

Министерство образования и науки Украины
Сумский государственный университет

Методические указания по выполнению расчетной
работы по теме «Расчет параметров защиты
трансформаторов» по курсу «Релейная защита и
автоматика»

для студентов специальностей
6.090603, 6.000008
Всех форм обучения

Сумы 2008

Составители В.С. Ноздренков
В. И. Романовский

Кафедра электроэнергетики

Введение.

По назначению в зависимости от ответственности и порядка действия защиты трансформаторов и автотрансформаторов подразделяются на основные, резервные и защиты, действующие на сигнал.

1. Основные защиты реагируют на все виды повреждений трансформатора или автотрансформатора (в дальнейшем – объекта) и действуют на отключение выключателей со всех сторон без выдержки времени.

К основным защитам относятся:

а) продольная дифференциальная токовая защита от всех видов замыканий на выводах и в обмотках сторон с заземленной нейтралью, а также от многофазных замыканий на выводах и в обмотках сторон с изолированной нейтралью;

б) газовая защита от замыканий внутри кожуха объекта, сопровождающихся выделением газа, а также при резком понижении уровня масла;

в) дифференциальная токовая защита дополнительных элементов (добавочных трансформаторов, синхронных компенсаторов, участков ошиновки).

2. Резервные защиты резервируют основные защиты и реагируют на внешние КЗ, действуя на отключение с двумя выдержками времени: с первой выдержкой времени отключается выключатель одной из сторон низшего напряжения (обычно той, где установлена защита), со второй – все выключатели объекта. Резервные защиты от междуфазных повреждений имеют несколько вариантов исполнения:

а) МТЗ без пуска по напряжению;

б) МТЗ с комбинированным пуском по напряжению;

в) МТЗ обратной последовательности с приставкой для действия при симметричных КЗ;

г) дистанционные защиты автотрансформаторов.

Резервные защиты от замыканий на землю выполняются в виде МТЗ нулевой последовательности.

3. Защиты, действующие на сигнал. К этим защитам относятся:

а) защита напряжения нулевой последовательности от замыканий на землю на стороне низшего напряжения (НН), работающей в режиме с изолированной нейтралью, эта защита

применяется при наличии синхронного компенсатора или, когда возможна работа с отключенным выключателем на стороне низшего напряжения;

б) МТЗ от симметричной перегрузки для трансформаторов с односторонним питанием устанавливается только со стороны питания (если одна из обмоток имеет мощность 60%, то защита от перегрузки устанавливается и на этой стороне), для автотрансформаторов и трехобмоточных трансформаторов с двусторонним питанием защита от перегрузки устанавливается на каждой стороне объекта, а для автотрансформаторов еще и на стороне нулевого вывода общей части обмотки; защита выполняется с токовым реле в одной фазе и независимой выдержкой времени, действующей на сигнал. Уставки выбираются так же, как и для генератора при симметричной перегрузке;

в) газовая защита, действующая на сигнал при медленном выделении газа.

Защита основного оборудования реализуется с помощью комплексов релейной защиты, выполненных на базе электромеханических устройств и с применением микроэлектроники (статическое реле защиты).

Начали применяться комплексы микропроцессорных защит генераторов, блоков генератор-трансформатор, трансформаторов, как правило, производства крупных зарубежных фирм (ABB, Siemens).

Электротехническая промышленность серийно выпускает следующие виды реле и комплектных устройств для защиты основного оборудования:

реле тока типа РТ-40/Р для применения в схемах УРОВ;

реле тока типа РТ-40/Ф со встроенным фильтром основной частоты для защиты генераторов;

реле тока типа РТЗ-51 для применения в схемах защит от замыканий на землю синхронных генераторов, мощных электродвигателей;

реле тока обратной последовательности типов РТФ-8 и РТФ-9 (взамен РТФ-70 для защиты генераторов и трансформаторов при несимметричных КЗ и перегрузке токами обратной последовательности);

реле дифференциальные типов РНТ-565, РНТ-566 с промежуточным насыщающимся трансформатором для

дифференциальных защит генераторов, трансформаторов и мощных электродвигателей;

реле дифференциальные типа РНТ-567 с промежуточным насыщающимся трансформатором для дифференциальных защит сборных шин и ошинок;

реле дифференциальные типа ДЗТ-11 с промежуточным насыщающимся трансформатором с магнитным торможением для дифференциальных защит генераторов, трансформаторов, мощных электродвигателей;

реле напряжения типов РН-53(153) и РН-54(154) для использования в качестве измерительных органов, реагирующих на повышение (РН-53) и понижение (РН-54) напряжения;

реле напряжения типа РНН-7 со встроенным фильтром основной частоты для применения в схемах защит генераторов;

реле напряжения обратной последовательности типа РНФ-1М;

блок-реле типа КИВ-500Р, входящее в состав устройства контроля состояния изоляции высоковольтных вводов напряжением 500 кВ;

блоки электрические типов БЭ 1101, БЭ 1102, БЭ 1103 для использования в защитах генераторов энергоблоков:

БЭ 1101 – для защиты генераторов при симметричных КЗ и перегрузок токами обратной последовательности (взамен РТФ-6М);

БЭ 1102 – для защиты ротора генератора от перегрузки током возбуждения;

БЭ 1103 – для защиты генератора от симметричных перегрузок обмотки статора;

блоки электрические типов БЭ 1104, БЭ 1105 для защиты цепей возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов от замыкания на землю в одной точке;

БЭ 1104 – блок контроля сопротивления изоляции;

БЭ 1105 – блок частотного фильтра;

дифференциальные комплекты типов ДЗТ-21, ДЗТ-23 для защиты силовых трансформаторов и автотрансформаторов;

блок типа БРЭ 1301 для защиты генераторов от замыкания на землю в обмотке статора генераторов энергоблоков, при этом:

блок исполнения БРЭ 1301.01 (ЗЗГ-11) предназначен для энергоблоков, в нейтрали обмотки статора которых установлен трансформатор напряжения или дугогасящий реактор;

блок исполнения БРЭ 1301.02 (33Г-12) предназначен для энергоблоков с изолированной нейтралью;

блоки реле сопротивления типа БРЭ 2801 для использования в качестве пусковых или измерительных дистанционных органов в защитах генераторов при междуфазных КЗ и асинхронного хода;

панель дистанционной защиты типа ПЭ 2105 для применения в качестве резервной защиты автотрансформаторов;

реле токовые типа РСТ 15 для использования в дифференциальных защитах генераторов и трансформаторов небольшой мощности и электродвигателей.

1. Проектирование релейной защиты трансформаторов и автотрансформаторов

1.1 Продольная дифференциальная токовая защита с реле типов РНТ-560 и ДЗТ-11

1.1.1 Основные условия выбора типа защит

Эти условия определяют расчетные режимы и требования, предъявляемые к защите в зависимости от параметров трансформатора или автотрансформатора.

