



Институт энергетики,
информационных технологий
и управляющих систем

Релейная защита и автоматика систем электрообеспечения

Практическое занятие №____. Теоретическая часть

Методика расчета уставок дифференциальной защиты трансформаторов на микропроцессорном устройстве БМРЗ-ТД

Материалы из: ЗАО «НТЦ Механотроника». ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ
35 - 220 кВ. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА. Расчет уставок
Методические указания





Содержание

1 Область применения	1
2 Обозначения и сокращения	2
3 Дифференциальная защита трансформаторов блоками БМРЗ.....	3
4 Выбор первичных ТТ и ПТН блоков БМРЗ.....	8
5 Дифференциальная токовая отсечка.....	10
6 Дифференциальная токовая защита с торможением.....	12
6.1 Общие принципы выбора уставок ДЗТ.....	12
6.2 Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ	13
6.3 Выбор уставки коэффициента торможения второго участка характеристики торможения ДЗТ	14
6.4 Выбор уставки коэффициента торможения третьего участка характеристики торможения ДЗТ	15
6.5 Проверка чувствительности ДЗТ	16
6.6 Выбор уставки сигнализации небаланса.....	18
6.7 Выбор уставок ДЗТ при наличии ТСН в зоне защиты	19
6.8 Выбор уставок блокирования ДЗТ при возникновении БТН .	20
6.9. Требования к оформлению результатов расчёта	20
7 Примеры расчёта уставок.....	21
7.1 Двухобмоточный трансформатор.....	21
7.2 Двухобмоточный трансформатор с расщеплённой обмоткой НН	28
7.3 Трёхобмоточный трансформатор	35

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ**Трансформаторы и автотрансформаторы 35 -220 кВ.****Дифференциальная токовая защита****Расчёт уставок****Методические указания**

1 Область применения

В настоящем стандарте дан комплексный подход к расчёту уставок дифференциальной токовой отсечки и дифференциальной защиты с торможением трансформаторов и автотрансформаторов, выбору диапазона измерений аналоговых каналов блоков БМРЗ, выбору уставок блокировки защиты при бросках тока намагничивания.

В стандарте приведены примеры расчёта уставок дифференциальной токовой защиты трансформаторов.

Использование стандарта позволит проектным организациям и эксплуатирующим предприятиям эффективно реализовать все функциональные возможности блоков БМРЗ, выпускаемых ООО «НТЦ «Механотроника».

2 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте приняты следующие обозначения и сокращения:

БМРЗ – блок микропроцессорный релейной защиты;

БТН – бросок тока намагничивания;

ВН – высшее напряжение;

ДЗТ – дифференциальная защита с торможением;

ДТО – дифференциальная токовая отсечка;

ИПБ – информационный признак блокирования;

КЗ – короткое замыкание;

НН – низшее напряжение;

о.е. – относительные единицы;

ПБВ – переключение без возбуждения;

ПТН – преобразователь ток - напряжение;

РПН – регулирование напряжения под нагрузкой;

СН – среднее напряжение;

ТСН – трансформатор собственных нужд;

ТТ – трансформатор тока;

ЦТ – цифровой треугольник;

Ч – чувствительный.

3 Дифференциальная защита трансформаторов блоками БМРЗ

3.1 Дифференциальную токовую защиту применяют в качестве основной быстродействующей защиты трансформаторов и автотрансформаторов от повреждений на выводах, а также от внутренних повреждений.

3.2 Подключение ТТ к блоку БМРЗ необходимо осуществлять по схеме "звезда", независимо от схем и групп соединения обмоток трансформатора¹⁾ (рисунок 3.1).

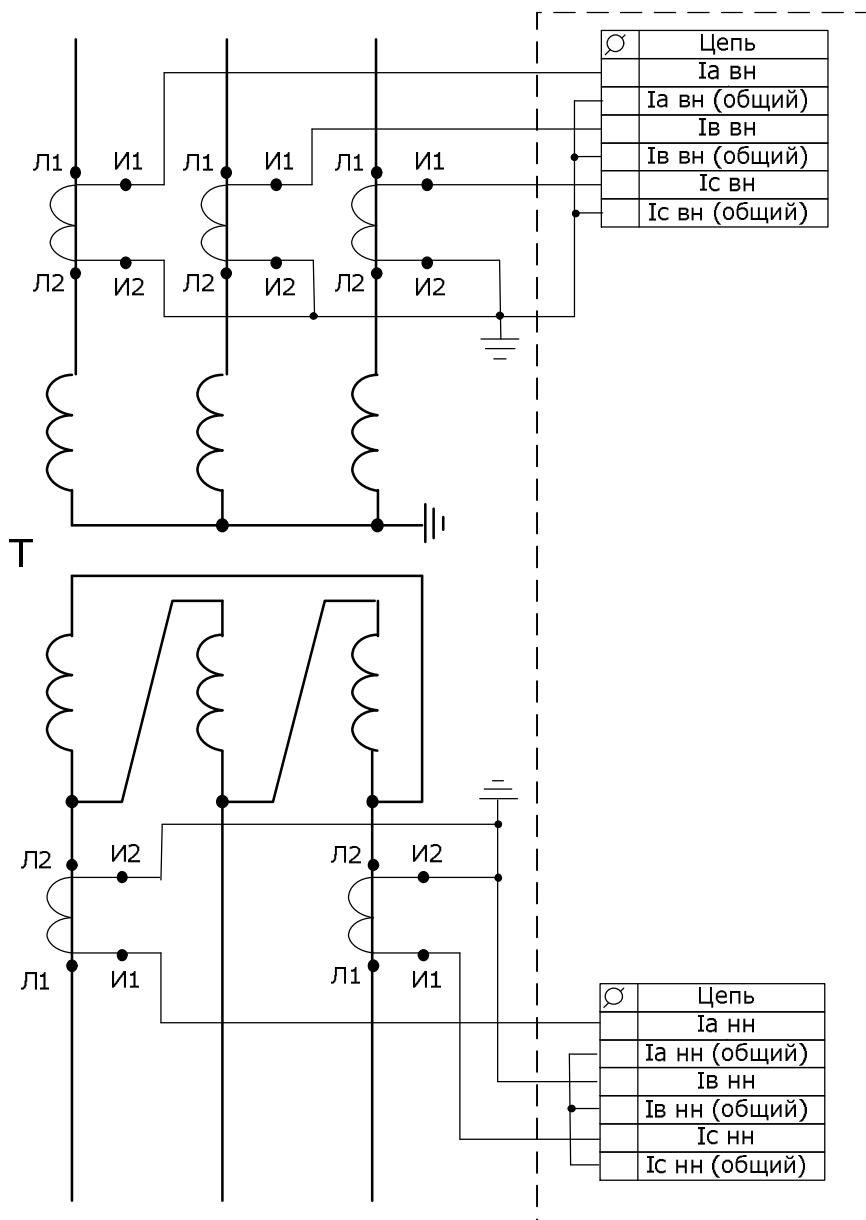


Рисунок 3.1 – Пример схемы подключения вторичных цепей ТТ к блоку БМРЗ

Подключения всех ТТ должны обеспечивать подачу вторичных токов положительного направления на входы блока (рисунок 3.1). За положительное направление токов сторон принято направление токов в сторону защищаемого объекта.

¹⁾Здесь и далее термин "трансформаторы" распространяется и на автотрансформаторы, если в тексте специально не оговорено.

Двухфазное подключение ТТ допустимо использовать только для обмоток трансформатора, соединенных по схеме "треугольник", при этом на вход тока фазы В блока необходимо подать суммарный ток фаз А и С в противофазе (рисунок 3.1).

3.3 Первичные токи в обмотках трансформатора не равны по значению и, в общем случае, не совпадают по фазе. Значения токов отличаются из-за коэффициента трансформации трансформатора. Угол сдвига фаз токов зависит от группы соединения обмоток.

Неодинаковость коэффициентов трансформации ТТ сторон трансформатора ведет к еще большему различию вторичных токов, используемых в блоке защиты.

В блоках БМРЗ предусмотрен программный учёт фактических значений коэффициентов трансформации ТТ и коэффициента трансформации трансформатора ("цифровое выравнивание"), благодаря чему не требуется применять промежуточные трансформаторы (автотрансформаторы) тока.

Коэффициенты трансформации ТТ пользователь задаёт в виде уставок.

В блоках БМРЗ предусмотрена компенсация поворота фазы при различных комбинациях схем и групп соединений обмоток защищаемого трансформатора (операция "цифровой треугольник").

Схему и группу соединений обмоток пользователь задаёт в блок БМРЗ соответствующей уставкой.

3.4 При внешнем КЗ на землю токи нулевой последовательности проходят только по фазам обмотки трансформатора, соединенной по схеме "звезда".

В обмотке, соединённой по схеме "треугольник", токи нулевой последовательности циркулируют, не выходя за пределы "треугольника". В фазных проводах данной обмотки токи нулевой последовательности отсутствуют.

Для обеспечения правильной работы дифференциальной токовой защиты при внешних однофазных КЗ в блоках БМРЗ предусмотрено исключение токов нулевой последовательности для обмоток, соединенных по схеме "звезда", из расчётов.

3.5 В блоке БМРЗ в идеальном случае в нагрузочном режиме и в режиме внешнего КЗ дифференциальный ток отсутствует.

На практике в нагрузочном режиме и режиме внешнего КЗ возникает дифференциальный ток (ток небаланса), вызванный погрешностями ТТ, изменением коэффициента трансформации трансформатора при регулировании напряжения, погрешностью выравнивания токов сторон.

Ток небаланса тем больше, чем больше значения токов сторон трансформатора.

3.6 В блоках БМРЗ дифференциальной защиты трансформатора реализованы два вида дифференциальной токовой защиты: ДТО и ДЗТ.

Уставку срабатывания ДТО задают больше максимально возможного значения тока небаланса в режиме внешнего КЗ или БТН.

При этом, во многих случаях ДТО может не обеспечить требуемый ПУЭ (см. 6.5.2) коэффициент чувствительности к КЗ.

Для обеспечения требуемого коэффициента чувствительности защиты используют ДЗТ.

Уставка срабатывания ДЗТ возрастает с увеличением тока торможения, рассчитываемого в блоке БМРЗ из токов сторон трансформатора.

3.7 Существуют исполнения блоков БМРЗ, обеспечивающие учёт текущего положения устройства регулирования напряжения.

В таких блоках дополнительно к основной ("грубой") характеристике срабатывания ДЗТ предусмотрена "чувствительная" характеристика.

При использовании "чувствительной" характеристики ДЗТ блок БМРЗ производит расчёт фактического коэффициента трансформации трансформатора, что позволяет снизить составляющую тока небаланса, обусловленную влиянием РПН (ПБВ).

"Чувствительная" характеристика ДЗТ имеет больший коэффициент чувствительности, чем "грубая" (рисунок 3.2).

Учет текущего положения устройства регулирования напряжения в блоке БМРЗ осуществлён программным способом, с учётом значений токов сторон трансформатора.

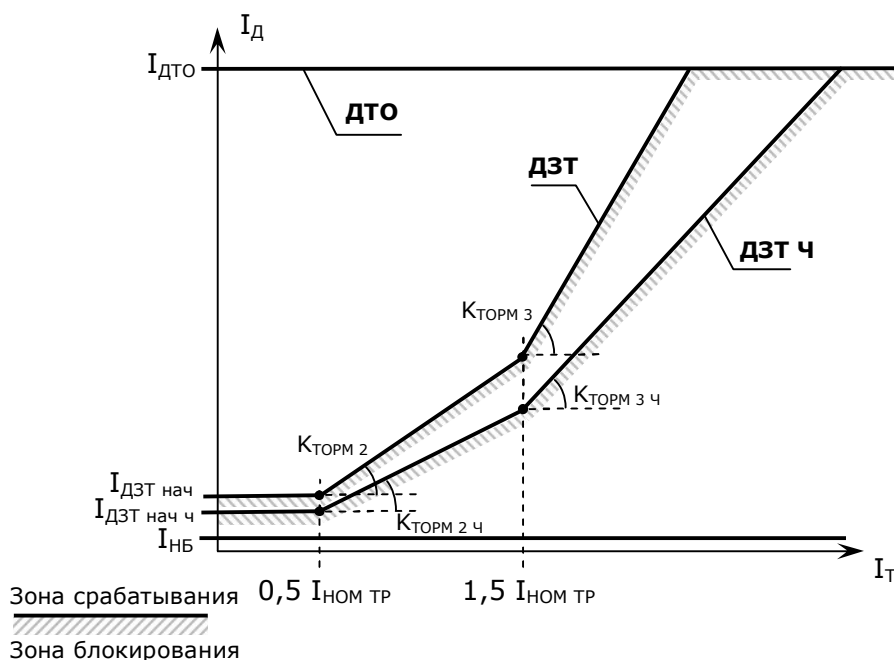


Рисунок 3.2 - Характеристики ДТО, ДЗТ и "чувствительного" органа ДЗТ (ДЗТ Ч)

3.8 Токи, полученные в блоке БМРЗ после программного исключения токов нулевой последовательности и компенсации поворота фаз, названы далее токами "контуров".

Количество таких "контуров" равно трем (по количеству соответствующих фаз). Токи каждого из "контуров" формируются из токов сторон (ВН, СН, НН) трансформатора.

Дифференциальная токовая защита в блоке БМРЗ функционирует раздельно для каждого из трёх "контуров". При срабатывании защиты хотя бы в одном из "контуров" блок БМРЗ формирует сигнал на отключение выключателей сторон трансформатора.

3.9 Дифференциальный ток вычисляется блоком БМРЗ как отношение вторичного дифференциального тока к номинальному вторичному току трансформатора и является безразмерной величиной.

Вычисление дифференциального тока в блоке БМРЗ происходит для каждого из "контуров" по формуле

$$I_D = \frac{|\dot{I}_{К ВН} + \dot{I}_{К СН(НН1)} + \dot{I}_{К НН(НН2)}|}{\frac{I_{НОМ ТР}^{ВН}}{K_{ТТ}^{ВН}}}, \quad (3.1)$$

где $\dot{I}_{К ВН}$, $\dot{I}_{К СН(НН1)}$, $\dot{I}_{К НН(НН2)}$ - векторы вторичных токов сторон "контура", приведенные к стороне ВН, А;

$I_{НОМ ТР}^{ВН}$ - номинальный первичный ток стороны ВН, А;

$K_{ТТ}^{ВН}$ - коэффициент трансформации ТТ стороны ВН.

Формула (3.1) приведена применительно к трёхобмоточному трансформатору и трансформатору с расщепленной обмоткой стороны НН.

Для двухобмоточного трансформатора расчет дифференциального тока производится для двух сторон, т.е. слагаемое $\dot{I}_{К СН(НН1)}$ в формуле (3.1) отсутствует.

Номинальный первичный ток трансформатора для любой из сторон (ВН, СН или НН) можно рассчитать по формуле

$$I_{НОМ ТР} = \frac{S_{НОМ ТР}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ ТР}}, \quad (3.2)$$

где $S_{НОМ ТР}$ - номинальная мощность трансформатора, В·А;

$U_{НОМ ТР}$ - номинальное напряжение стороны трансформатора, относительно которой производят расчет, В.

3.10 Ток торможения для трёхобмоточного трансформатора и трансформатора с расщеплённой обмоткой НН, являющийся безразмерной величиной, блок БМРЗ вычисляет для каждого из "контуров" по формул

$$I_T = \frac{|\dot{I}_{К ВН}| + |\dot{I}_{К СН(НН1)}| + |\dot{I}_{К НН(НН2)}|}{2 \cdot \frac{I_{НОМ ТР}^{ВН}}{K_{ТТ}^{ВН}}}. \quad (3.3)$$

Для двухобмоточного трансформатора расчет производится для двух сторон, т.е. слагаемое $\dot{I}_{К СН(НН1)}$ в формуле (3.1) отсутствует.

