot (1 - \mathrm{K_r}) = \mathrm{K_{п.р}}(t) \qquad (Б.49)$$

Результаты представлены на рисунке Б.7.

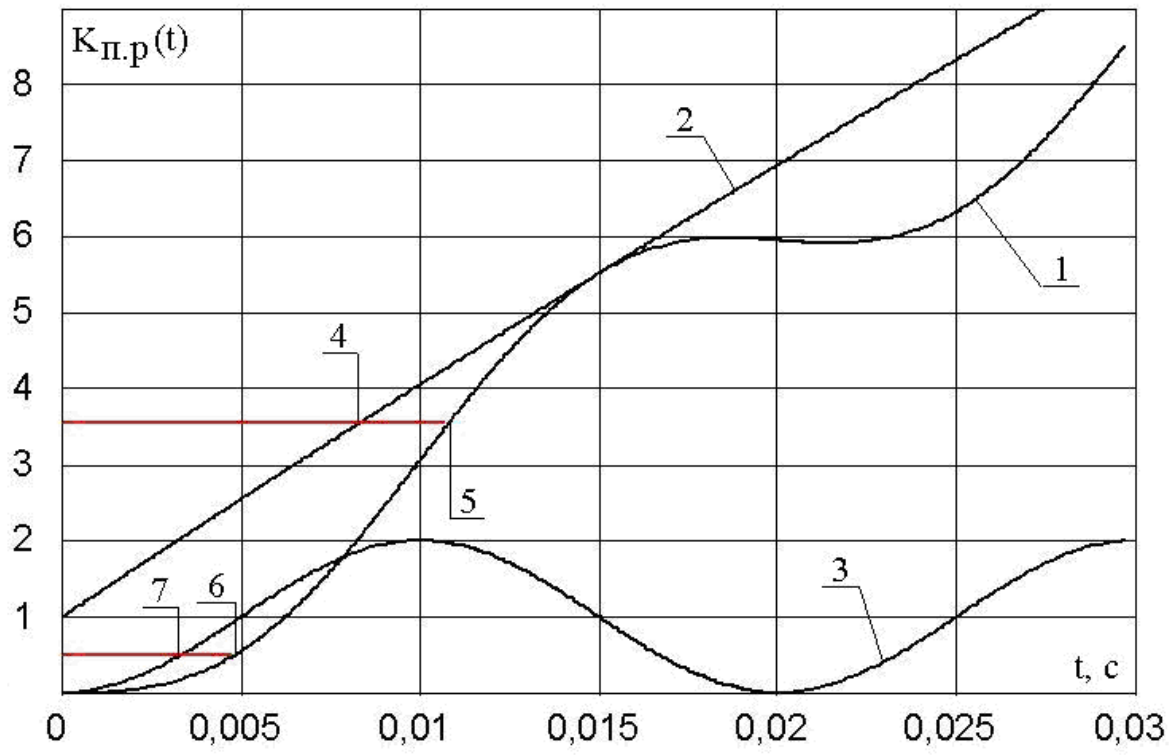


Рисунок Б.7. Результаты графоаналитического расчета времени до насыщения.

1 – кривая, отображающая левую часть уравнения (Б.49);

2 – огибающая по уравнению (Б.45);

3 – кривая, отображающая решение уравнения (Б.9) для трансформатора с ПХН при отсутствии апериодической составляющей в первичном токе;

4 – решение по п. Б.8.4 (по огибающей, $K_г = 0$, $A = 3{,}55$), $t_{нас} = 8{,}3$ мс;

5 – решение по уравнению (Б.49) $K_г = 0$, $A = 3{,}55$, $t_{нас} = 10{,}8$ мс;

6 – решение по уравнению (Б.49), $K_г = 0{,}86$, $A(1 – K_г) = 0{,}497$, $t_{нас} = 4{,}8$ мс;

7 – решение для случая, когда апериодическая составляющая в первичном токе отсутствует, $K_г = 0{,}86$, $A(1 – K_г) = 0{,}497$, $t_{нас} = 3{,}32$ мс.