1. Продольная дифференциальная защита применяется для трансформаторов мощностью 6,3 МВА и выше, а также для всех автотрансформаторов (при мощности трансформатора менее 6,3 МВА применяется токовая отсечка в сочетании с МТЗ). Для двухобмоточных трансформаторов используется двухрелейная схема защиты, для трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов – трехрелейная схема (на стороне низшего напряжения для повышения чувствительности ТТ соединяются в полную звезду). Защита выполняется с использованием дифференциальных реле типа РНТ, ДЗТ. Реле типа РНТ-560 обеспечивают повышенную отстройку от переходных режимов с апериодической составляющей, реле типа ДЗТ-11 – повышенную отстройку от периодических токов небаланса. Реле типа ДЗТ-20 создают отстройку от апериодических и периодических токов небаланса.

2. Выбор типа реле определяется расчетом с учетом следующих условий. Реле типа РНТ-560 имеют повышенную отстройку от токов небаланса с апериодической составляющей, в том числе и при однополярных бросках тока намагничивания трансформатора или автотрансформатора. Такие реле широко эксплуатируются, но на вновь проектируемых подстанциях не рекомендуется к установке, за исключением защиты двухобмоточных трансформаторов мощностью 25 МВА. Реле типа ДЗТ-11 имеют магнитное торможение, что обеспечивает отстройку от периодических токов небаланса, в том числе на трансформаторах с регулировкой напряжения под нагрузкой (РПН).

3. Для выбора тока срабатывания защиты по условиям отстройки от тока небаланса рассматриваются такие режимы, при которых ток небаланса будет наибольшим. Выбор расчетных условий определяется параметрами системы. Для трансформаторов с односторонним питанием расчетными являются трехфазные КЗ на шинах среднего (СН) и низшего (НН) напряжений (точки К1 и К2, рисунок 1.1). при двустороннем питании расчетным может быть и КЗ на шинах высшего (ВН) напряжения (точка К3).

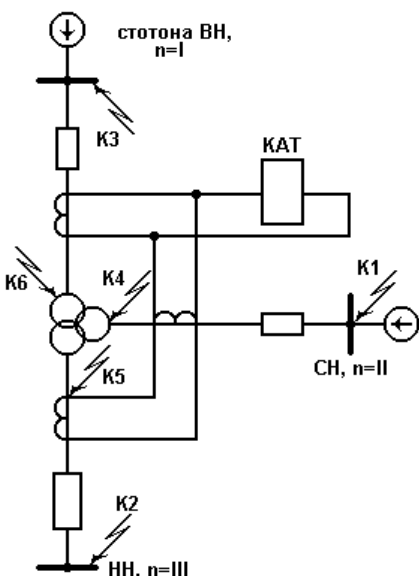


Рисунок 1.1. Поясняющая схема к расчету дифференциальной токовой защиты трансформатора.

работы системы (точки К4 и К5, рисунок 1.1). при двустороннем питании расчетной по чувствительности может оказаться и однофазное или двухфазное КЗ на стороне ВН (точка К6, рисунок 1.1). Заметим, что при нескольких трансформаторах на подстанции расчетным является режим раздельной работы. Это справедливо как для проверки чувствительности, так и для выбора тока срабатывания.

1.1.2 Предварительный расчет защиты.

Первоначально определяется ток срабатывания защиты с реле РНТ по большему из двух условий.

1. Отстройка от броска тока намагничивания, возникающего при включении трансформатора и автотрансформатора на холостой ход

4. Для проверки чувствительности рассматриваются такие режимы, при которых чувствительность будет минимальной. При одностороннем питании коэффициент чувствительности проверяется при внутреннем двухфазном КЗ на сторонах СН и НН в минимальном режиме

или при восстановлении напряжения после отключения КЗ, а также от переходных токов небаланса при внешних КЗ:

$$I_{с.з} = k_{отс} I_{ном} \quad (1.1)$$

где $k_{отс} = 1,3$ - коэффициент отстройки для реле типа РНТ; $I_{ном}$ - номинальный ток той стороны трансформатора, напряжение которой принято в качестве расчетной; для автотрансформатора при определении $I_{ном}$ берется типовая мощность.

2. Отстройка от максимального периодического тока небаланса, возникающего при внешних КЗ:

$$I_{с.з} \geq k_з I_{нб.расч} \quad (1.2)$$

где $k_з = 1,3$ - коэффициент запаса по избирательности; $I_{нб.расч}$ - максимальный расчетный ток небаланса, определяемый как сумма трех составляющих, пропорциональных периодической слагающей тока КЗ,

$$I_{нб.расч} = I'_{нб.расч} + I''_{нб.расч} + I'''_{нб.расч} \quad (1.3)$$

Составляющая тока $I'_{нб.расч}$ обусловлена погрешностью трансформатора тока:

$$I'_{нб.расч} = k_{одн} \varepsilon I_{к.макс} \quad (1.4)$$

где $k_{одн} = 1,0$; $\varepsilon = 0,1$; $I_{к.макс}$ - максимальный ток внешнего КЗ, приведенный к расчетной ступени напряжения.

Составляющая $I''_{нб.расч}$ обусловлена регулировкой коэффициента трансформации силового трансформатора (автотрансформатора) после того, как защита была сбалансирована на средних отпайках. Это составляющая определяется как сумма токов небаланса на сторонах, где имеется регулирование:

$$I''_{нб.расч} = \sum_{n=I}^{III} \Delta U_n I_{к.макс.n} \quad (1.5)$$

где ΔU_n - относительная погрешность регулировки напряжения, принимается равной половине диапазона регулирования стороны n трансформатора (если регулирование $\pm 10\%$, то $\Delta U_n = 0,1$); $I_{к.макс.n}$ - максимальный периодический ток, протекающий по стороне n трансформатора (рисунок 1.1).

Составляющая $I_{\text{нб.расч}}'''$ обусловлена неточностью установки на реле расчетных чисел витков:

$$I_{\text{нб.расч}}''' = \sum_{n=1}^{III} \Delta w_n I_{\text{к.макс.н}} \quad (1.6)$$

где $\Delta w_n = \frac{w_{\text{н.расч}} - w_n}{w_n}$ - погрешность выравнивания для стороны n трансформатора. При предварительном расчете эта составляющая не учитывается.

3. Выбор типа реле производится на основе оценки чувствительности защиты, которую определяют приближенно, полагая, что весь ток повреждения (приведенный ко вторичной стороне) попадает в реле:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.МИН}}^{(2)}}{I_{\text{с.з}}} \geq 2,0 \quad (1.7)$$

Допускается снижение коэффициента чувствительности против нормируемого значения для трансформаторов и автотрансформаторов, имеющих токоограничительный реактор на стороне низшего напряжения (НН), входящей в зону дифференциальной защиты до 1,5 при КЗ за реактором. Кроме того, для трансформаторов мощностью менее 80 МВА такое же снижение коэффициента чувствительности допускается при КЗ на стороне НН.

