

**НПП ХАРТРОН-ИНКОР**

Утвержден  
ААВГ.421453.005 92 01 - ЛУ

**ПРИБОРНЫЙ МОДУЛЬ  
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ**

**РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ УСТАВОК  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**ААВГ.421453.005 92 01**

Листов 22

2008

## **I ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ, ВЫПОЛНЕННОЙ НА БАЗЕ ПМ РЗА "ДИАМАНТ"**

Защита работает на дифференциальном принципе – сравнении векторов токов в плечах защиты. Защита выполнена в трехфазном и 2 - 3-плечном исполнении.

Защита имеет две ступени: дифференциальную отсечку и дифференциальную защиту с торможением. Ввод в работу и вывод из работы, а также переключение работы каждой ступени на сигнал или отключение осуществляется независимо через уставки.

При работе дифференциальной отсечки и дифференциальной защиты с торможением на отключение формируются команды на отключение всех выключателей в плечах защиты.

Дифференциальный ток вычисляется как геометрическая сумма токов в плечах защиты с учетом их выравнивания.

Тормозной ток вычисляется как арифметическая полусумма токов в плечах защиты с учетом их выравнивания. Выравнивание необходимо ввиду различия трансформаторов тока по сторонам защищаемого объекта.

Выравнивание токов осуществляется посредством введения коэффициентов во вторичные токи плеча защиты. Коэффициент вводится изменением значений соответствующих уставок.

Характеристика продольной дифференциальной защиты в зоне торможения имеет два участка, наклоны которых определяются коэффициентами торможения, введенными через уставки.

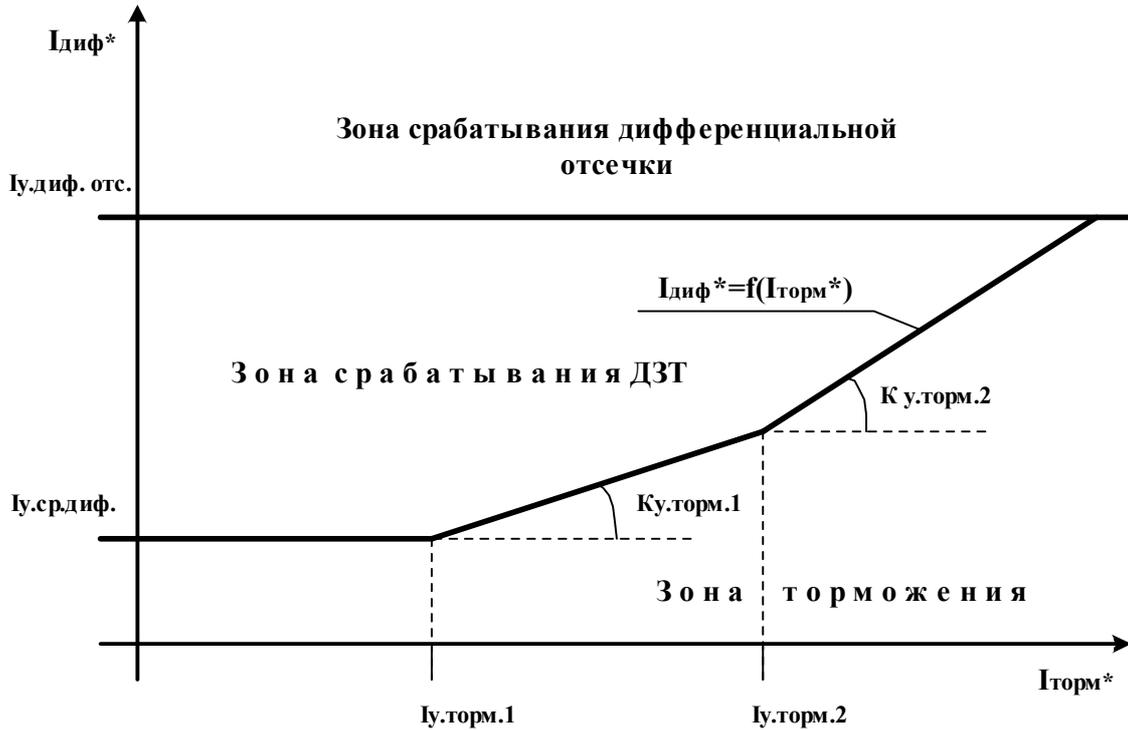
Для отстройки защиты от бросков тока намагничивания и от перевозбуждения трансформаторов применяются блокировки дифференциальной защиты с торможением (ДЗТ) по факту наличия в дифференциальном токе соответственно второй и пятой гармонических составляющих, превышающих уставки. Ввод и вывод блокировок осуществляется через уставки.

Для предотвращения ложного срабатывания защиты при нарушении измерительных цепей (нарушение изоляции, неправильное соединение цепей персоналом) введена блокировка срабатывания дифференциальной защиты по превышению допустимых токов небаланса с заданными выдержками времени. При этом выдается сигнализация о неисправности токовых цепей дифференциальной защиты. Допустимые значения токов по фазному небалансу, по небалансу тока нулевой последовательности и допустимым временам небаланса задаются через уставки. Деблокирование защиты осуществляется обслуживающим персоналом с клавиатуры ПМ РЗА.

Дифференциальная отсечка действует при дифференциальных токах, превышающих номинальный ток в три и больше раз, без блокировки по второй и пятой гармоникам.

Характеристика срабатывания продольной дифференциальной защиты – в соответствии с рисунком I.1.

Характеристики блокировки продольной дифференциальной защиты по второй и пятой гармоническим составляющим приведены на рисунке I.2.



- $I_{у.диф.отс.}$  – уставка по току срабатывания дифференциальной отсечки;
- $I_{у.ср.диф.}$  – уставка по дифференциальному току срабатывания ДЗТ;
- $I_{у.торм.1}$  – уставка начала торможения ДЗТ 1-го наклонного участка характеристики срабатывания;
- $I_{у.торм.2}$  – уставка начала торможения ДЗТ 2-го наклонного участка характеристики срабатывания;
- $K_{у.торм.1}$  – уставка коэффициента торможения ДЗТ на 1-ом наклонном участке характеристики срабатывания (зависит от угла наклона данного участка характеристики срабатывания и представляет собой тангенс этого угла);
- $K_{у.торм.2}$  – уставка коэффициента торможения ДЗТ на 2-ом наклонном участке характеристики срабатывания (зависит от угла наклона данного участка характеристики срабатывания и представляет собой тангенс этого угла).

Рисунок I.1 – Характеристика срабатывания продольной дифференциальной защиты

Характеристики продольной дифференциальной защиты соответствуют указанным в таблице I.1.