3.11 Вычисление векторов вторичных токов сторон (ВН, СН или НН) "контуров" в блоке БМРЗ происходит в зависимости от схемы и группы соединения обмоток трансформатора.

3.11.1 Для обмоток со схемой соединения "треугольник" токи стороны "контуров" соответствуют фазным токам

$$\dot{I}_{К1} = \dot{I}_A, \quad (3.4)$$

$$\dot{I}_{К2} = \dot{I}_B, \quad (3.5)$$

$$\dot{I}_{К3} = \dot{I}_C, \quad (3.6)$$

где \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C - векторы вторичных фазных токов.

3.11.2 Для двух- и трехобмоточных трансформаторов со схемой соединения всех обмоток "звезда" в блоке БМРЗ происходит программное исключение токов нулевой последовательности для всех сторон

$$\dot{I}_{K1} = \dot{I}_A - \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{3}, \quad (3.7)$$

$$\dot{I}_{K2} = \dot{I}_B - \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{3}, \quad (3.8)$$

$$\dot{I}_{K3} = \dot{I}_C - \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{3}. \quad (3.9)$$

3.11.3 Для прочих схем соединения обмоток трансформатора для сторон со схемой соединения "звезда" выполняется программное исключение токов нулевой последовательности и компенсация поворота фазы по правилам "ЦТ-1" или "ЦТ-11".

Операции по правилу "ЦТ-1" выполняются по формулам (3.10) – (3.12)

$$\dot{I}_{K1} = \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_C}{\sqrt{3}}, \quad (3.10)$$

$$\dot{I}_{K2} = \frac{\dot{I}_B - \dot{I}_A}{\sqrt{3}}, \quad (3.11)$$

$$\dot{I}_{K3} = \frac{\dot{I}_C - \dot{I}_B}{\sqrt{3}}. \quad (3.12)$$

Операции по правилу "ЦТ-11" выполняются по формулам (3.13) – (3.15)

$$\dot{I}_{K1} = \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_B}{\sqrt{3}}, \quad (3.13)$$

$$\dot{I}_{K2} = \frac{\dot{I}_B - \dot{I}_C}{\sqrt{3}}, \quad (3.14)$$

$$\dot{I}_{K3} = \frac{\dot{I}_C - \dot{I}_A}{\sqrt{3}}. \quad (3.15)$$

Если напряжение обмотки со схемой соединения "звезда" выше напряжения обмотки со схемой соединения "треугольник", операции выполняются:

- по правилу "ЦТ-1" для группы соединения обмоток 1;
- по правилу "ЦТ-11" для группы соединения обмоток 11.

Если напряжение обмотки со схемой соединения "звезда" ниже напряжения обмотки со схемой соединения "треугольник", операции выполняются:

- по правилу "ЦТ-1" для группы соединения обмоток 11;
- по правилу "ЦТ-11" для группы соединения обмоток 1.

3.12 Ток намагничивания трансформатора, значение которого в несколько раз превосходит значение номинального тока, появляется только в той обмотке, на которую подается напряжение (при включении трансформатора под напряжение или при восстановлении напряжения после отключения внешнего КЗ). Этот ток имеет затухающий характер и может вызвать срабатывание защиты в случае превышения БТН уставки ДЗТ.

Для предотвращения срабатывания защиты при возникновении БТН в блоках БМРЗ предусмотрена возможность блокирования ДЗТ по результатам гармонического анализа дифференциальных токов.

Известно [1], что в апериодическом БТН доля второй гармоники составляет около 15 %. В периодическом БТН доля второй гармонической составляющей намного больше и составляет до 40 %. Поэтому, в качестве признака наличия БТН использовано процентное соотношение второй и первой гармоники в дифференциальном токе.

3.13 При схеме соединения обмоток "треугольник" и разновременном включении фаз при включении трансформатора в режиме, близком к холостому ходу, дифференциальный ток состоит из тока небаланса и БТН.

В таком случае возможна взаимная компенсация второй гармонической составляющей, обусловленной возникновением БТН, и кратковременной гармонической составляющей переходного процесса включения.

В этом случае, из-за недостаточного значения второй гармонической составляющей в дифференциальном токе, возможны отказы блокирования ДЗТ и срабатывания защиты.

Поэтому в блоках БМРЗ дополнительно используется четвертая гармоническая составляющая дифференциального тока.

3.14 Блокирование ДЗТ блок БМРЗ осуществляет отдельно для каждого из "контуров" при превышении значением ИПБ заданной уставки.

Вычисление значения ИПБ для каждого из "контуров" в блоке БМРЗ происходит по формуле

$$ИПБ = \frac{|I_{(100) \text{ диф}}| + |I_{(200) \text{ диф}}|}{|I_{(50) \text{ диф}}|}, \quad (3.16)$$

где $|I_{(100) \text{ диф}}|$ – действующее значение второй гармоники в дифференциальном токе;

$|I_{(200) \text{ диф}}|$ – действующее значение четвертой гармоники в дифференциальном токе;

$|I_{(50) \text{ диф}}|$ – действующее значение первой гармоники в дифференциальном токе.

3.15 Для повышения эффективности блокирования защиты в режиме, сопровождающемся БТН, в блоках БМРЗ предусмотрена возможность перекрёстного блокирования ДЗТ, когда при превышении ИПБ заданной уставки хотя бы для одного из "контуров" происходит блокирование ДЗТ всех "контуров".

Длительность действия перекрёстного режима блокирования ограничена уставкой по времени, задаваемой в блоке.

Перекрёстное блокирование может привести к замедлению действия защиты в случае наложения режима КЗ на режим, сопровождающийся возникновением БТН [2].

Использование данного режима блокирования защиты может быть рекомендовано лишь в некоторых случаях, о которых написано ниже (см. 6.8.2).

4 Выбор первичных ТТ и ПТН блоков БМРЗ

4.1 ТТ должны удовлетворять требованиям по их применению в цепях релейной защиты (в том числе и по условиям термической стойкости вторичных цепей) и должны быть проверены в соответствии с РД 153-34.0-35.301-2002 [3].

4.2 На этапе проверки ТТ в соответствии с [3] необходимо рассчитать значения полных относительных погрешностей ТТ сторон трансформатора:

- $\varepsilon_{\text{МАКС}}$ - соответствующие максимальному фазному току внешнего КЗ, протекающему через ТТ;
- $\varepsilon_{\text{МИН}}$ - соответствующие минимальному фазному току КЗ в зоне действия защиты, протекающему через ТТ;
- $\varepsilon_{0,5}$ - соответствующие половине номинального значения тока трансформатора;
- $\varepsilon_{\text{раб макс}}$ - соответствующие значению максимального рабочего тока трансформатора;
- $\varepsilon_{1,5}$ - соответствующие полутора номинальным значениям тока трансформатора.

С целью упрощения расчёта допустимо:

- принять значение погрешности $\varepsilon_{\text{МАКС}}$ равным 0,1 при условии, что реальная кратность тока КЗ не превосходит номинальную¹⁾ и реальная нагрузка на вторичные цепи ТТ не превосходит номинальную;
- принять значения погрешностей $\varepsilon_{\text{МИН}}$, $\varepsilon_{0,5}$, $\varepsilon_{\text{раб макс}}$ и $\varepsilon_{1,5}$ равными 0,1 при условии, что значение $\varepsilon_{\text{МАКС}}$ не превосходит 0,1.

4.3 В некоторых блоках БМРЗ предусмотрена настройка ПТН аналоговых входов, определяющих диапазоны измерения вторичных токов.

Для обеспечения правильного измерения максимально тока КЗ, проходящего через ТТ, значение верхней границы диапазона измерений ПТН измерительного канала $i_{\text{МАКС ПТН}}$ должно удовлетворять следующему условию

$$i_{\text{МАКС ПТН}} \geq k_{\text{ПЕР}} \cdot \frac{I_{\text{К МАКС}}}{K_{\text{ТТ}}}, \quad (4.1)$$

где $k_{\text{ПЕР}} = 2$ - коэффициент, учитывающий переходный режим (наличие апериодической составляющей тока);

$I_{\text{К МАКС}}$ - периодическая составляющая максимального фазного тока КЗ (как правило, трехфазного металлического КЗ), протекающего через ТТ (в начальный момент времени КЗ), А;

$K_{\text{ТТ}}$ - коэффициент трансформации ТТ.

Настройка ПТН осуществляется путем программного выбора номинального тока измерительного канала $I_{\text{НОМ ПТН}}$ из ряда значений. Номинальный ток измерительного канала $I_{\text{НОМ ПТН}}$ и соответствующие ему диапазоны измерений приведены в руководствах по эксплуатации на блоки БМРЗ.

Для всех ПТН допускается работа с ТТ, имеющими номинальное значение вторичного тока 1 или 5 А.

В случае, если из-за слишком большого значения тока КЗ выбрать ПТН вышеуказанным способом не удаётся, следует выбрать ПТН с максимально

¹⁾ Для ТТ, выпущенных в соответствии с ГОСТ 7746-55, действительная кратность первичного тока, соответствующая 10 % погрешности, может быть на 20 % ниже номинальной, установленной заводом-изготовителем.

возможным значением $i_{\text{МАКС ПТН}}$, обращая особое внимание на выполнение условий, изложенных в п. 4.1.

При выборе номинальных токов ПТН может потребоваться соблюдение и иных условий, приведенных в руководстве по эксплуатации на блок релейной защиты.

4.4 Выбранные в соответствии с п. 4.3 ПТН необходимо проверить по условию обеспечения заданной погрешности измерения тока нагрузочного режима по соотношению (4.2) для ПТН с токами $I_{\text{НОМ ПТН}}$, равными 5 А и 2,5 А, и по соотношению (4.3) для ПТН с токами $I_{\text{НОМ ПТН}}$, равными 1 А и 0,5 А.

$$I_{\text{НОМ ПТН}} \leq 6 \cdot \frac{I_{\text{НОМ ТР}}}{K_{\text{ТТ}}} \quad (4.2)$$

$$I_{\text{НОМ ПТН}} \leq 3 \cdot \frac{I_{\text{НОМ ТР}}}{K_{\text{ТТ}}} \quad (4.3)$$

5 Дифференциальная токовая отсечка

5.1 Уставку срабатывания ДТО в долях от номинального тока трансформатора выбирают такой, чтобы обеспечить отстройку от:

- БТН;
- расчётного максимального тока небаланса.

Из двух полученных значений в качестве уставки срабатывания ДТО следует принять наибольшее значение

5.2 Для отстройки от броска тока намагничивания уставку $I_{\text{ДТО}}$ рекомендуется принять от 4 до 5 о.е. номинальных значений тока трансформатора¹⁾.

5.3 Для отстройки от расчётного максимального тока небаланса значение уставки $I_{\text{ДТО}}$ определяют по формуле

$$I_{\text{ДТО}} = K_{\text{ОТС}} \cdot I_{\text{НБ расч}} \quad (5.1)$$

где $K_{\text{ОТС}}$ = от 1,15 до 1,3 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас;

$I_{\text{НБ расч}}$ – относительный расчётный максимальный ток небаланса, соответствующий максимальному току внешнего КЗ, проходящему через трансформатор.

$$I_{\text{НБ расч}} = |I'_{\text{НБ расч}}| + |I''_{\text{НБ расч}}| + |I'''_{\text{НБ расч}}|, \quad (5.2)$$

где $I'_{\text{НБ расч}}$ – составляющая, обусловленная погрешностью ТТ;

$I''_{\text{НБ расч}}$ – составляющая, обусловленная регулированием напряжения защищаемого трансформатора;

¹⁾ Диапазон принят с учётом подавления апериодической составляющей тока при цифровой обработке сигналов в блоке БМРЗ.

$I'''_{НБ\ расч}$ - составляющая, обусловленная неточностью выравнивания токов плеч.

Составляющие относительного расчетного тока небаланса $I'_{НБ\ расч}$, $I''_{НБ\ расч}$ и $I'''_{НБ\ расч}$ вычисляют по формулам (5.3)-(5.5)

$$I'_{НБ\ расч} = k_{ПЕР} \cdot k_{одн} \cdot \varepsilon_{МАКС} \cdot \frac{I_{К\ МАКС}}{I_{НОМ\ ТР}^{ВН}}, \quad (5.3)$$

$$I''_{НБ\ расч} = (U_{РЕГ1} \cdot k_{ТОК1} + U_{РЕГ2} \cdot k_{ТОК2}) \cdot \frac{I_{К\ МАКС}}{I_{НОМ\ ТР}^{ВН}}, \quad (5.4)$$

$$I'''_{НБ\ расч} = \gamma \cdot \frac{I_{К\ МАКС}}{I_{НОМ\ ТР}^{ВН}}. \quad (5.5)$$

где $k_{ПЕР} = 2,5$ - коэффициент, учитывающий увеличение погрешности ТТ в переходном режиме при наличии апериодической составляющей тока;

$k_{одн} = 1$ - коэффициент однотипности ТТ;

$\varepsilon_{МАКС}$ - максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем току $I_{К\ МАКС}$ (см. 4.2);

$I_{К\ МАКС}$ - периодическая составляющая максимального фазного тока внешнего КЗ (как правило, трехфазного металлического КЗ), протекающего через ТТ (в начальный момент времени КЗ), приведенная к стороне ВН, А;

$I_{НОМ\ ТР}^{ВН}$ - номинальный первичный ток стороны ВН, А;

$U_{РЕГ1}$, $U_{РЕГ2}$ - относительные погрешности, обусловленные регулированием напряжения на сторонах защищаемого трансформатора;

$k_{ТОК1}$, $k_{ТОК2}$ - коэффициенты токораспределения, равные отношению тока, проходящего по стороне, где производится регулирование напряжения, в режиме рассматриваемого внешнего КЗ к току КЗ;

$\gamma = 0,05$ - относительная погрешность цифрового выравнивания токов плеч.

Относительные погрешности принимают равными половине используемого диапазона регулирования ($U_{РЕГ1(2)} = \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}$, где n - количество ступеней регулирования, ΔU - шаг регулирования напряжения, %), но не менее 0,05.

В случае использования устройства ПБВ принимают $U_{РЕГ1(2)} = 0,05$.

Для упрощения расчетов допустимо принимать предельные значения коэффициентов $k_{ТОК1} = k_{ТОК2} = 1$, учитывая, что это ведет к снижению коэффициента чувствительности защиты.

Формула (5.4) составлена применительно к трехобмоточному трансформатору (автотрансформатору).

Для двухобмоточного трансформатора в правой части формулы (5.4) слагаемое $U_{РЕГ2} \cdot k_{ТОК2}$ не учитывают, а слагаемое $k_{ТОК1}$ принимают равным 1 (см. пример расчёта уставок в 7.1).

5.1.4 Согласно [4] проверку чувствительности ДТО не производят.

6 Дифференциальная токовая защита с торможением

6.1 Общие принципы выбора уставок ДЗТ

6.1.1 Для уменьшения составляющей тока небаланса $I''_{НБ\ расч}$, вызванной регулированием напряжения, и повышения коэффициента чувствительности ДЗТ выпускают исполнения блоков БМРЗ, в которых обеспечивается учёт текущего положения устройства регулирования напряжения.

6.1.2 В таких исполнениях блоков БМРЗ предусмотрено два набора уставок ДЗТ: "грубые" и "чувствительные".

6.1.3 Расчёт "грубых" уставок производят для среднего положения регулятора напряжения, учитывая максимально возможное значение относительного тока небаланса, при отклонении регулятора напряжения на половину диапазона регулирования.

В большинстве случаев, в процессе эксплуатации трансформатора используют не весь диапазон регулирования (положение регулятора редко находится в положении, соответствующем максимальному значению $I''_{НБ\ расч}$), что приводит к использованию завышенных уставок ДЗТ.