В тех случаях, когда чувствительность не обеспечивается при КЗ за реактором, дифференциальную токовую защиту выполняют с двумя комплектами реле: грубым и чувствительным. Грубый комплект, действующий без выдержки времени, рассчитывается как для обычной дифференциальной токовой защиты объекта. Чувствительный комплект действует с выдержкой времени 0,5 - 1,0 с, что позволяет производить отстройку от броска намагничивающего тока объекта из условия

$$I_{\text{с.з.ч}} = (0,75 - 1,0) I_{\text{ном}} \quad (1.8)$$

4. Если чувствительность оказывается достаточной, то продолжают расчет защиты с реле РНТ в соответствии с п.1.1.3. В процессе расчета уставок реле уточненный ток срабатывания (с учетом $I_{\text{нб.расч}}'''$) может оказаться больше предварительно найденного, а чувствительность защиты недостаточной. В этом случае проверяется возможность снизить ток срабатывания за счет

составляющих $I''_{\text{нб.расч}}$ и $I'''_{\text{нб.расч}}$. Составляющую $I''_{\text{нб.расч}}$ можно не учитывать, если регулирование коэффициента трансформации силового трансформатора производится редко. В этом случае уставки реле рассчитываются для каждого положения переключателя напряжения (обычно для верхнего и нижнего ответвлений), т.е. при изменении положения переключателя должна изменяться и уставка, выполняемая на реле. Составляющую $I'''_{\text{нб.расч}}$ можно уменьшить за счет более рационального выбора числа витков реле путем изменения коэффициентов трансформации ТТ отдельных сторон силового трансформатора.

5. Если дифференциальная защита с реле РНТ не обеспечивает необходимой чувствительности, а расчетной является отстройка от тока небаланса, то принимают реле типа ДЗТ-11, имеющее магнитное торможение от сквозного тока КЗ. При выборе тока срабатывания защиты с реле ДЗТ-11 в выражении (1.1) принимается $k_{\text{отс}} = 1,5$, а в (1.2) - $k_{\text{с}} = 1,5$. Причем, в качестве расчетного рассматривается внешнее КЗ, при котором торможение отсутствует.

6. Необходимо отметить, что расчетные коэффициенты для отстройки от броска намагничивающего тока после уточнений, рекомендованных в [3], могут быть снижены для реле РНТ-560 до $k_{\text{отс}} = 0,9(0,8)$ при вторичном номинальном токе 5(1) А; для реле ДЗТ-11 до $k_{\text{отс}} = 1,0(0,8)$ при вторичном номинальном токе 5(1) А.

При недостаточной чувствительности защиты с реле ДЗТ-11 применяют реле ДЗТ-20.

1.1.3 Расчет уставок реле РНТ-560.

1. Определяются первичные номинальные токи для всех n сторон защищаемого оборудования

$$I_{\text{ном.n}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном.n}}} \quad (1.9)$$

где $S_{\text{ном}}$ - номинальная мощность трансформатора или проходная мощность автотрансформатора;

$U_{\text{ном.n}}$ - номинальное напряжение стороны n защищаемого оборудования.

2. Определяются вторичные номинальные токи плеч защиты:

$$I_{в.ном.n} = \frac{I_{ном.n} k_{сх.n}}{K_{I.n}} \quad (1.10)$$

где $k_{сх.n}$ - коэффициент схемы соединения вторичных обмоток ТТ на стороне n объекта (при соединении обмоток в звезду $k_{сх} = 1,0$; при соединении обмоток в треугольник $k_{сх} = \sqrt{3}$); $K_{I.n}$ - коэффициент трансформации ТТ, принятый на стороне n объекта (при выборе коэффициента ТТ надо учитывать, чтобы вторичные номинальные токи существенно не превышали паспортные значения токов 5 А или 1 А). Сторона с наибольшим вторичным током принимается в качестве основной, что обеспечивает наименьшую погрешность выравнивания для реле РНТ-560 и ДЗТ-11.

3. Определяется ток срабатывания реле для основной стороны трансформатора:

$$I_{с.р.n} = \frac{I_{с.з} k_{сх} \left(\frac{U_{ном.расч}}{U_{ном.n}} \right)}{K_{I.n}} \quad (1.11)$$

где $U_{ном.расч}$ - номинальное напряжение стороны, соответствующей расчетной ступени напряжения. Если расчет защиты выполняется для разных положений переключателя напряжения трансформатора, то это учитывается при определении тока срабатывания защиты введением коэффициента $k_{рег} = (1 + \Delta U)$ и $k_{рег} = (1 - \Delta U)$ в числитель выражения (1.11).

4. Находится расчетное число витков для основной стороны:

$$W_{осн.расч} = \frac{F_{с.р}}{I_{с.р}} \quad (1.12)$$

Если расчетное число витков оказывается дробным, то принимается ближайшее меньшее целое значение $W_{\text{ОСН}}$, что обеспечивает запас по избирательности.

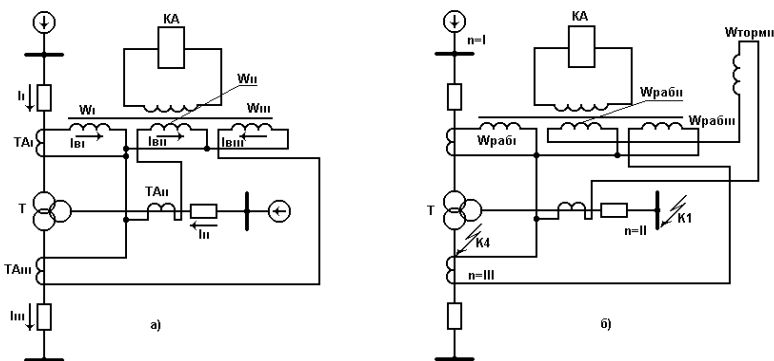


Рисунок 1.2. Упрощенные схемы дифференциальных защит с реле РНТ-560 (а) и ДЗТ-11 (б).

5. Расчет числа витков для других сторон защиты выбираются по условиям баланса на реле МДС защиты при внешнем КЗ или нормальном режиме (рисунок 1.2, а)

$$I_{\text{В.НОМ I}} W_{\text{I}} = I_{\text{В.НОМ II}} W_{\text{II}} = I_{\text{В.НОМ III}} W_{\text{III}}$$

откуда

$$W_{\text{расч. n}} = W_{\text{ОСН}} \left(\frac{I_{\text{В.НОМ.ОСН}}}{I_{\text{В.НОМ. n}}} \right) \quad (1.13)$$

Для неосновных сторон к установке на реле принимается ближайшее целое значение W_n , что обеспечивает наименьшую погрешность выравнивания.