Таблица I.1 – Характеристики продольной дифференциальной защиты

Наименование параметра	Значение
Диапазон коэффициентов выравнивания токов в плечах	0 - 20
Дискретность коэффициентов выравнивания токов в плечах	0,01
Уставка тока исправности токовых цепей, А	0,05-20
Дискретность тока исправности токовых цепей, А	0,01
Время выдержки исправности токовых цепей, с	0-20
Дискретность времени выдержки исправности токовых цепей, с	0,1
Сброс блокировки при нарушении токовых цепей	ручной/автомат
Ток срабатывания дифференциальной отсечки, А	0,1 – 100

## Продолжение таблицы I.1

Наименование параметра	Значение
Дискретность тока срабатывания дифференциальной отсечки, А	0,1
Ток блокировки ДЗТ по второй и пятой гармоникам, А	0,01 – 50
Дискретность тока блокировки ДЗТ по второй и пятой гармоникам, А	0,01
Дифференциальный ток срабатывания ДЗТ, А	0,05 – 50
Дискретность дифференциального тока срабатывания ДЗТ, А	0,01
Уставка коэффициента торможения 1, 2	0 – 1
Дискретность уставки коэффициента торможения 1, 2-го	0,001
Уставка начала торможения 1, 2, А	0 – 50
Дискретность уставки начала торможения 1, 2, А	0,01
Время срабатывания защиты, с	$\leq 0,025$

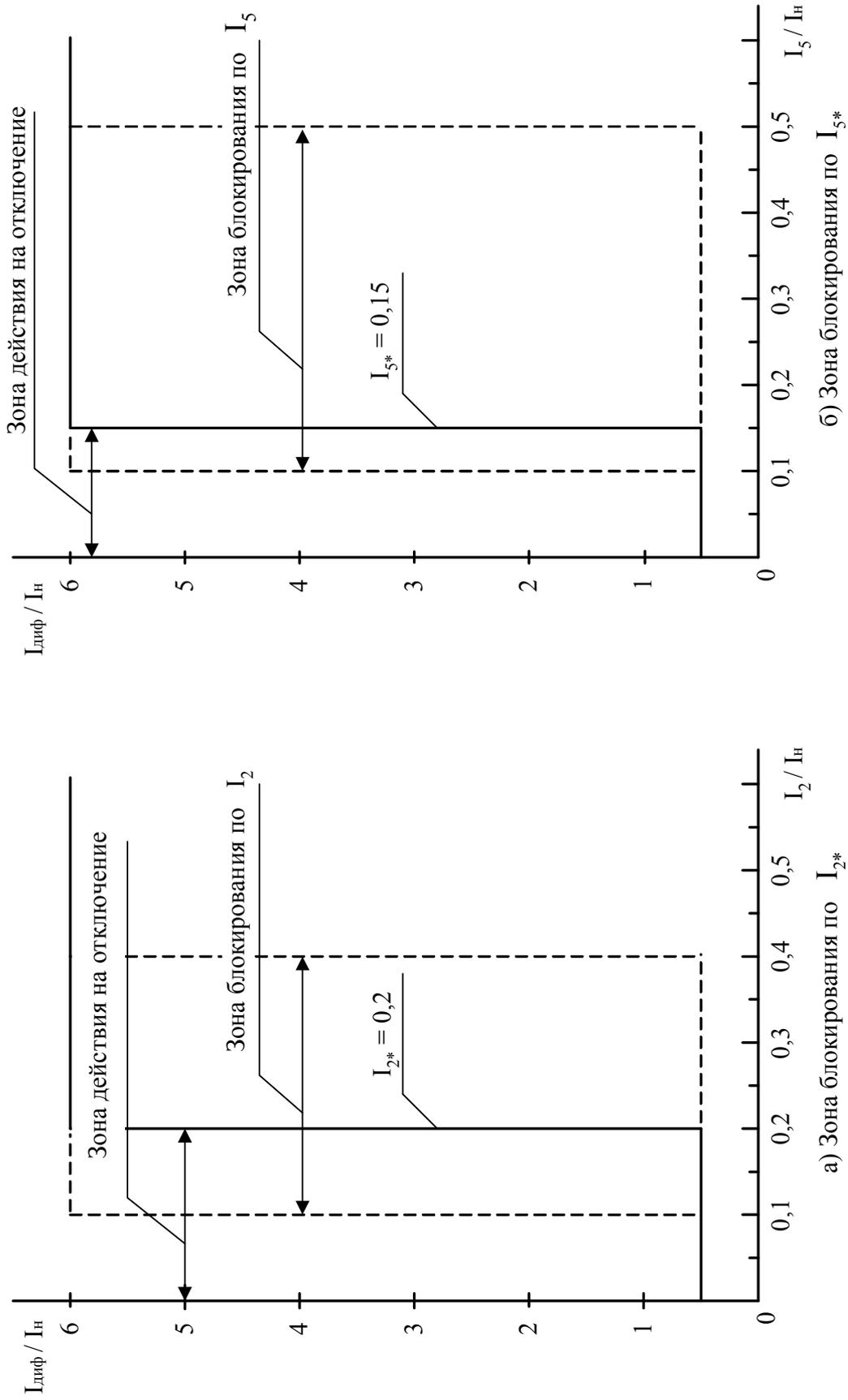


Рисунок 1.2 - Характеристики блокировки продольной дифференциальной защиты по второй и пятой гармоническим составляющим

## II РАСЧЕТ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ, ВЫПОЛНЕННОЙ НА БАЗЕ ПМ РЗА "ДИАМАНТ"

### 1 Основные указания по расчету ДТЗ

1.1 Ниже даны рекомендации по расчету дифференциальной токовой защиты с торможением (ДТЗ), выполненные на базе ПМ РЗА "Диамант".

В основу рекомендаций положены Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 13Б: "Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110 – 500 кВ, Расчеты" (М. Энергоатомиздат, 1985) [1]. При этом учтены особенности алгоритмов ДТЗ, реализованных в ПМ РЗА "Диамант".

1.2 Первичный минимальный ток срабатывания защиты при отсутствии торможения (независимый участок характеристики ДТЗ)  $I_{с.з. \min}$  выбирается по следующим условиям:

1.2.1 Отстройки от расчетного первичного тока небаланса в режиме, соответствующем началу торможения, которая производится по выражению:

$$I_{с.з. \min} \geq K_{отс} I_{нб. \text{торм.нач.}} = K_{отс} (I'_{нб. \text{торм.нач.}} + I''_{нб. \text{торм.нач.}}), \quad (1)$$

где  $K_{отс}$  - коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,5;

$I_{нб. \text{торм.нач.}}$  - расчетный ток небаланса, соответствующий началу торможения;

$I'_{нб. \text{торм.нач.}}$  - составляющая, обусловленная погрешностью трансформаторов тока;

$I''_{нб. \text{торм.нач.}}$  - составляющая, обусловленная регулированием напряжения защищаемого трансформатора.

1.2.2 Обеспечения недействия защиты от тока небаланса переходного режима внешнего КЗ. Условие соблюдается

$$I_{с.з. \min} \geq 0,15 I_{ном}, \quad (2)$$

где  $I_{ном}$  – номинальный ток, соответствующий номинальному напряжению среднего ответвления РПН и номинальной мощности трансформатора.

Для трансформаторов уставку  $I_{у. \text{ср.диф.}}$  по номинальному току срабатывания рекомендуется принимать с учетом коэффициента надежности отстройки:

$$I_{у. \text{ср.диф.}} = 0,3 I_{ном} \quad (2^*)$$

Указанное условие определяется тем, что недействие защиты в переходном режиме внешнего КЗ обеспечивается совокупностью ряда факторов – использованием первой гармоники преобразования Фурье при вычислении дифференциального тока, торможением от второй гармоники, наличием торможения от фазного тока в плечах защиты, дающих гарантированный эффект при минимальном токе срабатывания, удовлетворяющем (2).