В некоторых случаях, при включении реактора на стороне НН в зону защиты это может привести к невыполнению требований ПУЭ [5], установленных для коэффициента чувствительности защиты к металлическим КЗ за реактором.

6.1.4 Увеличение коэффициента чувствительности ДЗТ можно добиться путем снижения составляющей относительного тока небаланса $I''_{НБ\ расч}$ при автоматическом учёте текущего положения устройства регулирования напряжения, выполняемого алгоритмом ДЗТ БМРЗ.

6.1.5 Расчёт "чувствительных" уставок защиты, использующей информацию о текущем положении РПН, производят для значения тока $I''_{НБ\ расч}$, вызванного отклонением регулятора напряжения от текущего положения на три ступени, но не менее чем на 5 % от номинального напряжения.

6.1.6 Переключение между группами "грубых" и "чувствительных" уставок происходит в блоках БМРЗ автоматически. Условия переключения приведены в руководстве по эксплуатации на конкретное исполнение блока.

6.1.7 При превышении значением относительного дифференциального тока I_d уставки $I_{НБ}$ в течение времени, задаваемого уставкой $T_{НБ}$, блок БМРЗ формирует сигнал "Небаланс".

Уставку по времени $T_{НБ}$ задают исходя из условия отстройки от максимального времени действия резервных защит трансформатора.

6.1.8 При наличии ТСН в зоне действия защиты расчёт уставок необходимо выполнять учитывая следующее:

- уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\ нач}$ отстраивают от дифференциального тока в защите, вызванного КЗ за ТСН;
- уставку сигнализации небаланса $I_{НБ}$ отстраивают от максимального рабочего тока ТСН.

6.2 Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ

6.2.1 Уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\text{ нач}}$ выбирают из условия отстройки от расчетного максимального тока небаланса в нагрузочном режиме по аналогии с 5.3.

6.2.2 Для блоков БМРЗ, учитывающих текущее положение РПН, расчет выполняют дважды, сначала для группы "грубых" уставок, а затем для группы "чувствительных" уставок.

Если регулирование напряжения не применяется, "чувствительные" уставки следует принимать равными "грубым".

6.2.3 Уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\text{ нач}}$ вычисляют по формуле

$$I_{ДЗТ\text{ нач}} = K_{ОТС} \cdot I_{НБ\text{ расч}}, \quad (6.1)$$

где $K_{ОТС}$ = от 1,5 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас.

6.2.4 Значение тока $I_{НБ\text{ расч}}$ для трёхобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов находят по формуле (6.2), а для двухобмоточных трансформаторов и трансформатора с расщепленной обмоткой по формуле (6.3) учитывая, что характеристика торможения имеет первый излом при значении тока торможения $0,5 I_{НОМ\text{ ТР}}$

$$I_{НБ\text{ расч}} = 0,5 \cdot (k_{ПЕР} \cdot k_{ОДН} \cdot \varepsilon_{0,5} + U_{РЕГ1} \cdot k_{ТОК1} + U_{РЕГ2} \cdot k_{ТОК2} + \gamma), \quad (6.2)$$

$$I_{НБ\text{ расч}} = 0,5 \cdot (k_{ПЕР} \cdot k_{ОДН} \cdot \varepsilon_{0,5} + U_{РЕГ} + \gamma), \quad (6.3)$$

где $k_{ПЕР} = 1$ – коэффициент, учитывающий переходный режим (принято отсутствие апериодической составляющей тока в нагрузочном режиме);

$k_{ОДН} = 1$ – коэффициент однотипности ТТ;

$\varepsilon_{0,5}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем $0,5 I_{НОМ\text{ ТР}}$ (см. 4.2);

$U_{РЕГ1}, U_{РЕГ2}$ – относительные погрешности, обусловленные регулированием напряжения на сторонах защищаемого трансформатора;

$k_{ТОК1}, k_{ТОК2}$ – коэффициенты токораспределения, равные отношению тока, проходящего по стороне, где производится регулирование напряжения, в режиме рассматриваемого внешнего КЗ к току КЗ;

$\gamma = 0,05$ – относительная погрешность цифрового выравнивания токов плеч.

Для группы "грубых" уставок относительные погрешности принимают равными половине используемого диапазона регулирования ($U_{РЕГ1(2)} = \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}$, где n – количество ступеней регулирования, ΔU – шаг регулирования напряжения, %), но не менее 0,05.

Для группы "чувствительных" уставок принимают $U_{РЕГ1(2)} = 3 \cdot \Delta U / 100$ (ΔU - шаг регулирования напряжения, %), но не менее 0,05.

В случае использования устройства ПБВ принимают $U_{РЕГ1(2)} = 0,05$.

В целях упрощения расчетов допустимо принимать предельные значения коэффициентов $k_{ТОК 1} = k_{ТОК 2} = 1$, учитывая, что это ведет к снижению коэффициента чувствительности защиты.

6.2.5 Если значение уставки $I_{ДЗТ нач}$, полученное в ходе расчёта, меньше минимально возможного для ввода в блок значения (согласно руководству по эксплуатации на конкретное исполнение блока БМРЗ), то в качестве значения уставки и для дальнейших расчётов в качестве уставки $I_{ДЗТ нач}$ следует принять минимально возможное для ввода в блок значение.

6.2.6 Значение уставки $I_{ДЗТ нач}$ не рекомендуется выбирать менее 0,3 о.е.

По данным [2] ДЗТ с уставкой $I_{ДЗТ нач}$ от 0,3 до 0,5 о.е. обеспечивает требуемый коэффициент чувствительности к витковым замыканиям в переплетённых обмотках и межкатушечным замыканиям в любых обмотках.

6.3 Выбор уставки коэффициента торможения второго участка характеристики торможения ДЗТ

6.3.1 Коэффициент торможения $K_{ТОРМ 2}$ второго участка характеристики торможения ДЗТ выбирают исходя из условия отстройки тока срабатывания защиты от расчетного тока небаланса при токе торможения, соответствующем концу второго участка.

Второй участок характеристики торможения соответствует токам торможения от 0,5 до 1,5 $I_{НОМ ТР}$ (рисунок 3.2).

Для блоков БМРЗ, учитывающих текущее положение РПН, расчет выполняют дважды, сначала для группы "грубых" уставок, а затем для группы "чувствительных" уставок.

Если регулирование напряжения не применяется, "чувствительные" уставки следует принимать равными "грубым".

6.3.2 Коэффициент торможения $K_{ТОРМ 2}$ рассчитывают по формуле

$$K_{ТОРМ 2} = \frac{I_{ДЗТ 2} - I_{ДЗТ нач}}{1,5 - 0,5} = I_{ДЗТ 2} - I_{ДЗТ нач}, \quad (6.4)$$

где $I_{ДЗТ 2}$ – ток срабатывание ДЗТ при токе торможения 1,5 $I_{НОМ ТР}$;

$I_{ДЗТ нач}$ – уставка начального тока срабатывания ДЗТ.

6.3.3 Ток срабатывание ДЗТ $I_{ДЗТ 2}$ рассчитывают по формуле

$$I_{ДЗТ 2} = K_{ОТС} \cdot I_{НБ расч 2}, \quad (6.5)$$

где $K_{ОТС}$ = от 1,15 до 1,3 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас;

$I_{НБ расч 2}$ – расчетное относительное значение тока небаланса, соответствующее току торможения 1,5 $I_{НОМ ТР}$.

6.3.4 Значение тока $I_{НБ\ расч 2}$ для трёхобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов находят по формуле (6.6), а для двухобмоточных трансформаторов и трансформатора с расщепленной обмоткой по формуле (6.7) учитывая, что характеристика торможения имеет второй излом при значении тока торможения $1,5 I_{НОМ\ ТР}$.

$$I_{НБ\ расч 2} = 1,5 \cdot (k_{ПЕР} \cdot k_{ОДН} \cdot \varepsilon_{1,5} + U_{РЕГ1} \cdot k_{ТОК 1} + U_{РЕГ2} \cdot k_{ТОК 2} + \gamma), \quad (6.6)$$

$$I_{НБ\ расч 2} = 1,5 \cdot (k_{ПЕР} \cdot k_{ОДН} \cdot \varepsilon_{1,5} + U_{РЕГ} + \gamma), \quad (6.7)$$

Где $k_{ПЕР} = 2$ – коэффициент, учитывающий увеличение погрешности ТТ в переходном режиме при наличии апериодической составляющей тока;

$k_{ОДН} = 1$ – коэффициент однотипности ТТ;

$\varepsilon_{1,5}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем $1,5 I_{НОМ\ ТР}$ (см. 4.2);

$U_{РЕГ1}, U_{РЕГ2}$ – относительные погрешности, обусловленные регулированием напряжения на сторонах защищаемого трансформатора;

$k_{ТОК 1}, k_{ТОК 2}$ – коэффициенты токораспределения, равные отношению тока, проходящего по стороне, где производится регулирование напряжения, в режиме рассматриваемого внешнего КЗ к току КЗ;

$\gamma = 0,05$ – относительная погрешность цифрового выравнивания токов плеч.

Для группы "грубых" уставок относительные погрешности принимают равными половине используемого диапазона регулирования ($U_{РЕГ1(2)} = \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}$, где n – количество ступеней регулирования, ΔU – шаг регулирования напряжения, %), но не менее 0,05.

Для группы "чувствительных" уставок принимают $U_{РЕГ1(2)} = 3 \cdot \Delta U / 100$ (ΔU – шаг регулирования напряжения, %), но не менее 0,05.

В случае использования устройства ПБВ принимают $U_{РЕГ1(2)} = 0,05$.

В целях упрощения расчетов допустимо принимать предельные значения коэффициентов $k_{ТОК 1} = k_{ТОК 2} = 1$, учитывая, что это ведет к снижению коэффициента чувствительности защиты.

6.3.5 Если значение $K_{ТОРМ 2}$, полученное в ходе расчёта, меньше минимально возможного для ввода в блок значения (согласно руководству по эксплуатации на конкретное исполнение блока БМРЗ), то в качестве значения уставки и для дальнейших расчётов в качестве коэффициента $K_{ТОРМ 2}$ следует принять минимально возможное для ввода в блок значение.

6.4 Выбор уставки коэффициента торможения третьего участка характеристики торможения ДЗТ

6.4.1 Коэффициент торможения $K_{ТОРМ 3}$ третьего участка характеристики торможения ДЗТ выбирают исходя из условия отстройки тока срабатывания защиты от расчетного тока небаланса при максимальном токе внешнего КЗ.

Для блоков БМРЗ, учитывающих текущее положение РПН, расчет выполняют дважды, сначала для группы "грубых" уставок, а затем для группы "чувствительных" уставок.

Если регулирование напряжения не применяется, "чувствительные" уставки следует принимать равными "грубым".

6.4.2 Коэффициент торможения $K_{ТОРМ 3}$ третьего участка характеристики торможения ДЗТ рассчитывают по формуле

$$K_{ТОРМ 3} = \frac{I_{ДТО} - I_{ДЗТ 2}}{I_{К торм} - I_{ТОРМ 2}}, \quad (6.8)$$

где $I_{ДТО}$ – уставка срабатывания ДТО, выбранная по 5.3;

$I_{ДЗТ 2}$ – ток срабатывания ДЗТ при токе торможения $1,5 I_{НОМ ТР}$;

$I_{К торм}$ – ток торможения, соответствующий максимальному току внешнего КЗ;

$I_{ТОРМ 2} = 1,5$ – ток торможения, соответствующий второму излому характеристики торможения.

При расчёте коэффициента торможения третьего участка группы "чувствительных" уставок вместо значения тока $I_{ДТО}$ следует использовать значение тока $I_{ДТО ч}$.

Значение тока $I_{ДТО ч}$ следует рассчитывать аналогично значению тока $I_{ДТО}$, заменив в формуле (5.4) $U_{РЕГ1}$, $U_{РЕГ2}$ на значения, равные $3 \cdot \Delta U / 100$ (ΔU – шаг регулирования напряжения в процентах), но не менее 0,05.

6.4.3 Ток торможения $I_{К торм}$, соответствующий максимальному току внешнего КЗ, вычисляют по формуле

$$I_{К торм} = \left(1 - \frac{k_{ПЕР} \cdot \varepsilon_{МАКС}}{2} \right) \cdot \frac{I_{К МАКС}}{I_{НОМ ТР}^{ВН}}, \quad (6.9)$$

где $k_{ПЕР} = 2,5$ – коэффициент, учитывающий увеличение погрешности ТТ в переходном режиме при наличии апериодической составляющей тока;

$I_{К МАКС}$ – периодическая составляющая максимального фазного тока внешнего КЗ (как правило, трехфазного металлического КЗ), протекающего через ТТ (в начальный момент времени КЗ), приведенная к стороне ВН, А;

$\varepsilon_{МАКС}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем току $I_{К МАКС}$ (см. 4.2);

$I_{НОМ ТР}^{ВН}$ – номинальный вторичный ток стороны ВН трансформатора (автотрансформатора).

6.5 Проверка чувствительности ДЗТ

6.5.1 Согласно руководящим указаниям [4], чувствительность ДЗТ следует определять при металлическом КЗ на выводах защищаемого трансформатора, при его работе на расчётном ответвлении.

Расчётными режимами работы подстанции и питающих систем являются реальные режимы, обуславливающие минимальный ток при расчётном виде КЗ.

6.5.2 Согласно ПУЭ [5] коэффициент чувствительности защиты должен быть около 2.

Если обеспечение этого или близкого значения коэффициента чувствительности связано со значительным усложнением защиты или технически невозможно, допустимо снижение коэффициента чувствительности дифференциальной защиты до значения около 1,5 в следующих случаях:

- при КЗ на выводах низшего напряжения трансформатора мощностью менее 80 МВ·А;
- в режиме включения трансформатора под напряжение, а также для кратковременных режимов его работы (например, при отключении одной из питающих сторон);
- в режиме КЗ за реактором, установленным на стороне низшего напряжения и входящим в зону дифференциальной защиты.

Чувствительность дифференциальной защиты трансформатора при КЗ за реактором допустимо не обеспечивать при наличии других защит, охватывающих реактор и удовлетворяющих требованиям чувствительности.

6.5.3 Коэффициент чувствительности ДЗТ при металлическом КЗ определяют по формуле

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{К МИН}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{МИН}})}{I_{\text{НОМ ТР}}^{\text{ВН}} \cdot I_{\text{ДЗТ нач}}}, \quad (6.10)$$

где $I_{\text{К МИН}}$ – минимальное значение периодической составляющей тока КЗ в защищаемой зоне, приведённое к стороне ВН, А;

$\varepsilon_{\text{МИН}}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем току $I_{\text{К МИН}}$ (см. 4.2);

$I_{\text{НОМ ТР}}^{\text{ВН}}$ – номинальный первичный ток стороны ВН, А;

$I_{\text{ДЗТ нач}}$ – уставка начального тока срабатывания ДЗТ.

6.5.4 При питании места повреждения с двух сторон критерий надежного срабатывания ДЗТ при внутреннем КЗ на линии электропередач приведен в [6].

Согласно этому критерию для каждого коэффициента торможения существуют максимальные граничные углы расхождения фаз токов сторон трансформатора $\varphi_{\text{ГР}}$, ограничивающие область безусловного срабатывания.

В этой области условие превышения дифференциальным током уставки начального тока срабатывания защиты является достаточным для срабатывания ДЗТ.

6.5.5 По аналогии с [6] с учётом формул (3.1) и (3.3) критерий надежного срабатывания ДЗТ трансформатора принимает вид

$$\cos \varphi < \frac{1}{2} \cdot K_{\text{ТОРМ}}^2 - 1, \quad (6.11)$$

где φ – фазовый сдвиг между токами, °;

$K_{\text{ТОРМ}}$ – коэффициент торможения характеристики ДЗТ.

При выводе формулы (6.11) ток стороны трансформатора без питания не учитывался.