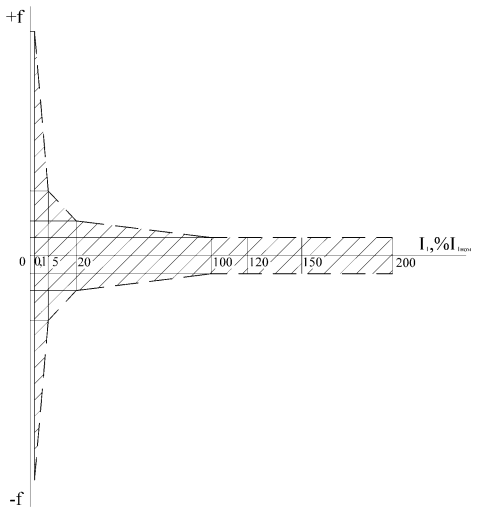
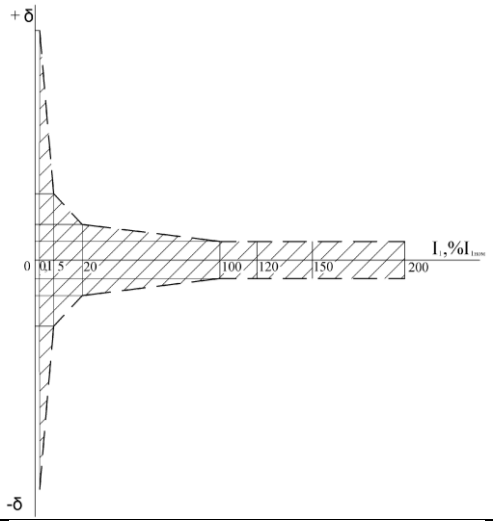
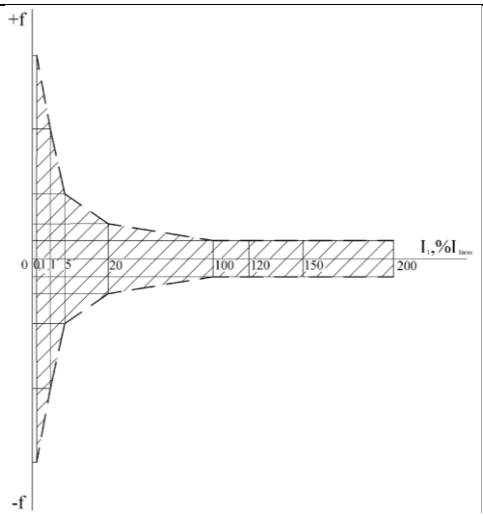
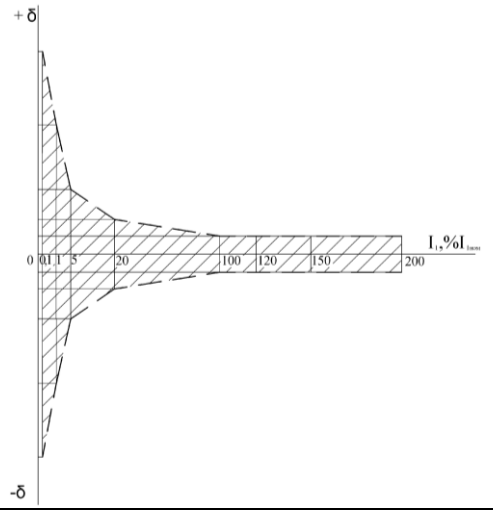
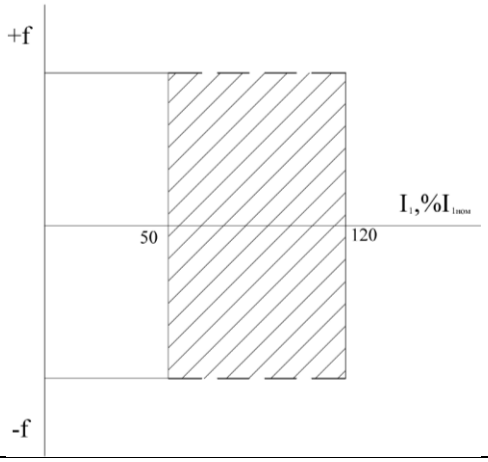
ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Допускаемая область погрешностей

для трансформаторов различных классов точности

Таблица В.1

Класс точности	Погрешность	
	токовая	угловая
0,1; 0,2; 0,5; 1		
0,2S; 0,5S		
3; 5; 10		Не нормируется

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

Методика измерения погрешностей трансформаторов тока с расширенным диапазоном рабочих токов

Г.1 Токовые и угловые погрешности трансформаторов тока с расширенным диапазоном рабочих токов могут быть определены дифференциальным (нулевым) методом в соответствии со схемой (см. рисунок Г.1) по методике ГОСТ 8.217. Конкретная схема, по которой определяют погрешности трансформатора тока с расширенным диапазоном рабочих токов, должна быть приведена в стандартах на трансформаторы конкретных типов.