Условие (1) принимается за расчетное, когда требуется отстройка уставки минимального тока срабатывания  $I_{у. \text{ср.диф.}}$  от номинального тока трансформатора и возможно использовать торможение.

Условие (2) принимается, когда требуется наибольшая чувствительность ДТЗ к внутренним повреждениям защищаемого трансформатора.

Принятый первичный  $I_{с.з. \min}$  пересчитывается во вторичные токи на расчетной стороне с учетом  $K_{ТТ}$ , коэффициентов приведения и схемы соединения ТТ.

1.2.3 Составляющая  $I_{нб. \text{торм.нач.}}$ , входящая в (1) определяется по выражению

$$I'_{нб. \text{торм.нач.}} = K_{пер.} * K_{одн.} \epsilon I_{расч.}, \quad (3)$$

где  $I_{расч.}$  – периодическая составляющая тока (при  $t=0$ ), проходящего через защищаемую зону в расчетном режиме для обеспечения требуемой чувствительности за  $I_{расч.}$  может быть принят ток при внешнем металлическом КЗ на стороне, где рассматривается повреждение в минимальном режиме.  $I_{расч.}$  определяется при работе трансформатора на расчетном ответвлении, соответствующем, как правило, минимальному значению напряжения регулируемой обмотки. За  $I_{расч.}$  может быть принят ток качаний, если в рассматриваемом случае он является расчетным.

$K_{пер.}=1,0$  – коэффициент, учитывающий переходной режим;

$K_{одн.}$  - коэффициент однотипности трансформаторов тока; при внешних КЗ на той стороне, где защищаемый трансформатор имеет два присоединения и трансформаторы тока ДЗТ установлены в цепях этих присоединений, принимается равным 0,5 – 1, причем

меньшее из указанных значений принимается в условиях, когда указанные ТТ обтекаются примерно равными токами и одинаково нагружены. В остальных случаях  $K_{одн.}$  принимается равным 1;

$\varepsilon$  - относительное значение полной погрешности ТТ, соответствующее установившемуся режиму КЗ (или качаний).

При выборе ТТ для защит трансформаторов по кривым 10% погрешности  $\varepsilon = 0,1$  при 5% погрешности  $\varepsilon = 0,05$ .

1.2.4 Составляющая  $I''_{торм.нач.}$  определяется по выражению:

$$I''_{торм.нач.} = (\Delta U_{\alpha} K_{ток.\alpha} + \Delta U_{\beta} K_{ток.\beta}) I_{расч.}, \quad (4)$$

где  $\Delta U_{\alpha}$  и  $\Delta U_{\beta}$  - относительные погрешности, обусловленные регулированием напряжения на сторонах защищаемого трансформатора и принимаемые равными половине используемого диапазона регулирования на соответствующей стороне;

$K_{ток.\alpha}$  и  $K_{ток.\beta}$  - коэффициенты токораспределения, равные отношению слагающих тока расчетного внешнего КЗ, проходящих на сторонах, где производится регулирование напряжений, к току на стороне, где рассматривается КЗ.

Выражения (3) и (4) составлены применительно к трехобмоточному трансформатору; для двухобмоточного трансформатора в (4) исключается второй член.

1.2.5 На трансформаторах с РПН расчетное значение суммы составляющих тока небаланса ( $I''_{нб.} + I''_{нб.}$ ) при необходимости может быть уточнено в сторону уменьшения, если при расчете учитывать отклонение регулятора напряжения не от среднего его положения  $U_{ном.ср.}$ , а от некоторого оптимального  $U_{опт.}$ .

В этом случае необходимо пользоваться рекомендациями п.2.1.4 Руководящих указаний [1].

1.3 Расчет зависимой от торможения части характеристики срабатывания ДЗТ

1.3.1 Ток торможения в ДЗТ ПМ РЗА "Диамант" определяется в общем виде как:

$$I_T = K_T \frac{|\bar{I}_1| + |\bar{I}_2| + |\bar{I}_3|}{2}, \quad (5)$$

где  $I_1, I_2$  и  $I_3$  – токи в плечах защиты, приведенные к расчетной стороне.

Характеристика ДЗТ имеет два участка торможения с углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , как указывалось в разделе 1. При  $K_T = 1$  угол наклона участка имеет максимальную величину, равную  $45^{\circ}$ . Первый участок торможения используется, когда относительная погрешность трансформаторов тока не превышает расчетную.

Второй участок торможения следует применять в случаях, когда в режимах сквозного КЗ погрешности ТТ могут превысить расчетную.

Ток начала торможения  $I_{тор.1пер.}$  на первом участке характеристики защиты (рисунок 1.1) минимальный ток срабатывания  $I_{с.з.мин.}$ , приведенные к расчетной стороне ДТЗ, определяют координаты точки, от которой начинается автоматическое увеличение уставки срабатывания ДЗТ, выбранной по условию (2), при превышении расчетных токов небалансов.

При сквозном токе КЗ, равном  $I_{с.з.мин.}$ , максимальный ток начала торможения согласно (5) будет составлять

$$I_{m1} = \frac{|\bar{I}_1| + |\bar{I}_2| + |\bar{I}_3|}{2} = I_{с.з.мин.} = I_{скв.мин.}$$

Для надежной отстройки от переходных процессов внешнего КЗ уставка  $I_{у/торм.1}$  определяется с учетом коэффициента коррекции  $K_k = 1,5$  по выражению:

$$I_{у/торм.1} = \frac{I_{m1}}{K_k} = \frac{|\bar{I}_1| + |\bar{I}_2| + |\bar{I}_3|}{2 * K_k}. \quad (6)$$

1.3.2 Коэффициент торможения  $K_{торм.}$  выбирается по условию обеспечения недействия защиты от тока небаланса переходного режима внешнего КЗ.

Коэффициент торможения  $K_{\text{торм.1}}$ , удовлетворяющий указанным условиям, определяется по выражению, составленному из тормозной характеристики ДЗТ:

$$K_{\text{торм.1}} = \text{tg}\alpha_1 = \frac{I_{\text{нб.расч.мах}} - I_{\text{с.з.мин}}}{I_{\text{торм.мах}} - I_{\text{у/торм.1}}}, \quad (7)$$

где  $I_{\text{нб.расч.мах}}$  – максимально возможный ток небаланса при переходном режиме внешнего короткого замыкания, приведенный к расчетной стороне;

$I_{\text{с.з.мин}}$  – приведенный к расчетной стороне минимальный ток срабатывания защиты;

$I_{\text{торм.мах}}$  – максимальный ток торможения, обеспечивающий отстройку от тока небаланса при максимальном внешнем КЗ, приведенный к расчетной стороне;

$I_{\text{у/торм.1}}$  – уставка тока начала торможения, определенная по (6).