6.5.6 В соответствии с критерием надежного срабатывания построена характеристика безусловной чувствительности ДЗТ (рисунок 6.1).

В заштрихованной области срабатывание не зависит от соотношений между токами и определяется только коэффициентом торможения.

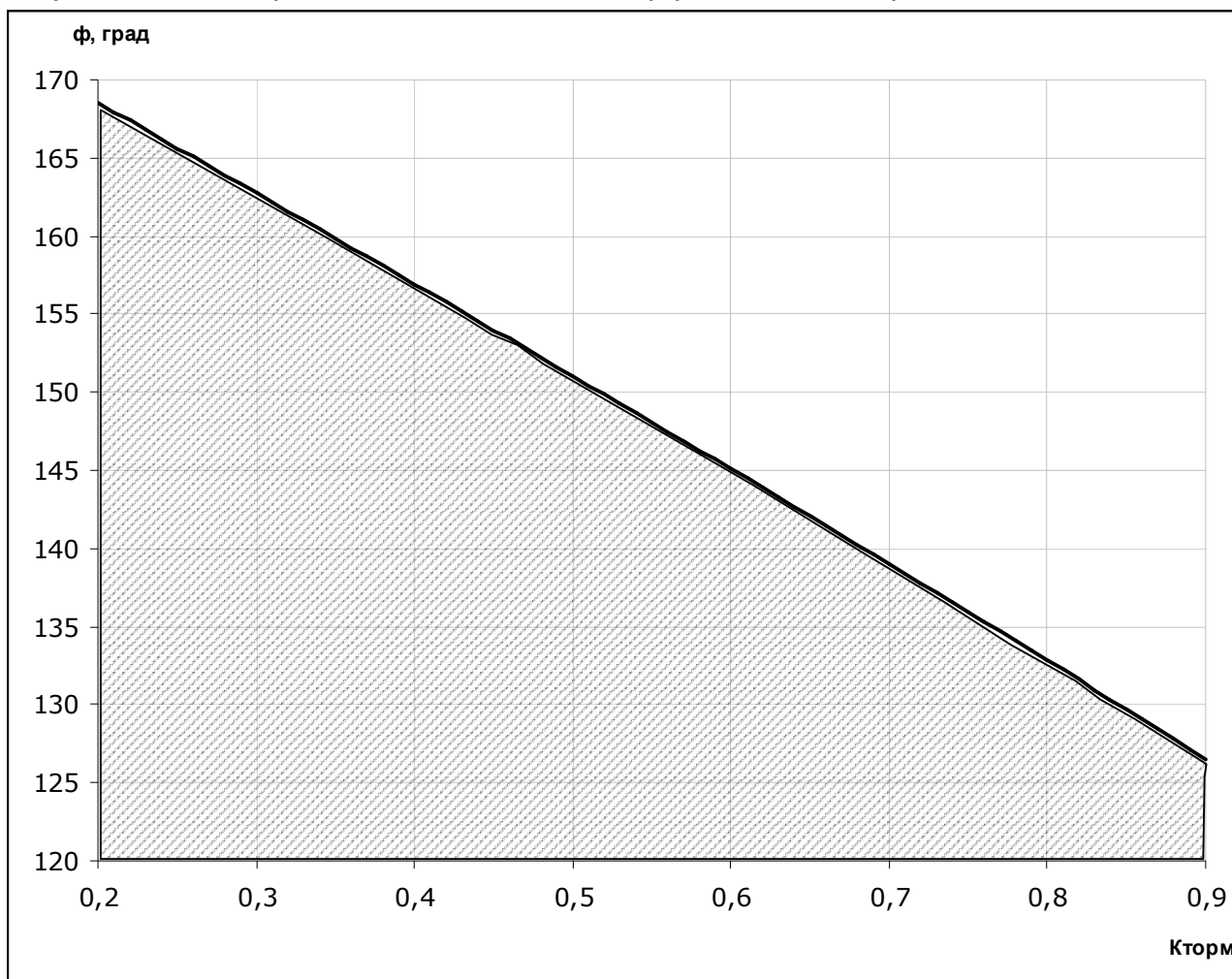


Рисунок 6.1 – Характеристика безусловной чувствительности ДЗТ

6.5.7 В случае питания трансформатора с двух сторон после расчета коэффициента чувствительности необходимо дополнительно убедиться в обеспечении критерия надежного срабатывания.

6.5.8 Так, например, при коэффициенте торможения ДЗТ, равном 0,9, срабатывание защиты при КЗ в зоне обеспечивается независимо от соотношений между токами сторон трансформатора, при угле расхождения между ними не превышающем 126° .

Дифференциальный ток при этом должен превосходить уставку начального тока срабатывания ДЗТ.

6.6 Выбор уставки сигнализации небаланса

6.6.1 Уставку сигнализации небаланса $I_{\text{НБ}}$ выбирают из условия отстройки от расчетного максимального тока небаланса в нагрузочном режиме по формуле

$$I_{\text{НБ}} = K_{\text{ОТС}} \cdot I_{\text{НБ расч}} \quad (6.12)$$

где $K_{отс}$ = от 1,1 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчёта и необходимый запас;

$I_{НБ\ расч}$ – относительный расчетный ток небаланса при токе торможения, соответствующем максимальному рабочему току трансформатора.

Значение уставки $I_{НБ}$ рекомендуется уточнить после ввода трансформатора в эксплуатацию на основании данных о фактическом токе небаланса в нагрузочном режиме.

6.6.2 Относительный расчётный ток небаланса $I_{НБ\ расч}$ следует рассчитывать в соответствии с 6.2.4 с учётом следующих изменений:

- значение 0,5 в формулах (6.2) и (6.3) следует заменить на относительное значение максимального рабочего тока трансформатора;
- значение $\varepsilon_{0,5}$ следует заменить на $\varepsilon_{раб\ макс}$ (см. 4.2).

6.6.3 Уставку по времени $T_{НБ}$ следует отстроить от максимального времени действия резервных защит трансформатора по формуле

$$T_{НБ} = K_{отс} \cdot T_{РЕЗ\ макс}, \quad (6.13)$$

где $K_{отс}$ = от 1,5 – коэффициент отстройки, учитывающий необходимый запас;

$T_{РЕЗ\ макс}$ – максимальная уставка по времени действия резервных защит трансформатора.

6.7 Выбор уставок ДЗТ при наличии ТСН в зоне защиты

6.7.1 Выбор уставок ДЗТ и проверку чувствительности защиты при наличии в зоне защиты ТСН следует проводить аналогично описанному в 6.1-6.6 с учётом особенностей, приведённых ниже.

6.7.2 Для обеспечения селективности действия защиты уставку начального тока срабатывания ДЗТ, рассчитанную по формуле (6.3), дополнительно необходимо отстроить от дифференциального тока в защите, вызванного КЗ за ТСН по формуле

$$I_{ДЗТ\ нач} = K_{отс} \cdot \frac{I_{К\ ТСН\ МАКС}^{ВН}}{I_{НОМ\ ТР}^{ВН}}, \quad (6.14)$$

где $K_{отс}$ = 1,5 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчёта и необходимый запас;

$I_{К\ ТСН\ МАКС}^{ВН}$ – периодическая составляющая максимального фазного тока КЗ за ТСН (как правило, трехфазного металлического КЗ), приведенная к стороне ВН, А;

$I_{НОМ\ ТР}^{ВН}$ – номинальный первичный ток стороны ВН, А.

6.7.3 В ходе расчёта уставки сигнализации небаланса дополнительно следует учитывать максимальный рабочий ток ТСН, увеличивающий значение тока небаланса в нагрузочном режиме.

Уставку сигнализации небаланса $I_{НБ}$, в случае наличия ТСН в зоне защиты, следует выбирать по формуле

$$I_{НБ} = K_{ОТС} \cdot (I_{НБ \text{ расч}} + I_{ТСН \text{ раб}}), \quad (6.15)$$

где $K_{ОТС}$ = от 1,1 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчёта и необходимый запас;

$I_{НБ \text{ расч}}$ - относительный расчетный ток небаланса в соответствии с 6.6.2;

$I_{ТСН \text{ раб}}$ - относительное значение максимального рабочего тока ТСН, приведенное к стороне ВН.

6.8 Выбор уставок блокирования ДЗТ при возникновении БТН

6.8.1 Уставку ИПБ $K_{ИПБ}$ рекомендуются устанавливать 0,15 (см. 3.13). В процессе эксплуатации значение уставки $K_{ИПБ}$ может быть уточнено.

6.8.2 Функцию перекрёстного блокирования ДЗТ рекомендуется использовать для трансформаторов, группа соединения обмоток которых отличается от 0 или 6.

Перекрёстное блокирование может привести к замедлению действия защиты в случае наложения режима КЗ на режим, сопровождающийся возникновением БТН [2].

Поэтому решение об использовании функции перекрёстного блокирования принимают индивидуально, для каждого рассматриваемого случая.

Функцию перекрёстного блокирования использовать не рекомендуется, если возможен оперативный анализ причин отключения трансформатора.

В этом случае, если анализ покажет, что причиной отключения явилось недостаточное для блокирования ДЗТ значение ИПБ в одном из "контуров" защиты в режиме БТН, возможно выполнить повторное включение трансформатора под напряжение.

В противном случае, функция перекрёстного блокирования ДЗТ может быть использована.

6.8.3 Уставку по времени ограничения длительности перекрёстного режима блокирования $T_{ПБ}$ для трансформаторов малой и средней мощности рекомендуется принимать равной 1 с, для трансформаторов большой мощности – 2 с.

Значение уставки $T_{ПБ}$ рекомендуется уточнить по опыту эксплуатации.

6.9. Требования к оформлению результатов расчёта

6.9.1 В целях минимизации количества возможных ошибок в процессе наладки оборудования, а также для упрощения процесса наладки, по окончании расчёта уставок следует заполнить бланк задания уставок.

6.9.2 Бланк задания уставок содержит в себе перечень всех уставок и программных ключей конкретного исполнения БМРЗ и может быть получен с сайта предприятия (www.mtrele.ru).

6.9.3 Для определения положений программных ключей блока БМРЗ, заносимых в бланк, необходимо руководствоваться схемными решениями, отраженными в проектной документации.

7 Примеры расчёта уставок

7.1 Двухобмоточный трансформатор

7.1.1 Исходные данные

Характеристики трансформатора:

- тип - ТДН-16000/110;
- схема и группа соединения обмоток - $Y_0 / \Delta - 11$;
- $S_{НОМ ТР} = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ - номинальная мощность;
- $U_{НОМ ТР}^{ВН} = 115 \text{ кВ}$ - номинальное напряжение стороны ВН;
- $U_{НОМ ТР}^{НН} = 6,6 \text{ кВ}$ - номинальное напряжение стороны НН;
- $u_{k \text{ МИН}} = 9,8^{1)} \%$ - напряжение короткого замыкания трансформатора, соответствующее крайнему нижнему положению РПН (регулирование в сторону повышения напряжения заблокировано);
- $u_{k \text{ МАКС}} = 11,7 \%$ - напряжение короткого замыкания трансформатора, соответствующее крайнему верхнему положению РПН (регулирование в сторону понижения напряжения заблокировано).

Система регулирования напряжения:

- РПН в нейтрали ВН трансформатора;
- $n = 19$ - количество ступеней регулирования;
- $\Delta U = 1,78 \%$ - шаг регулирования напряжения.

Параметры питающей системы:

- $X_{C \text{ МИН}} = 21 \text{ Ом}$ - сопротивление системы в минимальном режиме;
- $X_{C \text{ МАКС}} = 18,5 \text{ Ом}$ - сопротивление системы в максимальном режиме;
- $U_{CP \text{ НОМ}}^{ВН} = 115 \text{ кВ}$ - среднее номинальное напряжение системы.

Параметры системы стороны НН:

- $U_{CP \text{ НОМ}}^{НН} = 6,3 \text{ кВ}$ - среднее номинальное напряжение стороны НН.

Параметры ТТ:

- $K_{ТТ}^{ВН} = 30$ - коэффициент трансформации ТТ стороны ВН трансформатора;
- $K_{ТТ}^{НН} = 400$ - коэффициент трансформации ТТ стороны НН трансформатора.

Устройство защиты:

БМРЗ-ТД-12-20-21.

¹⁾ Напряжение КЗ для каждой ступени регулирования указывают в паспорте на трансформатор. Для трансформаторов, выполненных в соответствии с [7], [8] или [9], значения указаны в соответствующем государственном стандарте. В случае отсутствия таких данных, для расчетов следует принять напряжение КЗ, соответствующее среднему положению регулятора.

7.1.2 Расчёт сопротивления трансформатора

7.1.2.1 Сопротивление трансформатора рассчитать для двух предельных случаев - крайнего нижнего и крайнего верхнего положения РПН.

Напряжение обмотки ВН, соответствующее крайнему нижнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$U_{\text{МИН}}^{\text{ВН}} = U_{\text{СП НОМ}}^{\text{ВН}} \cdot \left(1 - \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}\right) = 115 \cdot \left(1 - \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100}\right) = 96,6 \text{ кВ.} \quad (7.1)$$

Напряжение обмотки ВН, соответствующее крайнему верхнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$U_{\text{МАКС}}^{\text{ВН}} = U_{\text{СП НОМ}}^{\text{ВН}} \cdot \left(1 + \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}\right) = 115 \cdot \left(1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100}\right) = 133,4 \text{ кВ.} \quad (7.2)$$

Рассчитанное значение $U_{\text{МАКС}}^{\text{ВН}}$ получилось больше максимально допустимого для данной сети¹⁾.

В качестве $U_{\text{МАКС}}^{\text{ВН}}$ принять значение 126 кВ в соответствии с [10].

7.1.2.2 Сопротивление трансформатора, соответствующее крайнему нижнему положению РПН, рассчитаем по формуле

$$X_{\text{Т МИН}} = \frac{u_{\text{к МИН}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{МИН}}^{\text{ВН}^2}}{S_{\text{НОМ ТР}}} = \frac{9,8}{100} \cdot \frac{96,6^2}{16} = 57,1 \text{ Ом.} \quad (7.3)$$

7.1.2.3 Сопротивление трансформатора, соответствующее крайнему верхнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$X_{\text{Т МАКС}} = \frac{u_{\text{к МАКС}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{МАКС}}^{\text{ВН}^2}}{S_{\text{НОМ ТР}}} = \frac{11,7}{100} \cdot \frac{126^2}{16} = 116,1 \text{ Ом.} \quad (7.4)$$

7.1.3 Выбор ПТН блоков БМРЗ

7.1.3.1 Для выбора ПТН блоков БМРЗ произвести расчёт токов КЗ на сторонах ВН (К1 на рисунке 7.1) и НН (К2 на рисунке 7.1) трансформатора.

7.1.3.2 Периодическую составляющую максимального фазного тока КЗ на стороне ВН рассчитать по формуле

$$I_{\text{К МАКС}}^{\text{ВН}} = \frac{U_{\text{СП НОМ}}^{\text{ВН}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{С МАКС}}} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot 18,5} = 3589 \text{ А.} \quad (7.5)$$

7.1.3.3 Используя формулу (4.1), произвести расчёт $i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{ВН}}$ для стороны ВН

$$i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{ВН}} \geq k_{\text{ПЕР}} \cdot \frac{I_{\text{К МАКС}}^{\text{ВН}}}{K_{\text{ТТ}}^{\text{ВН}}} = 2 \cdot \frac{3589}{30} = 240 \text{ А.} \quad (7.6)$$

В соответствии с [11] выбрать ПТН с $i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{ВН}} = 250 \text{ А}$ и $I_{\text{НОМ ПТН}}^{\text{ВН}} = 2,5 \text{ А}$.

¹⁾ См. таблицу В-1 [10].