6. Находится ток срабатывания защиты с учетом составляющей $I_{\text{нб.расч}}'''$ при КЗ на той стороне, где ток небаланса наибольший, и уточняется по выражению (1.11) ток срабатывания реле.

Если полученное значение тока срабатывания окажется больше ранее найденного, то число витков на основной стороне принимается на один меньше, а для неосновных сторон принимается ближайшее целое число витков.

Расчет повторяется до тех пор, пока не обеспечится условие

$$I_{\text{с. pi}} \leq I_{\text{с. p(i-1)}}$$

где i - номер варианта расчета при изменении $w_{оч}$.

7. Чувствительность защиты проверяется при внутренних КЗ в расчетных точках:

$$k_{\text{ч}} = \sum_{n=1}^{III} \frac{I_{\text{вн}} W_n}{E_{\text{с.п}}} \geq 2 \quad (1.14)$$

где $I_{\text{вн}}$ - вторичный ток плеча защиты со стороны n трансформатора при расчетном КЗ (определяется по схемам токораспределения, приведенным в [2,3]). Практически при сбалансированных МДС плеч защит коэффициент чувствительности может быть определен по первичным токам с погрешностью не более 10%:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}}{I_{\text{с.з}}} \geq 2$$

1.1.4 Расчет уставок реле типа ДЗТ-11.

1. При использовании реле ДЗТ-11 тормозную обмотку включают обычно на той стороне, КЗ на которой дает наибольший ток небаланса (например, точка К1, рисунок 1.2, б). При этом указанный ток небаланса при выборе тока срабатывания не учитывается.

2. Определение числа витков $w_{\text{раб.н}}$, которые устанавливаются на рабочих обмотках разных сторон для обеспечения баланса МДС на реле, производится также, как и для реле РНТ (см. п.1.1.3, подп. 1-5).

3. Число витков тормозной обмотки, обеспечивающее надежную отстройку реле от тока небаланса при данном виде КЗ, определяется как

$$w_{\text{торм.н}} = \frac{k_{\text{з}} I_{\text{нб.расч}}}{I_{\text{торм.н}}} \frac{w_{\text{раб.н}}}{\text{tg}\alpha} \quad (1.15)$$

где $k_{\text{з}} = 1,5$; $I_{\text{торм.н}}$ - первичный тормозной ток стороны n трансформатора, на которой включена тормозная обмотка; $\text{tg}\alpha = 0,75$ - тангенс угла наклона касательной проведенной из начала координат к нижней расчетной по избирательности тормозной характеристике (рисунок 1.3).

4. Проверка чувствительности защиты при внутренних повреждениях без торможения (например, точка К4, рисунок 1.2, б) производится так же, как и для реле РНТ:

$$k_{\text{ч}} = \frac{F_{\text{раб}\Sigma}}{F_{\text{с.р}0}} \quad (1.16)$$

где $F_{\text{с.р}0}$ - МДС срабатывания реле ДЗТ при отсутствии торможения;

$$F_{\text{раб}\Sigma} = \sum_{n=I}^{III} I_{\text{в.н}} W_{\text{раб.н}},$$

где $I_{\text{в.н}}$ - вторичный ток плеча защиты при КЗ в расчетной точке;

$W_{\text{раб.н}}$ - число рабочих витков реле на стороне n трансформатора.

5. Чувствительность при внутреннем КЗ с торможением (например, точка К4 при наличии питания со стороны $n = II$) производится следующим образом. Первоначально определяется рабочая и тормозная МДС, подводимые к реле

$$F_{\text{раб}\Sigma}; F_{\text{раб.н}} = I_{\text{в.н}} W_{\text{торм.н}}.$$



Рисунок 1.3. К определению чувствительности дифференциальной защиты с реле типа ДЗТ-11 при наличии торможения.

В дальнейшем на чертеже тормозной характеристики откладывают точку А ($F_{\text{торм.н}}; F_{\text{раб}\Sigma}$), соответствующую внутреннему КЗ с торможением. Точку А соединяют с началом координат прямой линией. Пересечение этой линии с верхней расчетной по чувствительности тормозной характеристикой дает точку В (рисунок 1.3). Проекция точки В на ось ординат соответствует МДС

срабатывания реле $F_{c,p}$ при наличии торможения для данного режима.

Коэффициент чувствительности определяется как

$$k_{\text{ч}} = \frac{F_{\text{раб}\Sigma}}{F_{c,p}} \geq 1,8.$$

1.2 Продольная дифференциальная токовая защита с реле ДЗТ-20

1.2.1 Основные характеристики защиты и реле.

Дифференциальные токовые защиты с реле типа ДЗТ-20 используются в качестве основных защит трансформаторов и автотрансформаторов (включая защиту этих объектов в составе блоков с генераторами) от междуфазных повреждений на стороне с изолированной нейтралью и от всех видов КЗ на сторонах с эффективно заземленной нейтралью.

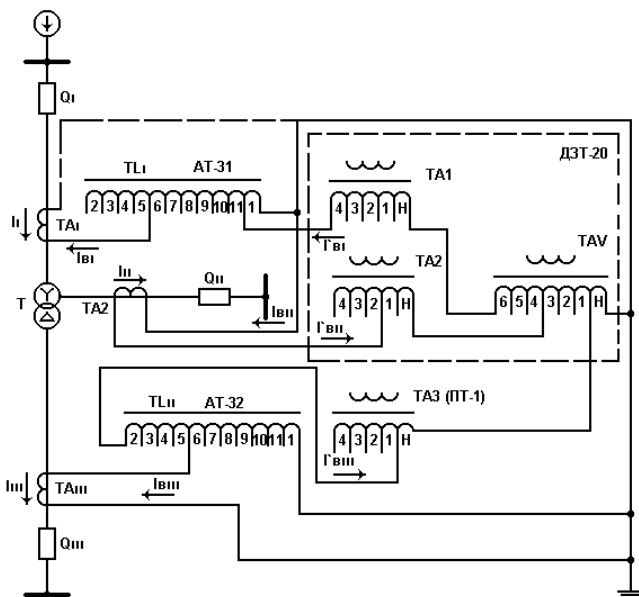


Рисунок 1.4. Поясняющая схема включения токовых цепей дифференциальной защиты автотрансформатора с реле ДЗТ-20.

Защита в трехфазном трехрелейном исполнении с общим выходом трех фаз у реле ДЗТ-21 и пофазным выходом у реле ДЗТ-23 для защиты группы однофазных силовых трансформаторов или автотрансформаторов.