1.3.3. Первичный максимально возможный ток небаланса  $I_{\text{нб.расч.мах}}$  при переходном режиме внешнего короткого замыкания определяется аналогично току небаланса при начале торможения по составляющим  $I'_{\text{нб.}}$  (3) и  $I''_{\text{нб.}}$  (4), при этом за расчетный ток  $I_{\text{расч.}}$  принимается максимально возможный ток внешнего КЗ.

Вычисленный таким образом  $I_{\text{нб.расч.мах}}$  первичный приводится к расчетной стороне ДТЗ:

$$I_{\text{нб.расч.мах в}} = \frac{I_{\text{нб.расч.мах п}} * K_{\text{сх}}}{K_{\text{I}}} = \frac{(I'_{\text{нб.расч.мах}} + I''_{\text{нб.расч.мах}})K_{\text{сх}}}{K_{\text{I}}}, \quad (8)$$

где  $I_{\text{нб.расч.мах}}$  – максимально возможный ток небаланса вторичный, приведенный к расчетной стороне ДТЗ;

$K_{\text{сх}}$  – коэффициент схемы ТТ;

$K_{\text{I}}$  – коэффициент трансформаторов тока расчетной стороны ДЗТ.

1.3.4 Максимальный ток торможения  $I_{\text{торм.мах}}$ , обеспечивающий отстройку от тока небаланса по п.1.3.3 определяется как арифметическая полусумма приведенных к расчетной стороне ДЗТ токов всех плеч защиты при максимальном токе внешнего КЗ, умноженная на коэффициент торможения:

$$I_{\text{т.мах}} = 0,5(|I_1| + |I_2| + |I_3|), \quad (9)$$

где  $I_1, I_2, I_3$  – приведенные составляющие токов КЗ в плечах защиты.

1.3.5 Подставляя (9) в выражение (7), получаем

$$K_{\text{торм.1}} = \frac{I_{\text{нб.расч.мах}} - I_{\text{с.з.мин}}}{0,5(|I_1| + |I_2| + |I_3|) - I_{\text{у/торм.1}}}. \quad (10)$$

1.3.6 Как отмечалось выше, на параметры срабатывания ДЗТ, а, следовательно, и чувствительность защиты влияют погрешности трансформаторов тока ДЗТ.

В случаях, когда требуется обеспечить максимальную чувствительность ДЗТ при погрешности трансформаторов тока превышающих 10%, целесообразно использовать второй участок торможения характеристики срабатывания ДЗТ. При этом  $I_{\text{у/торм.2}}$  определяется по (9), а за начальную точку второго тормозного участка принимается первичный суммарный ток, при котором погрешность ТТ начинает превышать расчетную.

Максимально возможный ток небаланса для второго наклонного участка характеристики срабатывания ДЗТ определяется по (3) с учетом максимальной ожидаемой погрешности, что должно учитываться коэффициентом  $\epsilon$ .

1.3.7 Для отстройки дифференциальной защиты от бросков тока намагничивания и от перевозбуждения трансформатора в ПМ РЗА "Диамант" используется блокирование действия защиты по факту наличия в дифференциальном токе  $I_{\text{диф.}}$  второй и пятой гармонических составляющих. В соответствии с [2] уставки блокирования защиты по второй гармонике  $I_{\text{бл.2}}^*$  и по пятой гармонике  $I_{\text{бл.5}}^*$ , приведенные к номинальному току

( $I_{\text{бл.2}}^* = \frac{I_{\text{бл.2}}}{I_{\text{ном.}}}$ ,  $I_{\text{бл.5}}^* = \frac{I_{\text{бл.5}}}{I_{\text{ном.}}}$ ), рекомендуется выбирать в пределах:

$$I_{\text{бл.2}}^* = 0,1 \div 0,4$$

$$I_{\text{бл.5}}^* = 0,1 \div 0,5.$$

В связи с этим уставки блокировки ДЗТ в ПМ РЗА "Діамант" по второй гармонике  $I_{\text{у.бл.2}}^*$  рассчитываются по выражению:

$$I_{\text{у.бл.2}} = \frac{(0,1 \div 0,4)I_{\text{ном.}}}{K_{\text{ТТ}}}; \quad (11)$$

по пятой гармонике  $I_{\text{у.бл.5}}$ :

$$I_{\text{у.бл.5}} = \frac{(0,1 \div 0,5)I_{\text{ном.}}}{K_{\text{ТТ}}}, \quad (12)$$

где  $I_{\text{ном.}}$  – номинальный ток трансформатора на стороне принятой за расчетную;  
 $K_{\text{ТТ}}$  – коэффициент трансформаторов тока расчетной стороны.

Броски тока намагничивания (как и токи перевозбуждения) зависят от конструктивных особенностей трансформаторов, характеристик магнитопровода и момента включения трансформатора. В связи с этим уставки  $I_{\text{у.бл.2}}$  и  $I_{\text{у.бл.5}}$  уточняются по результатам первых включений трансформаторов при наладке.

## 2 Рекомендации по расчету дифференциальной отсечки

В алгоритмах дифференциальной отсечки ПМ РЗА "Діамант" не используется торможение, а также блокировки по второй и пятой гармоникам.

В связи с этим для определения первичного тока срабатывания отсечки необходимо использовать указания по п.5.1.9 Руководящих указаний по РЗА [1].

## 3 Чувствительность дифференциальных защит трансформаторов (автотрансформаторов) ПМ РЗА "Діамант"

Чувствительность защиты определяется при металлическом КЗ на выводах защищаемого трансформатора (автотрансформатора) при работе его на расчетном ответвлении. Расчетными режимами работы подстанции и питающих систем являются реальные режимы, обуславливающие минимальный ток при расчетном виде КЗ.

Поскольку токи срабатывания ДЗТ  $I_{\text{с.з.}}$ , как правило, выбираются порядка  $0,3 I_{\text{ном}}$  трансформатора и менее, чувствительность ДЗТ при этом обеспечивается с большим запасом, поэтому необходимость в ее расчете возникает лишь в особых случаях, характеризующихся весьма малыми токами КЗ в защищаемой зоне.

При необходимости в проверке чувствительности ДЗТ следует руководствоваться п.5.1.10 Руководящих указаний по РЗА [1].

Чувствительность дифференциальной токовой отсечки при использовании ДЗТ согласно п.5.1.10 Руководящих указаний по РЗА не определяется, так как она является вспомогательным элементом, назначение которого – предотвращение замедления ДЗТ при больших кратностях тока из-за искажения формы кривой вторичного тока в переходном режиме КЗ (например, при значительном насыщении трансформаторов тока), и торможении вследствие этого ДЗТ токами второй и пятой гармониками.

## 4 Рекомендуемый порядок расчета дифференциальной токовой защиты ПМ РЗА "Діамант"

В соответствии с приведенными указаниями, расчет дифференциальной защиты, выполненной на ПМ РЗА "Діамант", производится в следующем порядке.

4.1 Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого трансформатора (автотрансформатора), соответствующие его номинальной мощности (проходной мощности для автотрансформатора). По этим токам определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты  $I_{1\text{в}}$ ,  $I_{2\text{в}}$ ,  $I_{3\text{в}}$ , исходя из коэффициентов трансформации тока  $K_{\text{ТТ}}$  (выбираются с учетом параметров используемого оборудования, его перегрузочной способности, требований релейной защиты и схемы соединений трансформаторов тока; при соединении трансформаторов тока в "звезду" – исходя из первичного тока  $I_{\text{ном.}} \cdot \sqrt{3}$  ввиду целесообразности иметь вторичные токи в плече защиты, не превышающие номинальный ток ТТ 5 или 1 А) и коэффициента схемы  $K_{\text{сх.}}$ .