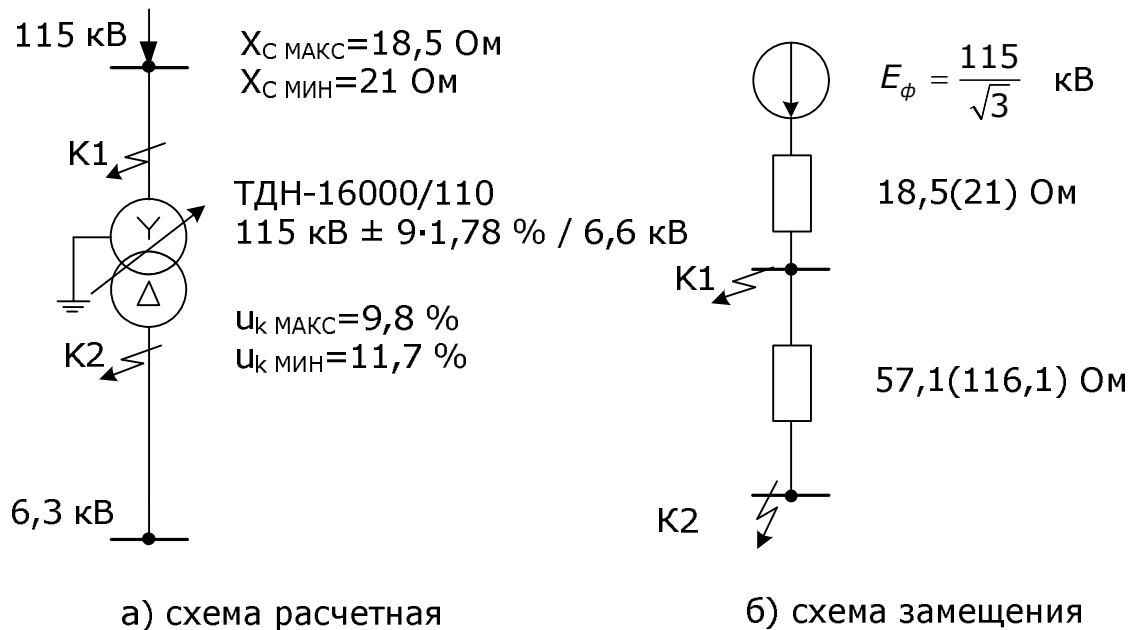


Рисунок 7.1 – Схемы – расчётная (а) и замещения (б)

7.1.3.4 Для проверки выбранного ПТН по 4.4 рассчитать по формуле (3.2) номинальный первичный ток стороны ВН трансформатора

$$I_{\text{НОМ ТР}}^{\text{ВН}} = \frac{S_{\text{НОМ ТР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ ТР}}^{\text{ВН}}} = \frac{16000000}{\sqrt{3} \cdot 115000} = 80,3 \text{ А.} \quad (7.7)$$

Подставить полученные значения в формулу (4.2)

$$2,5 \leq 6 \cdot \frac{80,3}{30} = 16,08. \quad (7.8)$$

Выбранный ПТН обеспечивает измерение тока нагрузочного режима с заданной погрешностью.

7.1.3.5 Периодическую составляющую приведенного максимального фазного тока КЗ на стороне НН рассчитать по формуле

$$I_{\text{К МАКС ПРИВ}}^{\text{НН}} = \frac{U_{\text{СП НОМ}}^{\text{ВН}}}{\sqrt{3} \cdot (X_{\text{С МАКС}} + X_{\text{Т МИН}})} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot (18,5 + 57,1)} = 878 \text{ А.} \quad (7.9)$$

Привести полученное значение к напряжению стороны НН трансформатора по формуле

$$I_{\text{К МАКС}}^{\text{НН}} = I_{\text{К МАКС ПРИВ}}^{\text{НН}} \cdot \frac{U_{\text{МИН}}^{\text{ВН}}}{U_{\text{СП НОМ}}^{\text{ВН}}} = 878 \cdot \frac{96,6}{6,3} = 13459 \text{ А.} \quad (7.10)$$

7.1.3.6 Используя формулу (4.1), произвести расчёт $i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{НН}}$ для стороны НН

$$i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{НН}} \geq k_{\text{ПЕР}} \cdot \frac{I_{\text{К МАКС}}^{\text{НН}}}{K_{\text{ТТ}}^{\text{НН}}} = 2 \cdot \frac{13459}{400} = 67 \text{ А.} \quad (7.11)$$

В соответствии с [11] выбрать ПТН с $i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{НН}} = 130 \text{ А}$ и $I_{\text{НОМ ПТН}}^{\text{НН}} = 1,0 \text{ А}$.

7.1.3.7 Для проверки выбранного ПТН по 4.4 рассчитать по формуле (3.2) номинальный первичный ток стороны НН трансформатора

$$I_{\text{НОМ ТР}}^{\text{НН}} = \frac{S_{\text{НОМ ТР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ ТР}}^{\text{НН}}} = \frac{16000000}{\sqrt{3} \cdot 6600} = 1400 \text{ А}. \quad (7.12)$$

Подставить полученные значения в формулу (4.3)

$$1,0 \leq 3 \cdot \frac{1400}{400} = 10,5. \quad (7.13)$$

Выбранный ПТН обеспечивает измерение тока нагрузочного режима с заданной погрешностью.

7.1.4 Выбор уставки срабатывания ДТО

7.1.4.1 Уставку срабатывания ДТО $I_{\text{ДТО}}$ по условию отстройки от броска тока намагничивания принять равной 4 (в соответствии с 5.2).

7.1.4.2 По формулам (5.2) – (5.5) определить относительный расчётный ток небаланса $I_{\text{НБ расч}}$ при максимальном тормозном токе внешнего КЗ ($i_{\text{К МАКС}}^{\text{НН}}$)

$$I_{\text{НБ расч}} = (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} \cdot 1 + 0,05) \cdot \frac{878}{80,3} = 5,03. \quad (7.14)$$

Здесь и далее в расчёте принять значения полных относительных погрешностей ТТ во всех режимах работы трансформатора равными 0,1 (реальная кратность тока КЗ не превосходит номинальную и реальная нагрузка на вторичные цепи ТТ не превосходит номинальную).

7.1.4.3 Используя формулу (5.1), рассчитать уставку срабатывания ДТО $I_{\text{ДТО}}$ исходя из условия отстройки от расчётного максимального тока небаланса

$$I_{\text{ДТО}} = 1,2 \cdot 5,03 = 6,04. \quad (7.15)$$

7.1.4.4 В качестве уставки срабатывания ДТО $I_{\text{ДТО}}$ принять большее из двух полученных по 7.1.4.1 и 7.1.4.3 значение. $I_{\text{ДТО}} = 6,04$.

7.1.5 Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ $I_{\text{ДЗТ нач}}$

7.1.5.1 Относительный расчетный ток небаланса, используемый при расчете $I_{\text{ДЗТ нач}}$, рассчитать, используя формулу (6.3)

$$I_{\text{НБ расч}} = 0,5 \cdot \left(1 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} + 0,05 \right) = 0,155. \quad (7.16)$$

7.1.5.2 По формуле (6.1), рассчитать уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{\text{ДЗТ нач}}$

$$I_{ДЗТ \text{ нач}} = 1,5 \cdot 0,155 = 0,24. \quad (7.17)$$

7.1.5.3 В соответствии с 6.2.6 принять значение уставки $I_{ДЗТ \text{ нач}}$ равным 0,3 о.е.

7.1.6 Выбор уставки коэффициента торможения второго участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ 2}$

7.1.6.1 Используя формулы (6.5) и (6.7), определить ток срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ 2}$ при токе торможения $1,5 I_{НОМ ТР}$

$$I_{ДЗТ 2} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot \left(2 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} + 0,05 \right) = 0,74. \quad (7.18)$$

7.1.6.2 По формуле (6.4) рассчитать уставку $K_{ТОРМ 2}$

$$K_{ТОРМ 2} = 0,74 - 0,3 = 0,44. \quad (7.19)$$

7.1.7 Выбор уставки коэффициента торможения третьего участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ 3}$

7.1.7.1 По формуле (6.9) рассчитать значение тока торможения, соответствующее максимальному току внешнего КЗ ($I_{К \text{ МАКС ПРИВ}}^{HH}$)

$$I_{К \text{ торм}} = \left(1 - \frac{2,5 \cdot 0,1}{2} \right) \cdot \frac{878}{80,3} = 9,6. \quad (7.20)$$

7.1.7.2 По формуле (6.8) найти уставку $K_{ТОРМ 3}$

$$K_{ТОРМ 3} = \frac{6,04 - 0,74}{9,6 - 1,5} = 0,66. \quad (7.21)$$

7.1.8 Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ \text{ нач ч}}$ группы "чувствительных" уставок

7.1.8.1 Относительный расчетный ток небаланса, используемый при расчете $I_{ДЗТ \text{ нач ч}}$, найти, используя формулу (6.3)

$$I_{НБ \text{ расч}} = 0,5 \cdot \left(1 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} + 0,05 \right) = 0,102. \quad (7.22)$$

7.1.8.2 Уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ \text{ нач ч}}$ рассчитать по формуле (6.1)

$$I_{ДЗТ \text{ нач ч}} = 1,5 \cdot 0,102 = 0,16. \quad (7.23)$$

7.1.8.3 В соответствии с 6.2.6 принять значение уставки $I_{ДЗТ\ нач\ ч}$ равным 0,3 о.е.

7.1.9 Выбор уставки коэффициента торможения второго участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ\ 2\ ч}$ "чувствительных" уставок

7.1.9.1 По формулам (6.5) и (6.7) определить ток срабатывание ДЗТ $I_{ДЗТ\ 2}$ при токе торможения 1,5 $I_{НОМ\ ТР}$

$$I_{ДЗТ\ 2} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot \left(2 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} + 0,05 \right) = 0,55. \quad (7.24)$$

7.1.9.2 Уставку $K_{ТОРМ\ 2\ ч}$ определить по формуле (6.4)

$$K_{ТОРМ\ 2\ ч} = 0,55 - 0,3 = 0,25. \quad (7.25)$$

7.1.10 Выбор уставки коэффициента торможения третьего участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ\ 3\ ч}$ "чувствительных" уставок

7.1.10.1 По формулам (5.1) – (5.5) рассчитать уставку $I_{ДТО\ ч}$ в соответствии с указаниями 6.4.2

$$I_{ДТО\ ч} = 1,2 \cdot (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} \cdot 1 + 0,05) \cdot \frac{878}{80,3} = 4,64. \quad (7.26)$$

7.1.10.2 По формуле (6.8) рассчитать уставку $K_{ТОРМ\ 3\ ч}$

$$K_{ТОРМ\ 3\ ч} = \frac{4,64 - 0,55}{9,6 - 1,5} = 0,51. \quad (7.27)$$

7.1.11 Проверка чувствительности ДЗТ

7.1.11.1 Для проверки чувствительности ДЗТ рассчитать приведенное минимальное относительное значение периодической составляющей тока КЗ на стороне НН (точка К2 на рисунке 7.1) по формуле

$$I_{К\ МИН\ ПРИВ}^{НН} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{U_{СР\ НОМ}^{ВН}}{\sqrt{3} \cdot (X_{С\ МИН} + X_{Т\ МАКС})} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot (21 + 116,1)} = 420\ А. \quad (7.28)$$

7.1.11.2 По формуле (6.10) рассчитать коэффициент чувствительности ДЗТ при металлическом КЗ

$$K_{\psi} = \frac{I_{К\ МИН}^{НН} \cdot (1 - \varepsilon_{МИН})}{I_{НОМ\ ТР}^{ВН} \cdot I_{ДЗТ\ нач\ ч}} = \frac{420 \cdot (1 - 0,1)}{80,3 \cdot 0,3} = 15,7. \quad (7.29)$$

Коэффициент чувствительности удовлетворяет требованиям 6.5.2.

7.1.12 Выбор уставки сигнализации небаланса

7.1.12.1 В качестве максимального рабочего тока принять значение номинального тока трансформатора.

По формуле (6.3) рассчитать относительный расчётный ток небаланса

$$I_{НБ\ расч} = 1,0 \cdot \left(1 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} + 0,05 \right) = 0,31. \quad (7.30)$$

7.1.12.2 По формуле (6.12) рассчитать уставку сигнализации небаланса

$$I_{НБ} = K_{ОТС} \cdot I_{НБ\ расч} = 1,1 \cdot 0,31 = 0,34. \quad (7.31)$$

7.1.12.3 В соответствии с руководством по эксплуатации блока БМРЗ [11] уставка сигнализации небаланса $I_{НБ}$ должна быть задана коэффициентом $K_{НБ}$, равным отношению $I_{НБ}$ к уставке начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\ нач}$

$$K_{НБ} = \frac{I_{НБ}}{I_{ДЗТ\ нач}} = \frac{0,34}{0,3} = 1,14. \quad (7.32)$$

7.1.13 Выбор уставок блокировки ДЗТ при возникновении БТН

7.1.13.1 Уставку ИПБ $K_{ИПБ}$ в соответствии с 6.8.1 принять 0,15 о.е.

7.1.13.2 Уставку по времени ограничения длительности перекрёстного режима блокирования $T_{ПБ}$ в соответствии с 6.8.3 принять равной 1 с.

7.1.14 Для удобства ввода в блок БМРЗ свести уставки в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Уставки защиты

Уставки	Обозначение	Значение
Номинальный ток ПТН для стороны ВН, А	$I_{НОМ\ ПТН}^{ВН}$	2,5
Номинальный ток ПТН для стороны НН, А	$I_{НОМ\ ПТН}^{НН}$	1,0
Ток срабатывания ДТО, о.е.	$I_{ДТО}$	6,04
Коэффициент сигнализации небаланса, о.е.	$K_{НБ}$	1,14
Начальный ток срабатывания ДЗТ, о.е.	$I_{ДЗТ\ нач}$	0,3
Коэффициент торможения второго участка ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 2}$	0,44
Коэффициент торможения третьего участка ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 3}$	0,66
ИПБ, о.е.	$K_{ИПБ}$	0,15
Время ограничения длительности перекрёстного режима блокирования, с	$T_{ПБ}$	1
Начальный ток срабатывания "чувствительного" органа ДЗТ, о.е.	$I_{ДЗТ\ нач\ ч}$	0,3
Коэффициент торможения второго участка "чувствительного" органа ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 2\ ч}$	0,25
Коэффициент торможения третьего участка "чувствительного" органа ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 3\ ч}$	0,51

7.2 Двухобмоточный трансформатор с расщеплённой обмоткой НН

7.2.1 Исходные данные

Характеристики трансформатора:

- тип - ТРДН-40000/110;
- схема и группа соединения обмоток - $Y_0 / \Delta / \Delta - 11 - 11$;
- $S_{НОМ ТР} = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ - номинальная мощность;
- $U_{НОМ ТР}^{ВН} = 115 \text{ кВ}$ - номинальное напряжение стороны ВН;
- $U_{НОМ ТР}^{НН} = 6,3 \text{ кВ}$ - номинальное напряжение стороны НН;
- $U_{к \text{ ВН-НН1(НН2) МИН}} = 18,84^{1)} \%$ - напряжение короткого замыкания

трансформатора между обмотками ВН и НН1 (НН2), соответствующее крайнему нижнему положению РПН (регулирование в сторону повышения напряжения заблокировано);

- $U_{к \text{ ВН-НН1(НН2) МАКС}} = 20,12 \%$ - напряжение короткого замыкания трансформатора между обмотками ВН и НН1 (НН2), соответствующее крайнему верхнему положению РПН (регулирование в сторону понижения напряжения заблокировано).

Система регулирования напряжения:

- РПН в нейтрали ВН трансформатора;
- $n = 19$ - количество ступеней регулирования;
- $\Delta U = 1,78 \%$ - шаг регулирования напряжения.