При сборке схемы испытаний соединение приборов осуществляют в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации применяемых приборов.

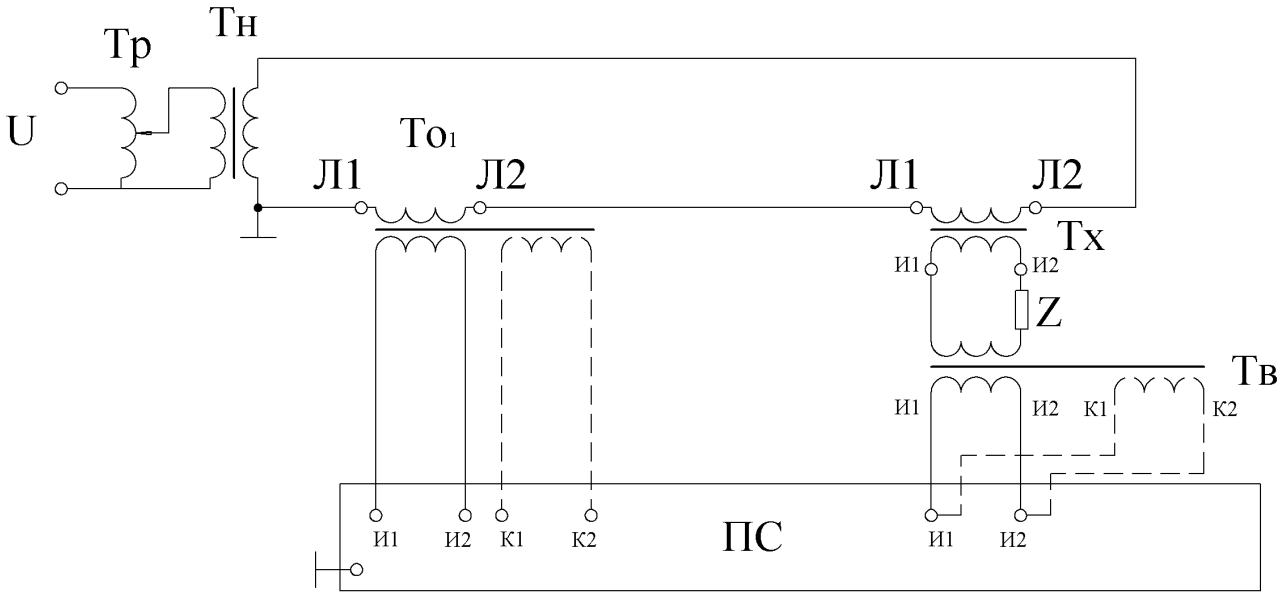


Рисунок Г.1 – Схема для определения токовых и угловых погрешностей трансформатора тока с расширенным диапазоном рабочих токов

Тр – регулировочный трансформатор; Тн – нагрузочный трансформатор; $То_1$– рабочий эталон; Тв – вспомогательный рабочий эталон; Тх – испытуемый трансформатор тока; Z – нагрузка поверяемого трансформатора; - - - – дополнительная вторичная обмотка (при использовании рабочего эталона, выполненного по схеме двухступенчатого трансформатора тока);

ПС – прибор сравнения.

Г.2 К элементам схемы предъявляют следующие требования:

1) коэффициенты трансформации рабочих эталонов должны быть такими, чтобы выполнялось условие

$$n_{01} = n_X \cdot n_B, \qquad (Г.1)$$

где n_{01} – коэффициент трансформации To_1;

n_X – коэффициент трансформации Тх;

n_B – коэффициент трансформации Тв.

2) коэффициенты трансформации рабочих эталонов должны быть выбраны так, чтобы приборы оставались в рабочем диапазоне токов с нормируемой погрешностью

Г.3 При испытании устанавливают ток в цепи, равный первичному току испытуемого трансформатора тока (составляющий 0,1 %, 0,2 %, 150 % и 200 % от номинального тока, в зависимости от исходных данных испытания).