4.2 Для дальнейших расчетов выбирается основная сторона трансформатора и соответствующее ей плечо ДЗТ, к которому приводятся (выравниваются) токи остальных (неосновных) сторон.

Выравнивание токов в плечах ДЗТ неосновных сторон трансформатора с расчетной выполняется математически введением коэффициента коррекции  $K_k$

$$K_k = \frac{I_{\text{ном.в осн.}}}{I_{\text{номв неосн.}}},$$

где  $I_{\text{ном в осн.}}$  – вторичный ток в плече защиты основной стороны, соответствующей номинальной мощности трансформатора;

$I_{\text{ном в неосн}}$  – вторичный ток в плече защиты неосновной стороны, соответствующей номинальной мощности трансформатора.

Коэффициенты  $K_k$  в ПМ РЗА "Діамант" изменяются в диапазоне от 0,01 до 20 с шагом 0,01.

Для основной (расчетной) стороны  $K_k$  принимается равным 1,00.

4.3 Рассчитываются коэффициенты коррекции (выравнивания) токов в плечах ДЗТ с учетом коэффициентов схемы тока  $K_{сх.}$ .

Выравнивание токов в плечах по углу для трансформаторов Y/Δ и Δ/Y в ПМ РЗА "Діамант" может производиться математически, в этом случае трансформаторы тока со стороны обмотки, соединенной в "звезду" соединяются также в "звезду". При заказе ПМ РЗА "Діамант" необходимо указывать группу защищаемого трансформатора.

Математическое выравнивание угла выполняется со стороны обмотки трансформатора, соединенной в "звезду", посредством вычитания векторов фазных токов (например, для трансформатора Y/Δ  $I_{\text{расч.ф.А}} = I_{\text{Лизм.}} - I_{\text{Визм.}}$ ;  $I_{\text{расч.ф.В}} = I_{\text{Визм.}} - I_{\text{Сизм.}}$ ;  $I_{\text{расч.ф.С}} = I_{\text{Сизм.}} - I_{\text{Лизм.}}$ ;

где  $I_{\text{Лизм.}}$ ,  $I_{\text{Визм.}}$ ,  $I_{\text{Сизм.}}$  – вектора соответствующих вторичных фазных токов со стороны "звезды", поэтому необходимо также учитывать коэффициент схемы  $K_{сх.}$ , как и в случае сборки трансформаторов тока в "треугольник" со стороны обмотки трансформатора, соединенной в "звезду".

4.4 Определяется ток небаланса в режиме, соответствующем началу торможения  $I_{\text{нб.торм.нач.}}$  по (3) и (4).

4.5 Определяется первичный минимальный ток срабатывания ДЗТ  $I_{\text{с.з.min}}$  при отсутствии торможения по (1) и (2).

Принятый первичный минимальный ток пересчитывается в уставку  $I_{\text{сраб.min}}$ .

4.6 Определяется уставка "начала торможения" по (6).

4.7 Определяется первичный максимальный ток, проходящий через защищаемый трансформатор (автотрансформатор) при внешнем КЗ. Вычисляется значение максимального расчетного тока небаланса  $I_{\text{нб.расч.max}}$  по (8) в соответствии с п.1.3.3.

4.8 Определяется коэффициент торможения защиты  $K_{\text{тор.1}}$ . Расчет производится по выражению (10) в соответствии с 1.3.5 и выполняется анализ необходимости использования второго участка торможения.

4.9 При необходимости использования второго участка торможения расчет производится в последовательности по аналогии с п.п.4.4 – 4.8. в соответствии с п.1.3.6.

4.10 Определяется уставка блокирования защиты по второй гармонической составляющей в дифференциальном токе от бросков тока намагничивания по (11) в соответствии с п.1.3.7.

4.11 Определяется уставка блокирования защиты по пятой гармонической составляющей в дифференциальном токе от перевозбуждения трансформатора по (2) в соответствии с п.1.3.7.

4.12 Определяется значение коэффициента чувствительности (при необходимости) в соответствии с рекомендациями п.3.

**5 Пример расчета дифференциальной токовой защиты с торможением ПМ РЗА "Диамант" двухобмоточного трансформатора**

В настоящем примере дан расчет дифференциальной токовой защиты трансформатора 10 МВА 110/10 кВ.

Исходные данные для расчета

Трансформатор ТДТН-10000/110 ± 9х1,78%/11 кВ- Y/Δ-11 Uк = 10,5%.

Максимальный ток трехфазного КЗ на шинах 11 кВ, приведенный к:

- 115кВ  $I_{\max}^{(3)} = 624 \text{ A},$

- 11 кВ  $I_{\max}^{(3)} = 6524 \text{ A}.$

Минимальный ток трехфазного КЗ на шинах 11 кВ, приведенный к:

- 115кВ  $I_{\min}^{(3)} = 316 \text{ A},$

- 11 кВ  $I_{\min}^{(3)} = 3304 \text{ A}.$

Расчеты ведутся в именованных единицах в табличной форме.

Исходные расчетные данные приведены в таблице 5.1

Минимальный ток двухфазного КЗ на шинах 11кВ, приведенный к:

- 115кВ  $I_{\min}^{(2)} = 272 \text{ A},$

- 11 кВ  $I_{\min}^{(2)} = 2841 \text{ A}.$

Таблица 5.1

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовые значения для стороны	
		110 кВ	11 кВ
Первичный номинальный ток защищаемого трансформатора, А	$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМТ}}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}}$	$\frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 50,3$	$\frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 11} = 525,5$
Коэффициент трансформации трансформаторов тока	$K_I$	150/5	1000/5
Схема соединений трансформаторов тока	-	Δ <sup>*)</sup>	Y
Коэффициент схемы	$K_{\text{СХ}}$	$\sqrt{3}^{\text{*)}}$	1
Вторичный ток в плече защиты, соответствующий номинальной мощности трансформатора	$I_{\text{НОМ В}} = \frac{I_{\text{НОМ}} K_{\text{СХ}}}{K_I}$	$\frac{50,3 \cdot \sqrt{3}}{150/5} = 2,898$	$\frac{525 \cdot 1}{1000/5} = 2,62$
Коэффициент коррекции/ выравнивания, $K_K$	$K_K = \frac{I_{\text{НОМ В ОСН.}}}{I_{\text{НОМ В НЕОСН.}}}$	$\frac{2,62}{2,898} = 0,904$	1
Примечание: <sup>*)</sup> В случае соединений ТТ в "звезду" со стороны 110 кВ коэффициент схемы принимается $\sqrt{3}$			

Расчеты тока небаланса в режиме, соответствующему началу торможения – по (3) и (4); первичного минимального тока срабатывания защиты при отсутствии торможения – по (1) и (2), выбор уставки "начала торможения" - по (6), расчет максимального расчетного тока небаланса – по (8) и расчет коэффициента торможения первого участка приведены в таблице 5.2.