Параметры питающей системы:

- $X_{С МИН} = 20 \text{ Ом}$ - сопротивление системы в минимальном режиме;
- $X_{С МАКС} = 10 \text{ Ом}$ - сопротивление системы в максимальном режиме;
- $U_{СР НОМ}^{ВН} = 115 \text{ кВ}$ - среднее номинальное напряжение системы.

Параметры системы стороны НН:

- $U_{СР НОМ}^{НН} = 6,3 \text{ кВ}$ - среднее номинальное напряжение стороны НН.

Параметры ТТ:

- $K_{ТТ}^{ВН} = 80$ - коэффициент трансформации ТТ стороны ВН трансформатора;
- $K_{ТТ}^{НН} = 400$ - коэффициент трансформации ТТ стороны НН трансформатора.

Устройство защиты:

БМРЗ-ТД-12-20-21.

¹⁾ Напряжение КЗ для каждой ступени регулирования указывают в паспорте на трансформатор. Для трансформаторов, выполненных в соответствии с [7], [8] или [9], значения указаны в соответствующем государственном стандарте. В случае отсутствия таких данных, для расчетов следует принять напряжение КЗ, соответствующее среднему положению регулятора.

7.2.2 Расчёт сопротивления трансформатора

7.2.2.1 Сопротивление трансформатора рассчитать для двух предельных случаев - крайнего нижнего и крайнего верхнего положения РПН.

Напряжение обмотки ВН, соответствующее крайнему нижнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$U_{\text{ВН МИН}}^{\text{ВН}} = U_{\text{СР НОМ}}^{\text{ВН}} \cdot \left(1 - \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}\right) = 115 \cdot \left(1 - \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100}\right) = 96,6 \text{ кВ.} \quad (7.33)$$

Напряжение обмотки ВН, соответствующее крайнему верхнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$U_{\text{ВН МАКС}}^{\text{ВН}} = U_{\text{СР НОМ}}^{\text{ВН}} \cdot \left(1 + \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}\right) = 115 \cdot \left(1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100}\right) = 133,4 \text{ кВ.} \quad (7.34)$$

Вычисленное значение напряжения $U_{\text{ВН МАКС}}^{\text{ВН}}$ получилось больше максимально допустимого для данной сети¹⁾.

В качестве напряжения $U_{\text{ВН МАКС}}^{\text{ВН}}$ принять значение 126 кВ в соответствии с [10].

7.2.2.2 Сопротивление трансформатора, соответствующее крайнему нижнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$X_{\text{Т МИН}} = \frac{u_{\text{к МИН}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{МИН}}^{\text{ВН}^2}}{S_{\text{НОМ ТР}}} = \frac{18,84}{100} \cdot \frac{96,6^2}{40} = 43,9 \text{ Ом.} \quad (7.35)$$

7.2.2.3 Сопротивление трансформатора, соответствующее крайнему верхнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$X_{\text{Т МАКС}} = \frac{u_{\text{к МАКС}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{МАКС}}^{\text{ВН}^2}}{S_{\text{НОМ ТР}}} = \frac{20,12}{100} \cdot \frac{126^2}{40} = 79,9 \text{ Ом.} \quad (7.36)$$

7.2.3 Выбор ПТН блоков БМРЗ

7.2.3.1 Для выбора ПТН блоков БМРЗ произвести расчёт токов КЗ на сторонах ВН (К1 на рисунке 7.2) и НН (К2 на рисунке 7.2) трансформатора.

7.2.3.2 Периодическую составляющую максимального фазного тока КЗ на стороне ВН рассчитать по формуле

$$I_{\text{К МАКС}}^{\text{ВН}} = \frac{U_{\text{СР НОМ}}^{\text{ВН}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{С МАКС}}} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 6640 \text{ А.} \quad (7.37)$$

7.2.3.3 По формуле (4.1) произвести расчёт $i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{ВН}}$ для стороны ВН

$$i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{ВН}} \geq k_{\text{ПЕР}} \cdot \frac{I_{\text{К МАКС}}^{\text{ВН}}}{K_{\text{ТТ}}^{\text{ВН}}} = 2 \cdot \frac{6640}{80} = 160 \text{ А.} \quad (7.38)$$

¹⁾ См. таблицу В-1 [10].

В соответствии с [11] выбрать ПТН с током $i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{ВН}} = 250 \text{ А}$ и током $I_{\text{НОМ ПТН}}^{\text{ВН}} = 2,5 \text{ А}$.

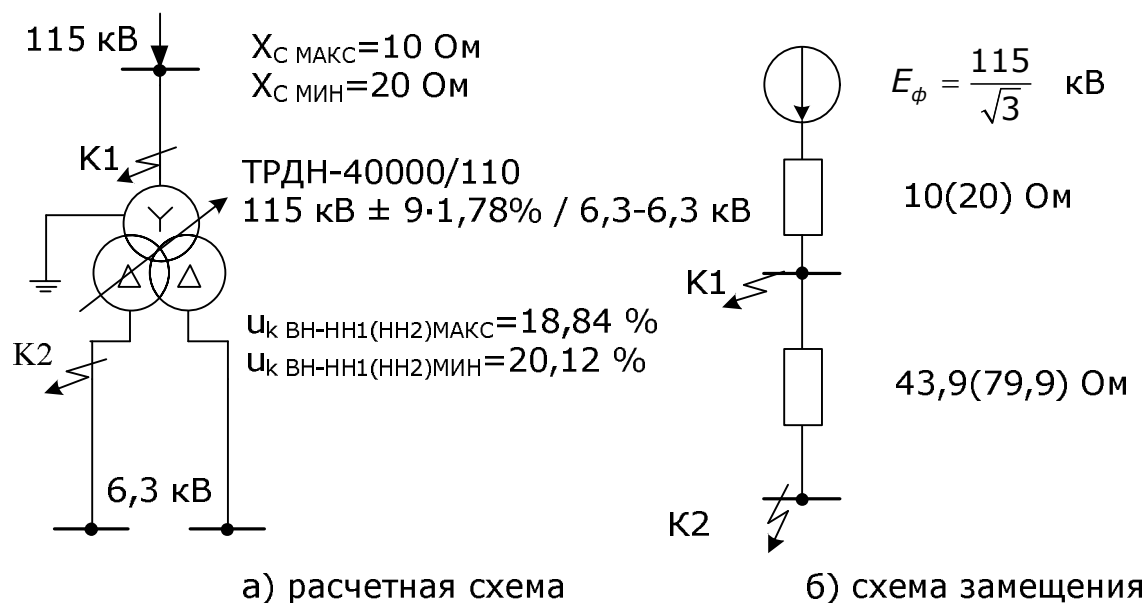


Рисунок 7.2 – Схемы – расчётная (а) и замещения (б)

7.2.3.4 Для проверки выбранного ПТН по 4.4 найти номинальный первичный ток стороны ВН трансформатора по формуле (3.2)

$$I_{\text{НОМ ТР}}^{\text{ВН}} = \frac{S_{\text{НОМ ТР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ ТР}}^{\text{ВН}}} = \frac{40000000}{\sqrt{3} \cdot 115000} = 200,8 \text{ А.} \quad (7.39)$$

Подставить полученные значения в формулу (4.2)

$$2,5 \leq 6 \cdot \frac{200,8}{80} = 15,06. \quad (7.40)$$

Выбранный ПТН обеспечивает измерение тока нагрузочного режима с заданной погрешностью.

7.2.3.5 Периодическую составляющую приведенного максимального фазного тока КЗ на стороне НН рассчитать по формуле

$$I_{\text{К МАКС ПРИВ}}^{\text{НН}} = \frac{U_{\text{СП НОМ}}^{\text{ВН}}}{\sqrt{3} \cdot (X_{\text{С МАКС}} + X_{\text{Т МИН}})} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot (10 + 43,9)} = 1232 \text{ А.} \quad (7.41)$$

Привести полученное значение к напряжению стороны НН трансформатора по формуле

$$I_{\text{К МАКС}}^{\text{НН}} = I_{\text{К МАКС ПРИВ}}^{\text{НН}} \cdot \frac{U_{\text{МИН}}^{\text{ВН}}}{U_{\text{СП НОМ}}^{\text{НН}}} = 1232 \cdot \frac{96,6}{6,3} = 18891 \text{ А.} \quad (7.42)$$

7.2.3.6 По формуле (4.1), произвести расчёт тока $i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{НН}}$ для стороны НН

$$i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{НН}} \geq k_{\text{ПЕР}} \cdot \frac{I_{\text{К МАКС ПРИВ}}^{\text{НН}}}{K_{\text{ТТ}}^{\text{НН}}} = 2 \cdot \frac{18891}{400} = 95 \text{ А.} \quad (7.43)$$

В соответствии с [11] выбрать ПТН с током $i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{НН}} = 130 \text{ А}$ и током $I_{\text{НОМ ПТН}}^{\text{НН}} = 1 \text{ А}$.

7.2.3.7 Для проверки выбранного ПТН по 4.4 рассчитать номинальный первичный ток стороны НН трансформатора по формуле (3.2)

$$I_{\text{НОМ ТР}}^{\text{НН}} = \frac{S_{\text{НОМ ТР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ ТР}}^{\text{НН}}} = \frac{40000000}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 3666 \text{ А}. \quad (7.44)$$

Подставить полученные значения в формулу (4.3)

$$1 \leq 3 \cdot \frac{3666}{400} = 27,5. \quad (7.45)$$

Выбранный ПТН обеспечивает измерение тока нагрузочного режима с заданной погрешностью.

7.2.4 Выбор уставки срабатывания ДТО

7.2.4.1 Уставку срабатывания ДТО $I_{\text{ДТО}}$ по условию отстройки от броска тока намагничивания принять равной 4 о.е. в соответствии с рекомендациями, изложенными в 5.2.

7.2.4.2 По формулам (5.2) – (5.5) определить относительный расчётный ток небаланса $I_{\text{НБ расч}}$ при максимальном тормозном токе внешнего КЗ ($I_{\text{К МАКС ПРИВ}}^{\text{НН}}$)

$$I_{\text{НБ расч}} = (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} \cdot 1 + 0,05) \cdot \frac{1232}{200,8} = 2,83. \quad (7.46)$$

Здесь и далее в расчёте принять значения полных относительных погрешностей ТТ во всех режимах работы трансформатора равными 0,1 (реальная кратность тока КЗ не превосходит номинальную и реальная нагрузка на вторичные цепи ТТ не превосходит номинальную).

7.2.4.3 По формуле (5.1) рассчитать уставку срабатывания ДТО $I_{\text{ДТО}}$ исходя из условия отстройки от расчётного максимального тока небаланса

$$I_{\text{ДТО}} = 1,2 \cdot 2,83 = 3,4. \quad (7.47)$$

7.2.4.4 В качестве уставки срабатывания ДТО $I_{\text{ДТО}}$ принять большее из двух полученных по 7.2.4.1 и 7.2.4.3 значение $I_{\text{ДТО}} = 4 \text{ о.е.}$

7.2.5 Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ $I_{\text{ДЗТ нач}}$

7.2.5.1 Относительный расчетный ток небаланса, используемый при расчете уставки $I_{\text{ДЗТ нач}}$, рассчитать по формуле (6.2)

$$I_{\text{НБ расч}} = 0,5 \cdot \left(1 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} + 0,05 \right) = 0,155. \quad (7.48)$$

7.2.5.2 По формуле (6.3) рассчитать уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\ нач}$

$$I_{ДЗТ\ нач} = 1,5 \cdot 0,155 = 0,24. \quad (7.49)$$

7.2.5.3 В соответствии с 6.2.6 принять уставку $I_{ДЗТ\ нач}$ равной 0,3 о.е.

7.2.6 Выбор уставки коэффициента торможения второго участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ\ 2}$

7.2.6.1 По формулам (6.5) и (6.7) определить ток срабатывание ДЗТ $I_{ДЗТ\ 2}$ при токе торможения 1,5 $I_{НОМ\ ТР}$

$$I_{ДЗТ\ 2} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot \left(2 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} + 0,05 \right) = 0,74. \quad (7.50)$$

7.2.6.2 По формуле (6.4) рассчитать значение уставки $K_{ТОРМ\ 2}$

$$K_{ТОРМ\ 2} = 0,74 - 0,3 = 0,44. \quad (7.51)$$

7.2.7 Выбор уставки коэффициента торможения третьего участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ\ 3}$

7.2.7.1 Рассчитать значение тока торможения, соответствующее максимальному току внешнего КЗ ($I_{К\ МАКС}^{HH}$), по формуле (6.9)

$$I_{К\ ТОРМ} = \left(1 - \frac{2,5 \cdot 0,1}{2} \right) \cdot \frac{1232}{200,8} = 5,4. \quad (7.52)$$

7.2.7.2 Уставку $K_{ТОРМ\ 3}$ рассчитать по формуле (6.8)

$$K_{ТОРМ\ 3} = \frac{3,4 - 0,74}{5,4 - 1,5} = 0,69. \quad (7.53)$$

7.2.8 Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\ нач\ ч}$ группы "чувствительных" уставок

7.2.8.1 Относительный расчетный ток небаланса, используемый при расчете $I_{ДЗТ\ нач\ ч}$, определить по формуле (6.3)

$$I_{НБ\ расч} = 0,5 \cdot \left(1 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} + 0,05 \right) = 0,102. \quad (7.54)$$

7.2.8.2 По формуле (6.1) определить уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\ нач\ ч}$

$$I_{ДЗТ \text{ нач ч}} = 1,5 \cdot 0,102 = 0,16. \quad (7.55)$$

7.2.8.3 В соответствии с 6.2.6 принять уставку $I_{ДЗТ \text{ нач ч}}$ равной 0,3 о.е.

7.2.9 Выбор уставки коэффициента торможения второго участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ 2 ч}$ "чувствительных" уставок

7.2.9.1 По формулам (6.5) и (6.7) определить ток срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ 2}$ при токе торможения $1,5 I_{НОМ ТР}$

$$I_{ДЗТ 2} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot \left(2 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} + 0,05 \right) = 0,55. \quad (7.56)$$

7.2.9.2 Значение уставки $K_{ТОРМ 2 ч}$ определить по формуле (6.4)

$$K_{ТОРМ 2 ч} = 0,55 - 0,3 = 0,25. \quad (7.57)$$

7.2.10 Выбор уставки коэффициента торможения третьего участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ 3 ч}$ "чувствительных" уставок

7.2.10.1 В соответствии с указаниями 6.4.2 по формулам (5.1) – (5.5) рассчитать ток $I_{ДТО ч}$

$$I_{ДТО ч} = 1,2 \cdot \left(2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} \cdot 1 + 0,05 \right) \cdot \frac{1232}{200,8} = 2,61. \quad (7.58)$$

7.2.10.2 По формуле (6-8) рассчитать уставку $K_{ТОРМ 3 ч}$

$$K_{ТОРМ 3 ч} = \frac{2,61 - 0,55}{5,4 - 1,5} = 0,53. \quad (7.59)$$

7.2.11 Проверка чувствительности ДЗТ

7.2.11.1 Для проверки чувствительности ДЗТ рассчитать приведенное минимальное относительное значение периодической составляющей тока КЗ на стороне НН (точка К2 на рисунке 7.2) по формуле

$$I_{К \text{ МИН ПРИВ}}^{\text{НН}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{U_{СР \text{ НОМ}}^{\text{ВН}}}{\sqrt{3} \cdot (X_{С \text{ МИН}} + X_{Т \text{ МАКС}})} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot (20 + 79,9)} = 576 \text{ А}. \quad (7.60)$$

7.2.11.2 По формуле (6.10) рассчитать коэффициент чувствительности ДЗТ при металлическом КЗ

$$K_{ч} = \frac{I_{К \text{ МИН ПРИВ}}^{\text{НН}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{МИН}})}{I_{НОМ ТР}^{\text{ВН}} \cdot I_{ДЗТ \text{ нач ч}}} = \frac{576 \cdot (1 - 0,1)}{200,8 \cdot 0,3} = 8,6. \quad (7.61)$$

Коэффициент чувствительности удовлетворяет требованиям 6.5.2.