У реле ДЗТ-20 применены времяимпульсный способ распознавания форм дифференциального тока и торможения от второй гармоники, что обеспечивает повышенную отстройку от бросков намагничивающего тока и переходных токов небаланса и позволяет снизить минимальный ток срабатывания защиты до 30% номинального тока трансформатора или автотрансформатора. Кроме того, у реле ДЗТ-20 для повышения быстродействия предусмотрена токовая отсечка, а чувствительный орган имеет торможение от сквозного тока КЗ, что обеспечивает отстройку от установившихся токов небаланса. Собственно реле ДЗТ-20 обеспечивает двухстороннее торможение, но с помощью трехфазных приставок ПТ-1 для дополнительного торможения создается требуемое многостороннее торможение (стороны $n - I, II, III$, рисунок 1.4). Реле ДЗТ-20 выполнено для вторичного номинального тока 5 А и имеет номинальные токи ответвлений трансреактора ТAV $I_{отв.ном}$ на выводах 6-1 (рисунок 1.4) соответственно 2,5; 3,0; 3,63; 4,25; 4,6; 5,0А при номинальных токах ответвлений в цепях трансформатора тока ТА1, ТА2, ТА3 $I_{отв.торм}$ на выводах 4-1 (рисунок 1.4) соответственно 2,5; 3,0; 3,75; 5,0А.

Особенностью выполнения дифференциальной защиты с реле ДЗТ-20 по сравнению с реле РНТ-560 и ДЗТ-11 является применение промежуточных автотрансформаторов тока ТLI, TLII (рисунок 1.4), обеспечивающих согласование вторичных номинальных токов сторон защиты I_{BI}, I_{BIII} до величин I'_{BI}, I'_{BIII} , соответствующих уставкам реле ДЗТ-20. Изменение приведенного вторичного тока в автотрансформаторах тока ТLI, TLII происходит за счет различного числа витков, включенных в цепь трансформаторов тока ТАI, ТАIII (рисунок 1.4) и в цепь реле ДЗТ-20, исходя из баланса намагничивающих сил подводимых и отводимых токов (ток намагничивания промежуточных автотрансформаторов тока мал и в балансе намагничивающих сил не учитывается).

Промежуточный автотрансформатор тока ТLI типа АТ-31 (рисунок 1.4) выполнен повышающим для увеличения приведенного

вторичного тока, в том числе и при применении трансформаторов тока со вторичным номинальным током 1 А. Условие баланса намагничивающих сил для АТ-31 (рисунок 1.4) $I_{\text{ВІ}} w_{1-6} = I'_{\text{ВІ}} w_{1-11}$, и, поскольку $w_{1-11} < w_{1-6}$, приведенный ток увеличивается. Комбинацией ответвлений на автотрансформаторе ТЛІ и трансформаторе ТАУ можно получить с малым шагом до 100 значений тока срабатывания реле (таблица 1.1).

Промежуточный автотрансформатор тока ТЛІІ типа АТ-32 (рисунок 1.4) выполнен понижающим для уменьшения приведенного вторичного тока при вторичных номинальных токах более 5 А. Условие баланса намагничивающих сил для АТ-32 (рисунок 1.4) $I_{\text{ВІІІ}} w_{1-5} = I'_{\text{ВІІІ}} w_{1-2}$, и, поскольку $w_{1-2} > w_{1-5}$, приведенный ток снижается. Комбинацией ответвлений на автотрансформаторе ТЛІІ и трансреакторе ТАУ можно получить с малым шагом более 100 значений тока срабатывания реле (таблица 1.2).

Для выбранных номинальных ответвлений реле ДЗТ-20 ($I_{\text{отв.ном}}$ - на трансреакторе ТАУ, $I_{\text{отв.торм}}$ - на трансформаторах тока ТА) предусмотрены следующие регулировки уставок срабатывания: для токовой отсечки – 6 или 9 ступенчато

$$I_{* \text{с.отс}} = \frac{I_{\text{с.отс}}}{I_{\text{отв.ном}}}, \quad (1.17)$$

для чувствительного органа по цепям срабатывания – от 0,3 до 0,7 плавно

$$I_{* \text{с.р.мин}} = \frac{I_{\text{с.р.мин}}}{I_{\text{отв.ном}}} \quad (1.18)$$

для чувствительного органа по цепям торможения – 0,6 или 1,0 ступенчато

$$I_{* \text{торм.нач}} = \frac{I_{\text{тор.нач.в}}}{I_{\text{отв.торм}}} \quad (1.19)$$

Отстройка от периодических токов небаланса при сквозных коротких замыканиях обеспечивается автоматическим увеличением тока срабатывания с помощью тормозной характеристики, приведенной на рисунке 1.5. Тормозная характеристика $I_{* \text{с.р}}(I_{* \text{торм}})$ приведена в осях

$$I_{*c.p} = \frac{I_{c.p}}{I_{отв.ном}} \quad (1.20)$$

Таблица 1.1. Номинальные токи для ответвлений автотрансформатора тока типа АТ-31 при подключении к различным ответвлениям трансреактора ТАВ

I _{отв.ном} ТЛ, А	№ ответвлений		I _{отв.ном} ТАВ, А	I _{отв.ном} ТЛ, А	№ ответвлений		I _{отв.ном} ТЛ, А
	К ТТ	К ТАВ			К ТТ	К ТАВ	
0,34	1-2	1-11	2,5	1,3	1-6	1-9	2,5
0,37	1-2	1-10	2,5	1,34	1-6	1-11	3
0,4	1-2	1-9	2,5	1,38	1-5	1-11	4,25
0,41	1-2	1-11	3	1,39	1-6	1-8	2,5
0,43	1-2	1-8	2,5	1,45	1-7	1-11	2,5
0,44	1-3	1-11	2,5	1,49	1-5	1-11	4,6
0,48	1-2	1-9	3	1,5	1-5	1-10	2,5
0,49	1-2	1-11	3,63	1,56	1-6	1-9	3
0,52	1-3	1-8	3	1,58	1-7	1-10	2,5
0,53	1-2	1-11	3,63	1,62	1-5	1-11	5
0,54	1-3	1-10	3	1,71	1-7	1-9	2,5
0,56	1-3	1-8	2,5	1,74	1-6	1-10	3,63
0,58	1-4	1-10	3	1,75	1-5	1-8	4,25
0,6	1-3	1-11	2,5	1,76	1-5	1-9	4,6
0,63	1-3	1-9	3	1,84	1-7	1-8	2,5
0,64	1-4	1-11	3,63	1,89	1-6	1-9	3,63
0,65	1-2	1-10	2,5	1,97	1-8	1-11	2,5
0,68	1-4	1-11	5	2,02	1-6	1-11	4,6
0,71	1-4	1-9	2,5	2,04	1-6	1-10	4,5
0,72	1-2	1-11	3	2,05	1-7	1-9	3
0,74	1-3	1-10	5	2,1	1-7	1-11	3,63
0,75	1-4	1-11	4,25	2,14	1-8	1-10	2,5
0,76	1-4	1-8	2,5	2,21	1-7	1-8	3
0,78	1-2	1-10	3	2,21	1-6	1-11	5
0,8	1-5	1-9	5	2,32	1-8	1-9	2,5
0,81	1-3	1-11	2,5	2,36	1-8	1-11	3
0,82	1-3	1-10	4,25	2,39	1-6	1-9	4,6
0,82	1-3	1-11	4,6	2,49	1-7	1-9	3,63
0,85	1-4	1-9	3	2,57	1-8	1-10	3
0,87	1-4	1-11	3,63	2,66	1-7	1-11	4,6
0,88	1-5	1-10	2,5	2,68	1-7	1-10	4,25
0,89	1-3	1-11	5	2,8	1-6	1-8	5