За расчетный ток, проходящий через трансформатор, для определения "начала торможения" принимаем минимальный двухфазный ток металлического КЗ на шинах 11 кВ для обеспечения чувствительности ДЗТ.

Таблица 5.2

Наименование величин	Обозначение и метод определения	Числовые значения для расчетной стороны 11 кВ
Составляющая тока небаланса, определяемая погрешностью ТГ в режиме, соответствующему "началу торможения"	по (3) $I'_{\text{нб. тор. нач.}} = K_{\text{пер.}} \cdot K_{\text{одн.}} \cdot \epsilon \cdot I_{\text{расч.}}$	$1 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 2841 = 284,1$
Составляющая тока небаланса, обусловленная ступенями регулирования трансформатора в режиме, соответствующему "началу торможения"	по (4) $I''_{\text{нб. тор. нач.}} = (\Delta U_{\alpha} K_{\text{ток } \alpha} + \Delta U_{\beta} K_{\text{ток } \beta}) I_{\text{расч}}$	$(0,16 \cdot 1 + 0) \cdot 2841 = 454,6$
Первичный минимальный ток срабатывания защиты при отсутствии торможения	по (1) $I_{\text{с.з. min}} = K_{\text{отс}} (I'_{\text{нб. торм. нач.}} + I''_{\text{нб. торм. нач.}})$ по (2) $I_{\text{с.з. min}} = 0,3 I_{\text{ном}}$	по (1) $1,5(284,1 + 454,6) = 1108,05$ по (2) $0,3 \cdot 525 = 157,5$
Вторичный минимальный ток срабатывания защиты при отсутствии торможения	$I_{\text{с.з. min в}} = \frac{I_{\text{с.з. min}}}{K_{\text{ПТТ}}}$	по (1) $\frac{1108,05}{1000/5} = 5,540;$ по (2) $\frac{157,5}{1000/5} = 0,7875$

Продолжение таблицы 5.2

Наименование величин	Обозначение и метод определения	Числовые значения для расчетной стороны 11 кВ
Уставка "начала торможения" первого участка торможения	по (6) $I_{y/горм.1} = \frac{ I_1  +  I_2  +  I_3 }{2 \cdot K_k \cdot K_1}$	по (1) $\frac{2841 + 2841 + 0}{2 * 1,5 * 1000 / 5} = 9,47$  по (2) $\frac{525 + 525 + 0}{2 * 1,5 * 1000 / 5} = 1,75$
Составляющая максимально возможного тока небаланса, обусловленная погрешностями ТТ, в переходном режиме внешнего КЗ	по (3) с учетом 1.3.3 $I'_{нб.расч.мах} = K_{пер} * K_{одн} * \epsilon * I_{КЗмах}$	$1 * 1 * 0,1 * 6524 = 652,4$
Составляющая максимально возможного тока небаланса, обусловленная ступенями регулирования трансформатора	по (4) с учетом 1.3.3 $I''_{нб.расч.мах} = (\Delta U_{\alpha} K_{ток \alpha} + \Delta U_{\beta} K_{ток \beta}) * I_{КЗмах}$	$(0,16 * 1 + 0) 6524 = 1043,84$
Вторичный максимально возможный ток небаланса	по (8) $I_{нб.расч.в} = \frac{(I'_{нб.расч.мах} + I''_{нб.расч.мах}) K_{сх}}{K_1}$	$\frac{(652,4 + 1043,8) * 1}{1000 / 5} = 8,48$
Вторичный максимальный удвоенный сквозной ток, от которого необходима отстройка	$( I_1  +  I_2  +  I_3 ) = \frac{( I_1 _{п} +  I_2 _{п} +  I_3 _{п})}{K_1}$	$\frac{6524 + 6524 + 0}{1000 / 5} = 65,24$

Продолжение таблицы 5.2

Наименование величин	Обозначение и метод определения	Числовые значения для расчетной стороны 11 кВ
Коэффициент первого участка торможения	<p>по (10)</p> $K_{\text{торм.1}} = \frac{I_{\text{нб,расч,max}} - I_{\text{с.з,min}}}{0.5( I_1  +  I_2  +  I_3 ) - I_{\text{у,лорм.1}}}$	<p>по (1)</p> $K_{\text{торм.1}} = \frac{8,48 - 5,54}{0,5 * 65,24 - 9,47} = \frac{2,94}{32,62 - 9,47} = \frac{2,94}{23,1} = 0,127(\alpha = 7,2\text{град})$ <p>по (2)</p> $K_{\text{торм.1}} = \frac{8,48 - 0,7875}{0,5 * 65,24 - 1,75} = \frac{7,6925}{30,8} = 0,249(\alpha = 14\text{град})$