Согласно дифференциальному методу, основанному на сравнении вторичных токов поверяемого и эталонного трансформаторов для определения погрешности поверяемого трансформатора тока, токи, приходящие на прибор сравнения (ПС рис. Г.1), должны быть одинаковыми по номиналу. Для этого в схему включают вспомогательный эталонный трансформатор тока, который понижает (повышает) вторичный ток испытуемого трансформатора тока до требуемого значения, равного вторичному току эталонного трансформатора тока.

Значение тока в цепи необходимо выставлять по прибору сравнения в соответствии с формулой

$$I_{факт} = I_{пр} \cdot K, \qquad (Г.2)$$

где $K = n_B = I_{в.ном1} / I_{в.ном2}$;

$I_{факт}$ – значение тока фактическое во вторичной цепи испытуемого трансформатора, %;

$I_{пр}$ – значение тока по прибору сравнения, %;

$I_{в.ном1}$, $I_{в.ном2}$ – значения первичного и вторичного токов соответственно вспомогательного рабочего эталона.

Примеры

1 Необходимо рассчитать значение тока на приборе сравнения $I_{пр}$, до которого необходимо поднимать ток в цепи испытуемого трансформатора при определении погрешности испытуемого трансформатора тока при токе равном 200 % от номинального тока.

Исходные данные: номинальный первичный и вторичный ток испытуемого трансформатора тока соответственно $I_{х.ном1}$ = 600 А и $I_{х.ном2}$ = 5 А, отсюда n_X = 600 / 5 = 120

– Выбираем коэффициенты трансформации эталонных трансформаторов тока:

$$n_{01} = I_{о.ном1} / I_{о.ном2},$$

где $I_{о.ном1} = I_{х.ном1} \cdot 200\ \% / 100\ \% = 1200$ А, $I_{о.ном2} = 5$ А

тогда $n_{01} = 1200 / 5 = 240$.

Находим коэффициент трансформации вспомогательного эталонного трансформатора тока:

$$n_B = n_{01} / n_X = 240 / 120 = 2$$

– Находим значение тока на приборе сравнения, до которого необходимо поднимать ток в цепи испытуемого трансформатора

$$I_{факт} = I_{пр} * K,$$

где $K = n_B = 2$, а $I_{пр} = 100$ %

тогда $I_{факт} = 200$ % ,

2 Необходимо рассчитать значение тока на приборе сравнения $I_{пр}$, до которого необходимо поднимать ток в цепи испытуемого трансформатора при определении погрешности испытуемого трансформатора тока при токе равном 0,1 % от номинального тока.

Исходные данные: номинальный первичный и вторичный ток испытуемого трансформатора тока соответственно $I_{х.ном1}$ = 600 А и $I_{х.ном2}$ = 5 А, отсюда n_X = 600 / 5 = 120

– Выбираем коэффициенты трансформации эталонных трансформаторов тока:

$$n_{01} = I_{о.ном1} / I_{о.ном2},$$

где $I_{о.ном1} = I_{х.ном1} \cdot 0{,}1\ \% / 1\ \% = 60$ А, $I_{о.ном2} = 5$ А,

тогда $n_{01} = 60 / 5 = 12$

– Находим коэффициент трансформации вспомогательного эталонного трансформатора тока:

$$n_B = n_{01} / n_X = 12 / 120 = 0,1$$

– Находим значение тока на приборе сравнения, до которого необходимо поднимать ток в цепи испытуемого трансформатора

$$I_{факт} = I_{пр} * K,$$

где $K = n_B = 0,1$, а $I_{пр} = 1$ %

тогда $I_{факт} = 0,1$ %

ПНСТ
(*проект*)

УДК 621.314.22.08 ОКС 17.220.20 ОКП 422000

Ключевые слова: трансформаторы измерительные, трансформаторы тока

Организация-разработчик:
Общество с ограниченной ответственностью «Эльмаш (УЭТМ)»

Руководитель разработки:
Руководитель ЭКБ ОГК ВВА ИЦ _____ Г.А. Ведерников

Исполнители:
Ведущий инженер – конструктор, ИЦ
направление ВВА _____ О.В. Петрова

Ведущий инженер – исследователь, ИЦ
направление ВВА _____ Л.В. Щеглов