0,95	1-4	1-10	3,63	2,84	1-8	1-11	3,63
0,97	1-3	1-10	5	2,9	1-7	1-11	5
0,97	1-5	1-11	3	3,12	1-8	1-10	3,63
1,03	1-5	1-8	2,5	3,14	1-7	1-8	4,25
1,06	1-5	1-10	3	3,15	1-7	1-9	4,6
1,1	1-6	1-11	2,5	3,16	1-7	1-10	5
1,11	1-4	1-8	3,63	3,41	1-7	1-9	5
1,12	1-6	1-11	2,5	3,64	1-8	1-10	4,25
1,2	1-6	1-10	2,5	3,68	1-7	1-8	5
1,22	1-4	1-11	5	3,92	1-9	1-10	4,25
1,23	1-5	1-8	3	3,93	1-8	1-11	5
1,28	1-5	1-10	3,63	3,95	1-8	1-9	4,25
1,29	1-4	1-8	4,25	4,29	1-8	1-10	5

Таблица 1.2. Номинальные токи ответвлений автотрансформатора тока типа АТ-32 при подключении к различным ответвлениям трансректора ТАВ

I _{отв. ном} ТЛ, А	№ ОТВЕТВЛЕНИЙ		I _{отв. ном} ТАВ, А	I _{отв. ном} ТЛ, А	№ ОТВЕТВЛЕНИЙ		I _{отв. ном} ТЛ, А
	к ТТ	к ТАВ			к ТТ	к ТАВ	
5,13	1-10	1-7	2,5	10,39	1-11	1-5	2,5
5,18	1-7	1-4	2,5	10,41	1-8	1-3	3,63
5,31	1-6	1-3	3	10,62	1-10	1-4	2,5
5,39	1-6	1-5	4,25	11,05	1-9	1-3	3
5,41	1-4	1-3	5	11,2	1-7	1-3	5
5,44	1-3	1-2	5	11,3	1-8	1-4	4,25
5,47	1-5	1-4	4,25	11,4	1-8	1-2	3,63
5,5	1-5	1-2	3,63	11,5	1-10	1-3	2,5
5,61	1-7	1-3	2,5	12,05	1-10	1-5	3,63
5,77	1-6	1-2	3	12,12	1-9	1-5	4,6
5,84	1-7	1-5	3,63	12,2	1-7	1-2	5
5,88	1-4	1-2	5	12,35	1-9	1-4	3,63
5,93	1-6	1-4	3,63	12,38	1-11	1-5	3
6,1	1-7	1-2	2,5	12,5	1-10	1-2	2,5
6,19	1-8	1-5	3	12,75	1-10	1-4	3
6,22	1-7	1-4	3	13,2	1-9	1-5	5
6,35	1-6	1-5	5	13,3	1-11	1-4	2,5
6,41	1-5	1-3	4,6	13,35	1-9	1-3	3,63
6,42	1-6	1-3	3,63	13,8	1-10	1-3	3
6,44	1-5	1-4	5	14,01	1-10	1-5	4,25

6,6	1-9	1-5	2,5	14,4	1-11	1-3	2,5
6,74	1-7	1-3	3	14,51	1-9	1-2	3,63
6,84	1-7	1-5	4,25	15,0	1-10	1-2	3
6,94	1-6	1-4	4,25	15,2	1-10	1-5	4,6
6,98	1-5	1-3	5	15,42	1-10	1-4	3,63
6,99	1-6	1-2	3,63	15,60	1-8	1-2	5
7,17	1-8	1-3	2,5	15,65	1-11	1-2	2,5
7,32	1-7	1-2	3	15,95	1-11	1-4	3
7,41	1-7	1-5	4,6	16,5	1-10	1-5	5
7,49	1-8	1-5	3,63	16,7	1-10	1-3	3,63
7,51	1-6	1-4	3,63	16,9	1-9	1-3	4,6
7,52	1-7	1-4	3,63	17,0	1-9	1-4	5
7,6	1-5	1-2	5	17,25	1-11	1-3	3
7,82	1-8	1-2	2,5	17,51	1-11	1-5	4,25
7,92	1-9	1-5	3	18,05	1-10	1-4	4,25
7,97	1-8	1-4	3	18,15	1-10	1-2	3,63
8,05	1-7	1-5	5	18,4	1-9	1-3	5
8,14	1-7	1-3	3,63	18,75	1-11	1-2	3
8,25	1-10	1-5	2,5	18,95	1-11	1-5	4,6
8,5	1-9	1-4	2,5	19,25	1-11	1-4	3,63
8,63	1-8	1-3	3	19,52	1-10	1-3	4,25
8,76	1-8	1-5	4,25	19,55	1-10	1-4	4,6
8,81	1-7	1-4	4,25	20,0	1-9	1-2	5
8,85	1-6	1-3	5	20,6	1-11	1-5	5
9,2	1-9	1-3	2,5	20,9	1-11	1-3	3,63
9,38	1-8	1-2	3	21,2	1-10	1-4	5
9,49	1-8	1-5	4,6	21,25	1-10	1-2	4,25
9,53	1-7	1-3	4,25	22,6	1-11	1-4	4,25
9,55	1-7	1-4	4,6	22,7	1-11	1-2	3,63
9,57	1-9	1-5	3,63	23,0	1-10	1-2	4,6
9,61	1-6	1-2	5	24,4	1-11	1-4	4,6
9,64	1-8	1-4	3,63	24,6	1-11	1-3	4,25
9,9	1-10	1-5	3	25,0	1-10	1-2	5
10,0	1-9	1-2	2,5	26,6	1-11	1-2	4,25
10,2	1-9	1-4	3	28,8	1-11	1-3	5
10,3	1-11	1-5	2,5	31,3	1-11	1-2	5
10,32	1-7	1-3	4,6				

$$I_{* \text{ торм}} = 0,5 \sum_1^n \frac{I_{\text{торм.в.п}}}{I_{\text{отв.торм.л}}} \quad (1.21)$$