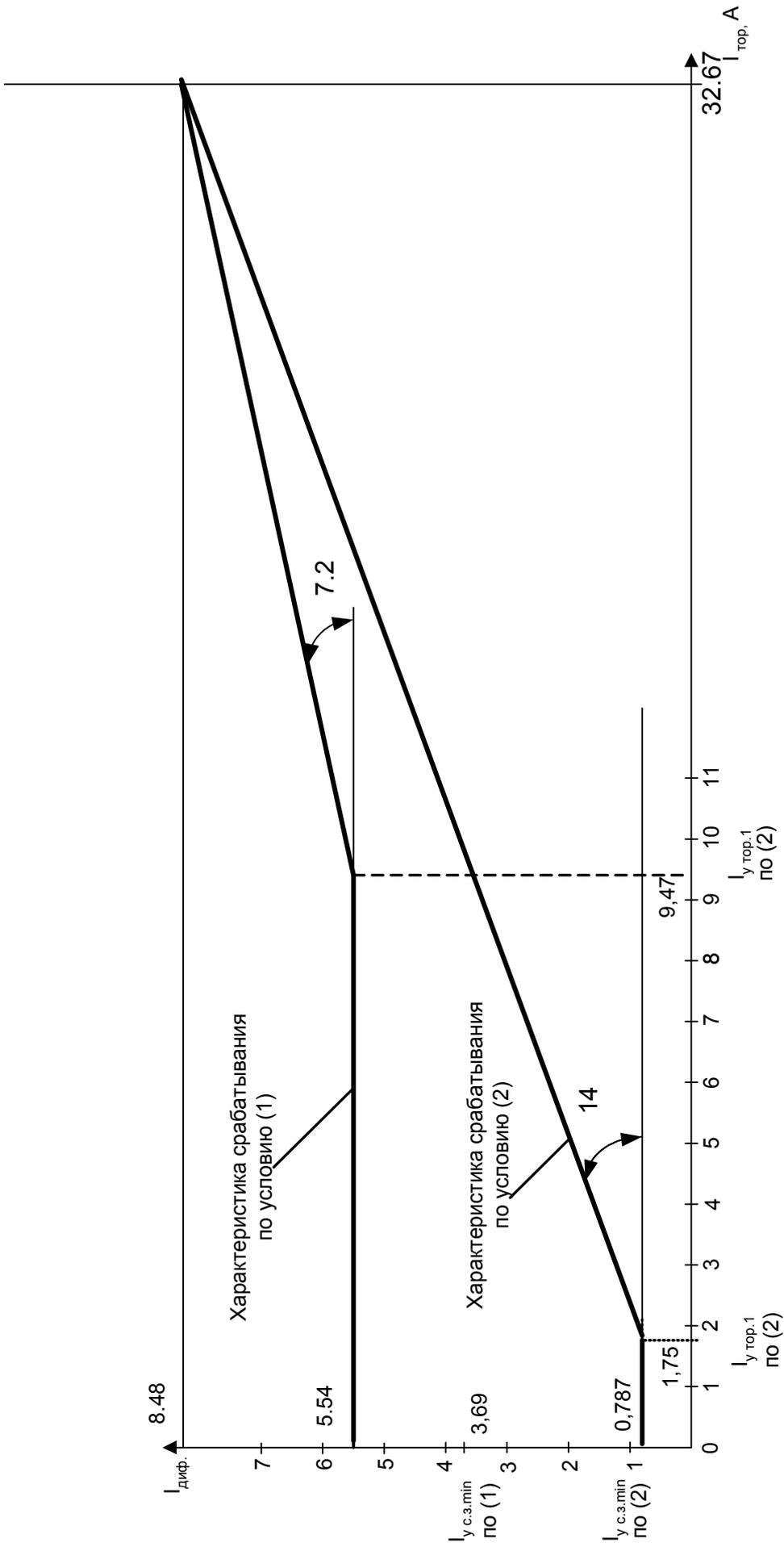


Рисунок 5.1 - Характеристика срабатывания ДЗТ по результатам расчетов таблицы 5.2

Приведенные на рисунке 5.1 характеристики срабатывания ДЗТ по результатам расчетов (таблица 5.2) показывают, что обе характеристики сходятся в одной точке, определяемой максимальным током торможения по выражению (9), обеспечивающим отстройку от максимально возможного тока небаланса по выражению (8). Защита, выбранная по условию (2), оказывается более чувствительной при малых токах

**6 Расчет дифференциальной токовой защиты с торможением на ПМ РЗА "Диамант" для трансформатора 63 МВА 150/35/10 кВ**

Исходные данные для расчета

Трансформатор TDTN – 63000/150±9х1,5%/38,5/11 кВ.

Группа Y/Y/Δ-0-11

$U_{к\text{ вн-сн}} = 10,8\%$

$U_{к\text{ вн-нн}} = 17,9\%$

$U_{к\text{ сн-нн}} = 6,24\%$ .

ВН  $I_n = 230,2 \text{ А}; U_n = 158\text{кВ}$  (9 ÷ 11 положения РПН)

$I_n = 291,05 \text{ А}$  (19 положение РПН)

СН  $I_n = 945 \text{ А}; U_n = 38,5\text{кВ}$  (при 3 положении ПВБ)

$I_n = 993 \text{ А}; U_n = 35,375 \text{ кВ}$  (при 5 положении ПВБ)

НН  $I_n = 3310\text{А}; U_n = 11 \text{ кВ}$ .

Максимальные расчетные токи КЗ

На шинах 150 кВ  $I_{\text{max}}^{(3)} = 11,786 \text{ кА}$

$I_{\text{max}}^{(1)} = 13,345 \text{ кА}$

На шинах 35 кВ  $I_{\text{max}}^{(3)} = 7,181 \text{ кА}$

На шинах 10 кВ  $I_{\text{max}}^{(3)} = 15,943 \text{ кА}$ .

Расчеты ведутся в именованных единицах в табличной форме.

Исходные расчетные данные приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовые значения для стороны		
		150кВ	38,5 кВ	11 кВ
Первичный номинальный ток защищаемого трансформатора, А	$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{номТ}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}}$	$\frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 158} = 230,2$	$\frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 38,5} = 945$	$\frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 11} = 3310$
Коэффициент трансформации трансформаторов тока	$K_I$	1000/5	1500/5	1500/5
Схема соединений трансформаторов тока	-	Y*	Y*	Y
Коэффициент схемы	$K_{\text{сх}}$	$\sqrt{3}^*$	$\sqrt{3}^*$	1
Вторичный ток в плече защиты, соответствующий номинальной мощности трансформатора, А	$I_{\text{ном. в.}} = \frac{I_{\text{ном}} K_{\text{сх}}}{K_I}$	$\frac{230,2 \cdot \sqrt{3}}{1000/5} = 1,994$	$\frac{945 \cdot \sqrt{3}}{1500/5} = 5,456$	$\frac{3310}{1500/5} = 11,033$
Коэффициент коррекции (выравнивание), коэффициенты трансформаторов тока	$K_{\text{тк}} = \frac{I_{\text{ном. осн.}}}{I_{\text{ном. неосн.}}}$	$\frac{11,033}{1,994} = 5,533$	$\frac{11,033}{5,456} = 2,022$	1

Примечание: Выравнивание токов в плечах дифзащиты по углу выполняется математически - вычитанием векторов соответствующих фазных токов со стороны обмотки трансформатора, соединенной в "звезду". Например, для трансформатора Y/Δ - 11, токи в плече дифзащиты со стороны "звезды" определяются как  $\bar{I}_{\text{пл.А}} = \bar{I}_A - \bar{I}_B$ ;  $\bar{I}_{\text{пл.В}} = \bar{I}_B - \bar{I}_C$ ,

$\bar{I}_{пл.С} = \bar{I}_C - \bar{I}_A$ . В связи с этим для выравнивания токов в плечах по модулю необходимо учитывать коэффициент схемы  $K_{сх} = \sqrt{3}$  для токов в плече со стороны обмотки трансформатора, собранной в "звезду" (п.4.3).

В таблице 6.2 приведены:

- расчеты тока небаланса в режиме, соответствующему началу торможения, по (3) и (4);
- расчеты первичного минимального тока срабатывания защиты при отсутствии торможения – по (2);
- выбор уставки "начала торможения" – по (6);
- расчет максимального расчетного тока небаланса – по (8);
- расчет коэффициента торможения первого участка.

В данном примере за расчетный ток при определении минимального тока срабатывания защиты при отсутствии торможения (1), (3), (4) принят номинальный ток расчетной стороны.