7.2.12 Выбор уставки сигнализации небаланса

7.2.12.1 В качестве максимального рабочего тока принять значение номинального тока трансформатора.

По формуле (6.3) рассчитать относительный расчётный ток небаланса

$$I_{НБ\ расч} = 1,0 \cdot \left(1 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} + 0,05 \right) = 0,31. \quad (7.62)$$

7.2.12.2 По формуле (6.12) рассчитать уставку сигнализации небаланса

$$I_{НБ} = K_{ОТС} \cdot I_{НБ\ расч} = 1,1 \cdot 0,31 = 0,34. \quad (7.63)$$

7.2.12.3 В соответствии с руководством по эксплуатации блока БМРЗ [11] уставка сигнализации небаланса $I_{НБ}$ должна быть задана коэффициентом $K_{НБ}$, равным отношению $I_{НБ}$ к уставке начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\ нач}$

$$K_{НБ} = \frac{I_{НБ}}{I_{ДЗТ\ нач}} = \frac{0,34}{0,3} = 1,14. \quad (7.64)$$

7.2.13 Выбор уставок блокировки ДЗТ при возникновении БТН

7.2.13.1 Уставку ИПБ $K_{ИПБ}$ в соответствии с 6.8.1 принять равной 0,15 о.е.

7.2.13.2 Уставку по времени ограничения длительности перекрёстного режима блокирования $T_{ПБ}$ в соответствии с 6.8.3 принять равной 2 с.

7.2.14 Для удобства ввода в блок БМРЗ свести уставки в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Уставки защиты

Уставки	Обозначение	Значение
Номинальный ток ПТН для стороны ВН, А	$I_{НОМ\ ПТН}^{ВН}$	2,5
Номинальный ток ПТН для стороны НН, А	$I_{НОМ\ ПТН}^{НН}$	1,0
Ток срабатывания ДТО, о.е.	$I_{ДТО}$	4,0
Коэффициент сигнализации небаланса, о.е.	$K_{НБ}$	1,14
Начальный ток срабатывания ДЗТ, о.е.	$I_{ДЗТ\ нач}$	0,3
Коэффициент торможения второго участка ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 2}$	0,44
Коэффициент торможения третьего участка ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 3}$	0,69
ИПБ, о.е.	$K_{ИПБ}$	0,15
Время ограничения длительности перекрёстного режима блокирования, с	$T_{ПБ}$	2
Начальный ток срабатывания "чувствительного" органа ДЗТ, о.е.	$I_{ДЗТ\ нач\ ч}$	0,3
Коэффициент торможения второго участка "чувствительного" органа ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 2\ ч}$	0,25
Коэффициент торможения третьего участка "чувствительного" органа ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 3\ ч}$	0,53

7.3 Трёхобмоточный трансформатор

7.3.1 Исходные данные

Характеристики трансформатора:

- тип - ТДТН-40000/110;
- схема и группа соединения обмоток - $Y_0 / Y_0 / \Delta - 0 - 11$;
- $S_{НОМ ТР} = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ - номинальная мощность;
- $U_{НОМ ТР}^{ВН} = 115 \text{ кВ}$ - номинальное напряжение стороны ВН;
- $U_{НОМ ТР}^{СН} = 38,5 \text{ кВ}$ - номинальное напряжение стороны СН;
- $U_{НОМ ТР}^{НН} = 11 \text{ кВ}$ - номинальное напряжение стороны НН;
- $u_{к \text{ ВН-СН МИН}} = 9,52^{1)} \%$ - напряжение короткого замыкания

трансформатора между обмотками ВН и СН, соответствующее крайнему нижнему положению РПН (регулирование в сторону повышения напряжения заблокировано);

- $u_{к \text{ ВН-СН МАКС}} = 11,56 \%$ - напряжение короткого замыкания

трансформатора между обмотками ВН и СН, соответствующее крайнему верхнему положению РПН (регулирование в сторону понижения напряжения заблокировано);

- $u_{к \text{ ВН-НН МИН}} = 17,04 \%$ - напряжение короткого замыкания

трансформатора между обмотками ВН и НН, соответствующее крайнему нижнему положению РПН (регулирование в сторону повышения напряжения заблокировано);

- $u_{к \text{ ВН-НН МАКС}} = 19,29 \%$ - напряжение короткого замыкания

трансформатора между обмотками ВН и НН, соответствующее крайнему верхнему положению РПН (регулирование в сторону понижения напряжения заблокировано);

- $u_{к \text{ СН-НН}} = 6,5 \%$ - напряжение короткого замыкания трансформатора между обмотками СН и НН.

Система регулирования напряжения на стороне ВН (РПН):

- $n_{ВН} = 19$ - количество ступеней регулирования;
- $\Delta U_{ВН} = 1,78 \%$ - шаг регулирования напряжения.

Система регулирования напряжения на стороне СН (ПБВ):

- $n_{СН} = 5$ - количество ступеней регулирования;
- $\Delta U_{СН} = 2,5 \%$ - шаг регулирования напряжения.

¹⁾ Напряжение КЗ для каждой ступени регулирования указывают в паспорте на трансформатор. Для трансформаторов, выполненных в соответствии с [7], [8] или [9], значения указаны в соответствующем государственном стандарте. В случае отсутствия таких данных, для расчетов следует принять напряжение КЗ, соответствующее среднему положению регулятора.

Параметры питающей системы:

- $X_{C \text{ МИН}} = 25 \text{ Ом}$ - сопротивление системы в минимальном режиме;
- $X_{C \text{ МАКС}} = 15 \text{ Ом}$ - сопротивление системы в максимальном режиме;
- $U_{CP \text{ НОМ}}^{BH} = 115 \text{ кВ}$ - среднее номинальное напряжение системы.

Параметры системы стороны СН:

- $U_{CP \text{ НОМ}}^{CH} = 37 \text{ кВ}$ - среднее номинальное напряжение стороны СН.

Параметры системы стороны НН:

- $U_{CP \text{ НОМ}}^{HH} = 10,5 \text{ кВ}$ - среднее номинальное напряжение стороны НН.

Параметры ТТ:

- $K_{TT}^{BH} = 80$ - коэффициент трансформации ТТ стороны ВН трансформатора;
- $K_{TT}^{CH} = 300$ - коэффициент трансформации ТТ стороны СН трансформатора;
- $K_{TT}^{HH} = 600$ - коэффициент трансформации ТТ стороны НН трансформатора.

Устройство защиты:

БМРЗ-ТД-10-30-21.

Трансформатор установлен на двухтрансформаторной подстанции. Предусмотрено питание трансформаторов со стороны ВН и параллельная работа трансформаторов на сторонах ВН и СН. Схема электрической сети приведена на рисунке 7.3.

Пример расчёта уставок приведён для трансформатора Т-1 (рисунок 7.3). Расчёт уставок для трансформатора Т-2 производится аналогично.

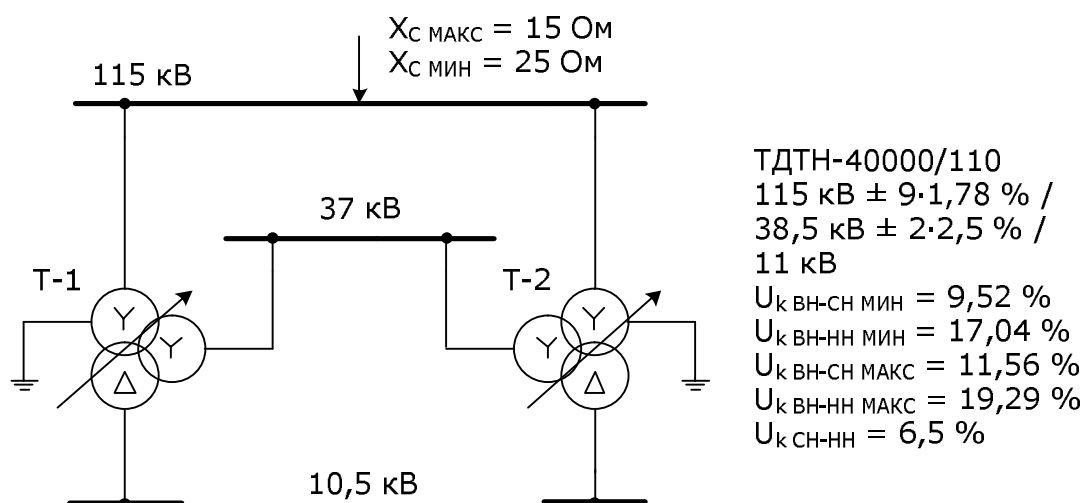


Рисунок 7.3 – Схема электрической сети

7.3.2 Расчёт сопротивления трансформатора

7.3.2.1 Сопротивление трансформатора рассчитать для двух предельных случаев - крайнего нижнего и крайнего верхнего положения РПН.

Напряжение обмотки ВН, соответствующее крайнему нижнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$U_{\text{МИН}}^{\text{ВН}} = U_{\text{СР НОМ}}^{\text{ВН}} \cdot \left(1 - \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}\right) = 115 \cdot \left(1 - \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100}\right) = 96,6 \text{ кВ.} \quad (7.65)$$

Напряжение обмотки ВН, соответствующее крайнему верхнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$U_{\text{МАКС}}^{\text{ВН}} = U_{\text{СР НОМ}}^{\text{ВН}} \cdot \left(1 + \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}\right) = 115 \cdot \left(1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100}\right) = 133,4 \text{ кВ.} \quad (7.66)$$

Вычисленное значение $U_{\text{МАКС}}^{\text{ВН}}$ получилось больше максимально допустимого для данной сети¹⁾.

В качестве напряжения $U_{\text{МАКС}}^{\text{ВН}}$ принять значение 126 кВ в соответствии с [10].

7.3.2.2 Сопротивление обмотки ВН трансформатора, соответствующее крайнему нижнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} X_{\text{Т ВН МИН}} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{(u_{\text{к ВН-СН МИН}} + u_{\text{к ВН-НН МИН}} - u_{\text{к СН-НН МИН}})}{100} \cdot \frac{U_{\text{МИН}}^{\text{ВН}^2}}{S_{\text{НОМ ТР}}} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{(9,52 + 17,04 - 6,5)}{100} \cdot \frac{96,6^2}{40} = 23,4 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (7.67)$$

7.3.2.3 Сопротивление обмотки СН трансформатора, соответствующее крайнему нижнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} X_{\text{Т СН МИН}} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{(u_{\text{к ВН-СН МИН}} + u_{\text{к СН-НН МИН}} - u_{\text{к ВН-НН МИН}})}{100} \cdot \frac{U_{\text{МИН}}^{\text{ВН}^2}}{S_{\text{НОМ ТР}}} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{(9,52 + 6,5 - 17,04)}{100} \cdot \frac{96,6^2}{40} = -1,19 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (7.68)$$

Сопротивлением обмотки СН трансформатора пренебречь, $X_{\text{Т СН МИН}} = 0$.

7.3.2.4 Сопротивление обмотки НН трансформатора, соответствующее крайнему нижнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} X_{\text{Т НН МИН}} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{(u_{\text{к ВН-НН МИН}} + u_{\text{к СН-НН МИН}} - u_{\text{к ВН-СН МИН}})}{100} \cdot \frac{U_{\text{МИН}}^{\text{ВН}^2}}{S_{\text{НОМ ТР}}} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{(17,04 + 6,5 - 9,52)}{100} \cdot \frac{96,6^2}{40} = 16,4 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (7.69)$$

¹⁾ См. таблицу В-1 [10].

7.3.2.5 Сопротивление обмотки ВН трансформатора, соответствующее крайнему верхнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$X_{T\text{ ВН МАКС}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(u_{k\text{ ВН-СН МАКС}} + u_{k\text{ ВН-НН МАКС}} - u_{k\text{ СН-НН МАКС}})}{100} \cdot \frac{U_{\text{МАКС}}^{\text{ВН}^2}}{S_{\text{НОМ ТР}}} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{(11,56 + 19,29 - 6,5)}{100} \cdot \frac{126^2}{40} = 48,3 \text{ Ом.} \quad (7.70)$$

7.3.2.6 Сопротивление обмотки СН трансформатора, соответствующее крайнему верхнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$X_{T\text{ СН МАКС}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(u_{k\text{ ВН-СН МАКС}} + u_{k\text{ СН-НН МАКС}} - u_{k\text{ ВН-НН МАКС}})}{100} \cdot \frac{U_{\text{МАКС}}^{\text{ВН}^2}}{S_{\text{НОМ ТР}}} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{(11,56 + 6,5 - 19,29)}{100} \cdot \frac{126^2}{40} = -2,44 \text{ Ом.} \quad (7.71)$$

Сопротивлением обмотки СН трансформатора пренебречь, $X_{T\text{ СН МАКС}} = 0$.

7.3.2.7 Сопротивление обмотки НН трансформатора, соответствующее крайнему верхнему положению РПН, рассчитать по формуле

$$X_{T\text{ НН МАКС}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(u_{k\text{ ВН-НН МАКС}} + u_{k\text{ СН-НН МАКС}} - u_{k\text{ ВН-СН МАКС}})}{100} \cdot \frac{U_{\text{МАКС}}^{\text{ВН}^2}}{S_{\text{НОМ ТР}}} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{(19,29 + 6,5 - 11,56)}{100} \cdot \frac{126^2}{40} = 28,2 \text{ Ом.} \quad (7.72)$$

7.3.3 Выбор ПТН блоков БМРЗ

7.3.3.1 Для выбора ПТН блоков БМРЗ произвести расчёт токов КЗ на сторонах ВН (точка К1 на рисунке 7.4), СН (точка К2 на рисунке 7.4) и НН (точка К3 на рисунке 7.4) трансформатора.

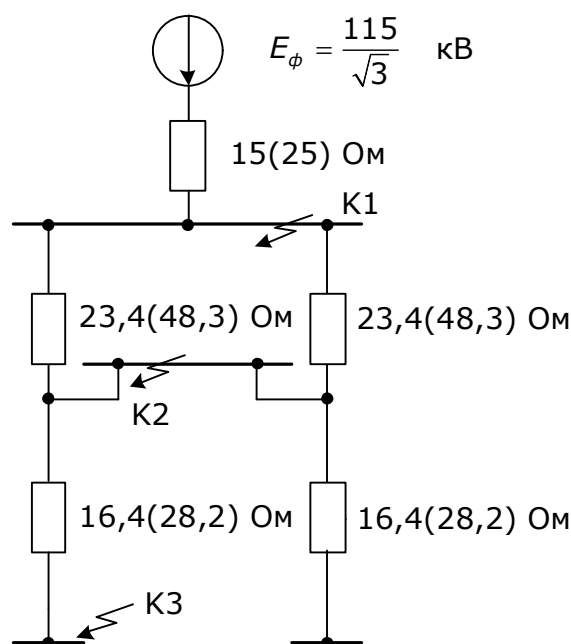


Рисунок 7.4 – Схема замещения

7.3.3.2 Периодическую составляющую максимального фазного тока КЗ на стороне ВН рассчитать по формуле

$$I_{K \text{ МАКС}}^{BH} = \frac{U_{CP \text{ НОМ}}^{BH}}{\sqrt{3} \cdot X_{C \text{ МАКС}}} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot 15} = 4427 \text{ А.} \quad (7.73)$$

7.3.3.3 По формуле (4.1) найти ток $i_{\text{МАКС ПТН}}^{BH}$ для стороны ВН

$$i_{\text{МАКС ПТН}}^{BH} \geq k_{\text{ПЕР}} \cdot \frac{I_{K \text{ МАКС}}^{BH}}{K_{\text{ТТ}}^{BH}} = 2 \cdot \frac{4427}{80} = 111 \text{ А.} \quad (7.74)$$

В соответствии с [12] выбрать ПТН с током $i_{\text{МАКС ПТН}}^{BH} = 130 \text{ А}$ и током $I_{\text{НОМ ПТН}}^{BH} = 1,0 \text{ А}$.