и состоит из горизонтального и наклонного участков характеристики с координатами точки перегиба ($I_{* \text{ с.р.мин}}$, $I_{* \text{ торм.нач}}$). Наличие горизонтального участка повышает чувствительность защиты при

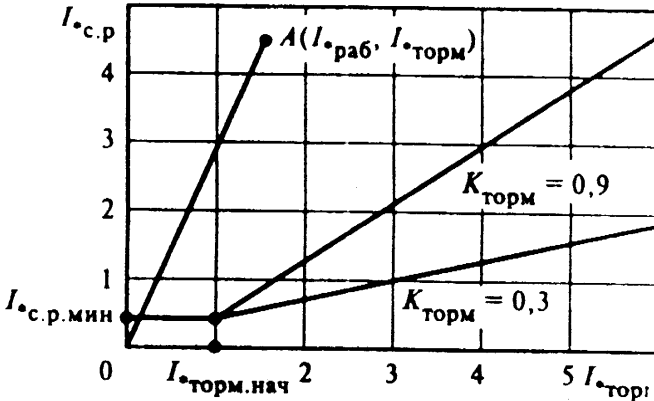


Рисунок 1.5. Тормозные характеристики реле ДЗТ-20.

внутренних повреждениях с торможением. Наклон характеристики определяется коэффициентом торможения, который может плавно регулироваться от 0,3 до 0,9, и в реальной расчетной области $I_{* \text{ торм}} \geq 2$ определяется выражением

$$k_{\text{торм}} = \frac{I_{* \text{ с.р}} - I_{* \text{ с.р.мин}}}{I_{* \text{ торм}} - I_{* \text{ торм.нач}}} \quad (1.22)$$

1.2.2 Расчет уставок срабатывания с балансировкой токов плеч на автотрансформаторах тока.

В отличие от методик расчета дифференциальной защиты с реле РНТ-560 и ДЗТ-11 расчет защиты с реле ДЗТ-20 дополнительно учитывает наличие выравнивающих автотрансформаторов тока, возможность изменения параметров срабатывания реле и специфику выполнения тормозной характеристики. Эти особенности выполнения

защиты позволяют сразу (а не подбором вариантов) выбирать ответвления автотрансформаторов тока и элементов реле ДЗТ-20 из условия баланса намагничивающих сил плеч защиты по номинальным параметрам, а затем однозначно определять уставки срабатывания защиты и реле.

Ток срабатывания защиты с реле ДЗТ-20 выбирается аналогично защите с реле РНТ-560 и ДЗТ-11 по большему из значений, полученных по (1.1) и (1.2). При этом в (1.1) коэффициент отстройки от режимов броска намагничивающего тока и переходных токов небаланса при внешних КЗ для реле ДЗТ-21 принимается $k_{отс} = 0,3$, а для автотрансформаторов номинальный ток определяется по проходной мощности. В (1.2) коэффициент запаса по избирательности принимается равным $k_{з} = 1,5$.

При расчете защиты учитывается, что тормозная характеристика реле имеет два участка, и отстройка от переходных и установившихся режимов внешних КЗ должна производиться как для режима без торможения, по которому определяются $I_{с.р.мин}$, $I_{торм.нач.в}$, так и для режима с торможением, по которому определяется коэффициент торможения.

Рекомендуется [3] следующая методика расчета.

1. Определяются по (1.9) расчетные первичные токи и находятся по (1.10) вторичные номинальные токи в плечах защиты для всех сторон защищаемого объекта.

2. Выбираются ответвления автотрансформатора тока ТЛ для основной стороны (например, сторона основного питания) по таблице 1.1 или 1.2 по условию

$$I_{отв.ном.осн.ТЛ} \leq I_{в.ном.осн}, \quad (1.23)$$

где $I_{отв.ном.осн.ТЛ}$ - значение тока автотрансформатора тока для основных ТТ защиты; для выбранного тока в таблице 1.1 или 1.2 дается значение ответвления автотрансформатора тока и трансреактора. При отсутствии выравнивающих автотрансформаторов тока на основной стороне

$$I_{отв.ном.осн.ТАВ} \leq I_{в.ном.осн} \quad (1.24)$$

3. Определяются расчетные значения токов ответвлений автотрансформаторов (при их отсутствии трансреактора реле ТАВ) для неосновных n сторон защиты

$$I_{\text{отв.расч.н}} = I_{\text{в.ном.н}} \left(\frac{I_{\text{отв.ном.осн}}}{I_{\text{в.ном.осн}}} \right). \quad (1.25)$$

4. Выбираются ответвления автотрансформатора тока ТЛ для неосновных n сторон по таблице 1.1. или 1.2

$$I_{\text{отв.ном.н}} \leq I_{\text{отв.расч.н}}; \quad (1.26)$$

для выбранного тока в таблице 1.1 и 1.2 дается значение тока трансреактора реле $I_{\text{отв.ном.н.ТАВ}}$ и указываются соответствующие ответвления автотрансформатора тока и трансреактора.

5. Определяются типы автотрансформаторов тока (АТ-31, АТ-32) и их коэффициенты трансформации по данным таблиц 1.1 и 1.2

$$K_{\text{ТЛ.н}} = \frac{I_{\text{отв.ном.ТТ.н}}}{I_{\text{отв.ном.ТАВ.н}}}. \quad (1.27)$$

6. Находятся расчетные токи ответвлений трансформаторов тока

$$I_{\text{отв.торм.расч.н}} = \frac{I_{\text{в.ном.н}}}{K_{\text{ТЛ.н}}}. \quad (1.28)$$

7. Выбираются номера ответвлений и соответствующие номинальные токи трансформаторов тока ТА реле (и приставки ПТ - 1)

$$I_{\text{отв.торм.ном.н}} \leq I_{\text{отв.торм.расч.н}}. \quad (1.29)$$

8. По схеме включения тормозных обмоток в плечах защиты выбирается относительный ток начала торможения:

торможение осуществляется от всех плеч защиты $I_{*\text{нач.торм}} = 1$;

торможение осуществляется не от всех плеч защиты $I_{*\text{нач.торм}} = 0,6$.

9. Определяется первичный тормозной ток, соответствующий началу торможения

$$I_{\text{торм.нач.н}} = 0,5 I_{\text{ном}} \sum_I^n k_{\text{ток.н}} \left(\frac{I_{\text{отв.торм.ном.н}}}{I_{\text{отв.торм.расч.н}}} \right), \quad (1.30)$$

где $k_{\text{ток.н}} = \frac{I_{\text{k.н}}}{I_{\text{k}\Sigma}}$ - коэффициент распределения тока внешнего КЗ по сторонам n объекта (в долях от полного тока сквозного КЗ в расчетной точке).