Таблица 6.2

Наименование величин	Обозначение и метод определения	Числовое значение для расчетной стороны 11 кв
Составляющая тока небаланса, определяемая погрешностью ТТ в режиме, соответствующему "началу торможения"	по (3) $I''_{\text{нб.тор.нач.}} = K_{\text{пер}} \cdot K_{\text{одн}} \cdot \epsilon I_{\text{расч.}}$	$1 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 3310 = 331$
Составляющая тока небаланса, обусловленная регулированием трансформатора в режиме, соответствующему "началу торможения"	по (4) $I''_{\text{нб.тор.нач.}} = (\Delta U_{\alpha} K_{\text{ток } \alpha} + \Delta U_{\beta} K_{\text{ток } \beta}) I_{\text{расч}}$	$(0,12 \cdot 1 + 0,08 \cdot 1) \cdot 3310 = 662$
Первичный минимальный ток срабатывания защиты при отсутствии торможения	по (1) $I_{\text{с.з.min в}} = K_{\text{отс}} (I''_{\text{нб.торм.нач.}} + I''_{\text{нб.торм.нач.}})$ по (2) $I_{\text{с.з.min}} = 0,3 I_{\text{ном}}$	по (1) $1,5(331+662)=1489,5$ по (2) $0,3 \cdot 3310 = 993$
Вторичный минимальный ток срабатывания защиты при отсутствии торможения	$I_{\text{с.з.min в}} = \frac{I_{\text{с.з.min}}}{K_{\text{ПТ}}}$	по (1) $\frac{1489,5}{1500/5} = 4,965$ по (2) $\frac{993}{1500/5} = 3,31$

Продолжение таблицы 6.2

<p>Уставка "начала торможения" первого участка торможения, приведенная к расчетной стороне</p>	<p>по (6)  <math display="block">I_{у/торм.1} = \frac{ I_1  +  I_2  +  I_3 }{2 \cdot K_k \cdot K_i}</math></p>	<p><math display="block">\frac{15943,0,86+0+15943,0,86}{2 \cdot 1,5 \cdot 1500/5} = \frac{27422}{900} = 30,5</math>  <math display="block">\frac{3310+0,3310+1,3310}{2 \cdot 1,5 \cdot 1500/5} = 7,356</math></p> <p>по (1) по (2)</p>
<p>Составляющая максимально возможного тока небаланса, обусловленная погрешностями ТТ, в переходном режиме внешнего КЗ</p>	<p>по (3) с учетом 1.3.3  <math display="block">I''_{нб.расч.мах} = K_{пер} \cdot K_{одн.} \cdot \epsilon \cdot I_{КЗмах}</math></p>	<p><math display="block">1 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 15943 = 1594,3</math></p>
<p>Составляющая максимально возможного тока небаланса, обусловленная ступенями регулирования трансформатора</p>	<p>по (4) с учетом 1.3.3  <math display="block">I''_{нб.расч.мах} = (\Delta U_{\alpha} K_{ток \alpha} + \Delta U_{\beta} K_{ток \beta}) \cdot I_{КЗмах}</math></p>	<p><math display="block">(0,12 \cdot 1 + 0,08 \cdot 1) \cdot 15943 = 3188,6</math></p>
<p>Вторичный максимально возможный ток небаланса</p>	<p>по (8)  <math display="block">I_{нб.расч.в} = \frac{(I'_{нб.расч.мах} + I''_{нб.расч.мах}) K_{сх.}}{K_i}</math></p>	<p><math display="block">\frac{(1594,3 + 3188,6) \cdot 1}{1500/5} = 15,943</math></p>
<p>Вторичный максимальный удвоенный сквозной ток, от которого необходима отстройка **</p>	<p><math display="block">( I_1  +  I_2  +  I_3 ) = \frac{( I_{1п}  +  I_{2п}  +  I_{3п} )}{K_i}</math></p>	<p><math display="block">\frac{15943+0+15943}{1500/5} = 106,29</math></p>

Продолжение таблицы 6.2

<p>Коэффициент первого участка торможения</p>	<p>по (10)</p> $K_{1гор.1} = \frac{I_{об.расч.мах} - I_{с.з.мин}}{0,5( I_1  +  I_2  +  I_3 ) - I_{у.торм1}}$	<p>по (1)</p> $K_{1гор.1} = \frac{15,943 - 4,965}{0,5 * 106,29 - 30,5} = \frac{10,978}{22,65} = 0,4847(\alpha = 25,86град)$ <p>по (2)</p> $K_{1гор.1} = \frac{15,943 - 3,31}{0,5 * 106,29 - 7,356} = \frac{12,633}{45,794} = 0,28(\alpha = 15,42град)$
---	--	--

\*Примечание: Ввиду отсутствия данных токораспределения по обмоткам ВН и СН при КЗ на стороне НН (11кВ) трансформатора, подпитка со стороны СН не учитывается.

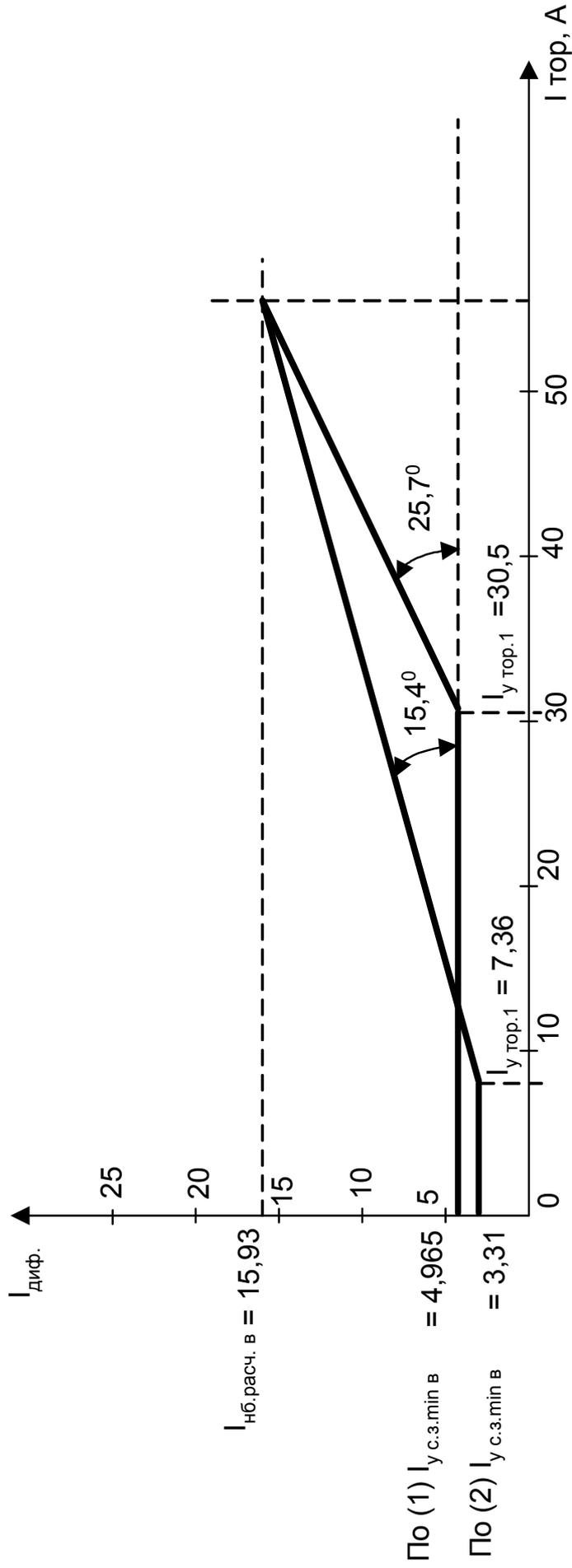


Рисунок 6.1 - Характеристика срабатывания ДЗТ по результатам расчетов таблицы 6.2

Литература

1 Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 13 Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ. Расчеты. Москва, Энергоатомиздат, 1986.

2 Реконструкция АСУ ТП АЭС. Разработка исходных данных по алгоритмам задач защит генератора и блочного трансформатора. Базовый проект 03045.ПБ.01.1-М. АО «ЛьвовОРГРЭС».