7.3.3.4 Для проверки выбранного ПТН по 4.4 рассчитать номинальный первичный ток стороны ВН трансформатора по формуле (3.2)

$$I_{\text{НОМ ТР}}^{BH} = \frac{S_{\text{НОМ ТР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ ТР}}^{BH}} = \frac{40000000}{\sqrt{3} \cdot 115000} = 200,8 \text{ А.} \quad (7.75)$$

Подставить полученные значения в формулу (4.3)

$$1,0 \leq 3 \cdot \frac{200,8}{80} = 7,53. \quad (7.76)$$

Выбранный ПТН обеспечивает измерение тока нагрузочного режима с заданной погрешностью.

7.3.3.5 Периодическую составляющую приведенного максимального фазного тока КЗ на стороне СН (выключатель стороны СН отключён) рассчитать по формуле

$$I_{K \text{ МАКС ПРИВ}}^{CH} = \frac{U_{CP \text{ НОМ}}^{BH}}{\sqrt{3} \cdot (X_{C \text{ МАКС}} + X_{T \text{ ВН МИН}})} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot (15 + 23,4)} = 1729 \text{ А.} \quad (7.77)$$

Привести полученное значение к напряжению стороны СН трансформатора по формуле

$$I_{K \text{ МАКС}}^{CH} = I_{K \text{ МАКС ПРИВ}}^{CH} \cdot \frac{U_{\text{МИН}}^{BH}}{U_{CP \text{ НОМ}}^{CH}} = 1729 \cdot \frac{96,6}{37} = 4514 \text{ А.} \quad (7.78)$$

7.3.3.6 По формуле (4-1) найти ток $i_{\text{МАКС ПТН}}^{CH}$ для стороны СН

$$i_{\text{МАКС ПТН}}^{CH} \geq k_{\text{ПЕР}} \cdot \frac{I_{K \text{ МАКС}}^{CH}}{K_{\text{ТТ}}^{CH}} = 2 \cdot \frac{4514}{300} = 30 \text{ А.} \quad (7.79)$$

В соответствии с [12] выбрать ПТН с током $i_{\text{МАКС ПТН}}^{CH} = 65 \text{ А}$ и током $I_{\text{НОМ ПТН}}^{CH} = 0,5 \text{ А}$.

7.3.3.7 Для проверки выбранного ПТН по 4.4 рассчитать номинальный первичный ток стороны СН трансформатора по формуле (3.2)

$$I_{\text{НОМ ТР}}^{\text{ВН}} = \frac{S_{\text{НОМ ТР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ ТР}}^{\text{ВН}}} = \frac{40000000}{\sqrt{3} \cdot 38500} = 600 \text{ А.} \quad (7.80)$$

Подставить полученные значения в формулу (4.3)

$$0,5 \leq 3 \cdot \frac{600}{300} = 6. \quad (7.81)$$

Выбранный ПТН обеспечивает измерение тока нагрузочного режима с заданной погрешностью.

7.3.3.8 Периодическую составляющую приведенного максимального фазного тока КЗ на стороне НН (выключатель стороны СН включён) рассчитать по формуле

$$I_{\text{К МАКС ПРИВ}}^{\text{НН}} = \frac{U_{\text{СР НОМ}}^{\text{ВН}}}{\sqrt{3} \cdot (X_{\text{С МАКС}} + \frac{X_{\text{Т ВН МИН}}}{2} + X_{\text{Т НН МИН}})} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot (15 + \frac{23,4}{2} + 16,4)} = 1541 \text{ А.} \quad (7.82)$$

Привести полученное значение к напряжению стороны НН трансформатора по формуле

$$I_{\text{К МАКС}}^{\text{НН}} = I_{\text{К МАКС ПРИВ}}^{\text{НН}} \cdot \frac{U_{\text{МИН}}^{\text{ВН}}}{U_{\text{СР НОМ}}^{\text{НН}}} = 1541 \cdot \frac{96,6}{10,5} = 14177 \text{ А.} \quad (7.83)$$

7.3.3.9 По формуле (4.1) рассчитать ток $i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{НН}}$ для стороны НН

$$i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{НН}} \geq k_{\text{ПЕР}} \cdot \frac{I_{\text{К МАКС ПРИВ}}^{\text{НН}}}{K_{\text{ТТ}}^{\text{НН}}} = 2 \cdot \frac{14177}{600} = 47 \text{ А.} \quad (7.84)$$

В соответствии с [12] выбрать ПТН с током $i_{\text{МАКС ПТН}}^{\text{НН}} = 65 \text{ А}$ и током $I_{\text{НОМ ПТН}}^{\text{НН}} = 0,5 \text{ А}$.

7.3.3.10 Для проверки выбранного ПТН по 4.4 рассчитать номинальный первичный ток стороны НН трансформатора по формуле (4.2)

$$I_{\text{НОМ ТР}}^{\text{НН}} = \frac{S_{\text{НОМ ТР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ ТР}}^{\text{НН}}} = \frac{40000000}{\sqrt{3} \cdot 11000} = 2099 \text{ А.} \quad (7.85)$$

Подставить полученные значения в формулу (4.3)

$$0,5 \leq 3 \cdot \frac{2099}{600} = 10,5. \quad (7.86)$$

Выбранный ПТН обеспечивает измерение тока нагрузочного режима с заданной погрешностью.

7.3.4 Выбор уставки срабатывания ДТО

7.3.4.1 Уставку срабатывания ДТО $I_{ДТО}$ по условию отстройки от броска тока намагничивания принять равной 4 о.е. (в соответствии с 5.2).

7.3.4.2 По формулам (5.2) – (5.5) определить относительный расчётный ток небаланса $I_{НБ\text{ расч}}$ при максимальном тормозном токе внешнего КЗ ($I_{К\text{ МАКС}}^{CH}$)

$$I_{НБ\text{ расч}} = (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} \cdot 1 + \frac{5-1}{2} \cdot \frac{2,5}{100} \cdot 1 + 0,05) \cdot \frac{1729}{200,8} = 4,4. \quad (7.87)$$

Здесь и далее в расчёте принять значения полных относительных погрешностей ТТ во всех режимах работы трансформатора равными 0,1 (реальная кратность тока КЗ не превосходит номинальную и реальная нагрузка на вторичные цепи ТТ не превосходит номинальную).

7.3.4.3 По формуле (5.1) рассчитать уставку срабатывания ДТО $I_{ДТО}$ исходя из условия отстройки от расчётного максимального тока небаланса

$$I_{ДТО} = 1,2 \cdot 4,4 = 5,28. \quad (7.88)$$

7.3.4.4 В качестве уставки срабатывания ДТО $I_{ДТО}$ принять большее из двух полученных по 7.3.4.1 и 7.3.4.3 значение. $I_{ДТО} = 5,28$.

7.3.5 Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\text{ нач}}$

7.3.5.1 Относительный расчетный ток небаланса, используемый при расчете $I_{ДЗТ\text{ нач}}$, рассчитать по формуле (6.2)

$$I_{НБ\text{ расч}} = 0,5 \cdot \left(1 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} + \frac{5-1}{2} \cdot \frac{2,5}{100} \cdot 1 + 0,05 \right) = 0,18. \quad (7.89)$$

7.3.5.2 По формуле (6.3) рассчитать уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\text{ нач}}$

$$I_{ДЗТ\text{ нач}} = 1,5 \cdot 0,18 = 0,27. \quad (7.90)$$

7.3.5.3 В соответствии с 6.2.6 принять уставку $I_{ДЗТ\text{ нач}}$ равной 0,3 о.е.

7.3.6 Выбор уставки коэффициента торможения второго участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ\ 2}$

7.3.6.1 По формулам (6.5) и (6.7) определить ток срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\ 2}$ при токе торможения $1,5 I_{НОМ\ ТР}$

$$I_{ДЗТ\ 2} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot \left(2 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} \cdot 1 + \frac{5-1}{2} \cdot \frac{2,5}{100} \cdot 1 + 0,05 \right) = 0,83. \quad (7.91)$$

7.3.6.2 По формуле (6.4) рассчитать значение уставки $K_{ТОРМ 2}$

$$K_{ТОРМ 2} = 0,83 - 0,3 = 0,53. \quad (7.92)$$

7.3.7 Выбор уставки коэффициента торможения третьего участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ 3}$

7.3.7.1 По формуле (6.9) рассчитать ток торможения, соответствующий максимальному току внешнего КЗ ($I_{К МАКС ПРИВ}^{CH}$)

$$I_{К ТОРМ} = \left(1 - \frac{2,5 \cdot 0,1}{2}\right) \cdot \frac{1729}{200,8} = 7,5. \quad (7.93)$$

7.3.7.2 По формуле (6.8) рассчитать уставку $K_{ТОРМ 3}$

$$K_{ТОРМ 3} = \frac{5,28 - 0,83}{7,5 - 1,5} = 0,75. \quad (7.94)$$

7.3.8 Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ нач ч}$ группы "чувствительных" уставок

7.3.8.1 Относительный расчетный ток небаланса, используемый при расчете $I_{ДЗТ нач ч}$, рассчитать по формуле (6.3)

$$I_{НБ расч} = 0,5 \cdot \left(1 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} + 0,05 + 0,05\right) = 0,127. \quad (7.95)$$

7.3.8.2 По формуле (6.1) рассчитать уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ нач ч}$

$$I_{ДЗТ нач ч} = 1,5 \cdot 0,127 = 0,19. \quad (7.96)$$

7.3.8.3 В соответствии с рекомендациями 6.2.6 принять значение уставки $I_{ДЗТ нач ч}$ равным 0,3.

7.3.9 Выбор уставки коэффициента торможения второго участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ 2 ч}$ группы "чувствительных" уставок

7.3.9.1 По формулам (6.5) и (6.7) определить ток срабатывание ДЗТ $I_{ДЗТ 2}$ при токе торможения $1,5 I_{НОМ ТР}$

$$I_{ДЗТ 2} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot \left(2 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} + 0,05 + 0,05\right) = 0,64. \quad (7.97)$$

7.3.9.2 По формуле (6.4) определить значение уставки $K_{ТОРМ 2 ч}$

$$K_{ТОРМ 2 ч} = 0,64 - 0,3 = 0,34. \quad (7.98)$$

7.3.10 Выбор уставки коэффициента торможения третьего участка характеристики торможения ДЗТ $K_{ТОРМ 3 ч}$ группы "чувствительных" уставок

7.3.10.1 По формулам (5.1) – (5.5) рассчитать ток $I_{ДТО ч}$ в соответствии с указаниями 6.4.2

$$I_{ДТО ч} = 1,2 \cdot (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} \cdot 1 + 0,05 \cdot 1 + 0,05) \cdot \frac{1729}{200,8} = 4,17. \quad (7.99)$$

7.3.10.2 Уставку $K_{ТОРМ 3 ч}$ рассчитать по формуле (6.8)

$$K_{ТОРМ 3 ч} = \frac{4,17 - 0,64}{7,5 - 1,5} = 0,59. \quad (7.100)$$

7.3.11 Проверка чувствительности ДЗТ

7.3.11.1 Для проверки чувствительности ДЗТ рассчитать приведенное минимальное относительное значение периодической составляющей тока КЗ:

- на стороне СН (точка К2 на рисунке 7.4) при включённом выключателе стороны СН по формуле

$$I_{К МИН ПРИВ}^{СН} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{U_{СР НОМ}^{ВН}}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot (X_{С МИН} + \frac{X_{Т ВН МАКС}}{2})} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot (25 + 48,3)} = 392 \text{ А}; \quad (7.101)$$

- на стороне НН (точка К3 на рисунке 7.4) при выключённом выключателе стороны СН по формуле

$$I_{К МИН ПРИВ}^{НН} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{U_{СР НОМ}^{ВН}}{\sqrt{3} \cdot (X_{С МИН} + X_{Т ВН МАКС} + X_{Т НН МАКС})} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot (25 + 48,3 + 28,2)} = 567 \text{ А}; \quad (7.102)$$

7.3.11.2 По формуле (6-10) определить коэффициент чувствительности ДЗТ при металлическом КЗ для наименьшего из токов, полученных в 7.3.11.1

$$K_{ч} = \frac{I_{К МИН}^{СН} \cdot (1 - \varepsilon_{МИН})}{I_{НОМ ТР}^{ВН} \cdot I_{ДЗТ НАЧ}} = \frac{392 \cdot (1 - 0,1)}{200,8 \cdot 0,3} = 5,8. \quad (7.103)$$

Коэффициент чувствительности удовлетворяет требованиям, изложенным в 6.5.2.

7.3.12 Выбор уставки сигнализации небаланса

7.3.12.1 В качестве максимального рабочего тока принять значение номинального тока трансформатора.

По формуле (6.3), рассчитать относительный расчётный ток небаланса, соответствующий максимальному рабочему току

$$I_{НБ\ расч} = 1,0 \cdot \left(1 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{19-1}{2} \cdot \frac{1,78}{100} \cdot 1 + \frac{5-1}{2} \cdot \frac{2,5}{100} \cdot 1 + 0,05 \right) = 0,36. \quad (7.104)$$

7.3.12.2 По формуле (6.12) рассчитать уставку сигнализации небаланса

$$I_{НБ} = K_{ОТС} \cdot I_{НБ\ расч} = 1,1 \cdot 0,36 = 0,4. \quad (7.105)$$

7.3.12.3 В соответствии с руководством по эксплуатации блока БМРЗ [12] уставка сигнализации небаланса $I_{НБ}$ должна быть задана коэффициентом $K_{НБ}$, равным отношению $I_{НБ}$ к уставке начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\ нач}$

$$K_{НБ} = \frac{I_{НБ}}{I_{ДЗТ\ нач}} = \frac{0,4}{0,3} = 1,34. \quad (7.106)$$

7.3.13 Выбор уставок блокирования ДЗТ при возникновении БТН

7.3.13.1 Уставку ИПБ $K_{ИПБ}$ в соответствии с 6.8.1 принять равной 0,15 о.е.

7.3.13.2 Уставку по времени ограничения длительности перекрёстного режима блокирования $T_{ПБ}$ в соответствии с 6.8.3 принять равной 2 с.

7.3.14 Для удобства ввода в блок БМРЗ свести уставки в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 – Уставки защиты

Уставки	Обозначение	Значение
Номинальный ток ПТН для стороны ВН, А	$I_{НОМ\ ПТН}^{ВН}$	1,0
Номинальный ток ПТН для стороны СН, А	$I_{НОМ\ ПТН}^{СН}$	0,5
Номинальный ток ПТН для стороны НН, А	$I_{НОМ\ ПТН}^{НН}$	0,5
Ток срабатывания ДТО, о.е.	$I_{ДТО}$	5,28
Коэффициент сигнализации небаланса, о.е.	$K_{НБ}$	1,34
Начальный ток срабатывания ДЗТ, о.е.	$I_{ДЗТ\ нач}$	0,3
Коэффициент торможения второго участка ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 2}$	0,53
Коэффициент торможения третьего участка ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 3}$	0,75
ИПБ, о.е.	$K_{ИПБ}$	0,15
Время ограничения длительности перекрёстного режима блокирования, с	$T_{ПБ}$	2
Начальный ток срабатывания "чувствительного" органа ДЗТ, о.е.	$I_{ДЗТ\ нач\ ч}$	0,3
Коэффициент торможения второго участка "чувствительного" органа ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 2\ ч}$	0,34
Коэффициент торможения третьего участка "чувствительного" органа ДЗТ	$K_{ТОРМ\ 3\ ч}$	0,59