10. Находится первичный ток небаланса в режиме, соответствующему началу торможения

$$I_{\text{нб.торм.нач}} = I_{*\text{нб}\Sigma} I_{\text{торм.нач.н}}, \quad (1.31)$$

где

$$I_{*\text{нб}\Sigma} = \left(k_{\text{пер}} k_{\text{одн}} \varepsilon + \sum_I^n \Delta U_n k_{\text{ток.н}} + \sum_I^{n-1} \Delta I_n k_{\text{ток.н}} \right) \quad (1.32)$$

$I_{*\text{нб}\Sigma}$ - относительный суммарный ток небаланса; $k_{\text{пер}} = 1,0$ - коэффициент учитывающий переходный режим; $k_{\text{одн}} = 1,0$ - коэффициент однотипности ТТ; $\varepsilon = 0,05$ - относительная полная погрешность ТТ; ΔU_n - относительная погрешность, обусловленная регулированием напряжения на стороне n , принимается равной половине диапазона регулирования;

$$\Delta I_n = \frac{(I_{\text{отв.расч.н}} - I_{\text{отв.ном.н}})}{I_{\text{отв.расч.н}}} \quad (1.33)$$

ΔI_n - погрешность выравнивания на неосновной стороне (n-1) объекта.

11. Определяется начальный первичный ток срабатывания чувствительности органа защиты по большему из двух условий:

а) отстройка от первичного тока небаланса в режиме торможения

$$I_{\text{с.з.мин}} \geq k_{\text{з}} I_{\text{нб.торм.нач}}; \quad (1.34)$$

б) отстройка от броска тока намагничивания и переходных токов внешних КЗ

$$I_{\text{с.з.мин}} = 0,3 I_{\text{ном}}. \quad (1.35)$$

12. Определяется относительный начальный ток срабатывания чувствительного органа при отсутствии торможения на расчетной стороне объекта

$$I_{*\text{с.з.мин}} = \frac{I_{\text{с.з.мин}} \left(\frac{U_{\text{ср.ном}}}{U_{\text{ном.н}}} \right) k_{\text{сх}}}{K_{\text{I.н}} K_{\text{ТЛ.н}} I_{\text{отв.ном.н}}} \quad (1.36)$$

13. Определяется максимальный расчетный ток небаланса при внешнем трехфазном КЗ на стороне, обеспечивающей наибольший ток небаланса,

$$I_{\text{нб.расч}} = I_{*\text{нб}\Sigma} I_{\text{к.макс}}^{(3)}, \quad (1.37)$$

где $I_{*нб\Sigma}$ определяется по (1.32) при $k_{пер} = 2$; $\varepsilon = 0,1$;

14. Находится коэффициент торможения защиты

$$k_{торм} = \frac{k_{\Sigma} I_{*нб.расч} \left(\frac{I_{в.ном.осн}}{I_{отв.ном.осн}} \right) - I_{*с.р.мин}}{0,5 \sum I_{*торм.расч.п} \left(\frac{I_{отв.торм.расч.п}}{I_{отв.торм.ном.п}} \right) - I_{*торм.нач}}, \quad (1.38)$$

где $I_{*нб.расч} = \frac{I_{нб.расч}}{I_{ном}}$; $I_{*торм.расч.п} = \frac{I_{к.макс}^{(3)} k_{ток.п}}{I_{ном}}$ - относительный расчетный тормозной ток стороны п; $k_{\Sigma} = 1,5$ - коэффициент запаса по избирательности.

15. Определяется первичный ток срабатывания отсечки по условию отстройки от максимального первичного тока небаланса при расчетном внешнем трехфазном КЗ

$$I_{с.отс.расч} = k_{\Sigma} I_{*нб\Sigma} I_{к.макс}^{(3)}, \quad (1.39)$$

где $k_{\Sigma} = 1,5$ - коэффициент запаса по избирательности; $I_{*нб\Sigma}$ - относительный суммарный ток небаланса определяется по (1.32) при $k_{пер} = 3$; $\varepsilon = 0,1$.

16. Находится относительное расчетное значение тока срабатывания отсечки

$$I_{*отс.расч} = \frac{I_{с.отс.расч} k_{сх}}{I_{отв.ном.осн} K_I K_{ТЛ}} \quad (1.40)$$

Принимается к установке ближайшее большее значение уставки (6 или 9).

17. Определяется коэффициент чувствительности защиты (ее чувствительного органа) [3]

$$k_{\check{ч}}^{(m)} = \frac{I_{к.мин}^{(m)}}{I_{с.з}} \frac{k_{сх.п}^{(m)}}{k_{сх.п}^{(3)}} \quad (1.41)$$

где $I_{к.мин}^{(m)}$ - минимальный ток КЗ на стороне п объекта при расчетном (m) виде повреждения в зоне защиты.

Отношение $\frac{k_{сх.п}^{(m)}}{k_{сх.п}^{(3)}}$ составляют:

при трехфазных КЗ – 1;

при двухфазных КЗ на стороне звезды - $\frac{2}{\sqrt{3}}$, на стороне треугольника – 1;

при однофазном КЗ - $\frac{1}{\sqrt{3}}$ [3].

1.2.3 Методика расчета защиты с балансировкой намагничивающих сил плеч на трансреакторе реле.

Выравнивающие автотрансформаторы тока позволяют изменять коэффициент трансформации токов в плечах защиты, а реализация дифференциального принципа защиты осуществляется в трансреакторе реле (аналогично реле РНТ-560 и ДЗТ-11) путем взаимной компенсации (балансировки) МДС плеч защиты при внешних КЗ. Поскольку промежуточные автотрансформаторы тока обеспечивают более 100 комбинаций отводов и коэффициентов трансформации, то с их помощью можно получить соответствие приведенных к реле вторичных токов номинальным токам ответвлений трансреактора реле с погрешностью 2-3%. Это обеспечивает практическую сбалансированность плеч защиты, что упрощает расчет уставок.

Кроме того, поскольку все параметры реле даны для вторичных токов, то расчет уставок срабатывания защиты и реле целесообразно вести по токам, приведенным ко вторичной стороне защиты. При этом используются следующие расчетные выражения.

1. Отстройка от броска намагничивающего тока, возникающего при включении трансформатора или автотрансформатора на холостой ход или при восстановлении напряжения после отключения КЗ, а также от переходных токов небаланса при внешних КЗ

$$I_{с.р} \geq k_{отс} I_{в.ном.осн} \quad (1.42)$$

где $k_{отс} = 0,3$ - коэффициент отстройки от режимов подп. 1 для реле ДЗТ-21; $I_{в.ном.осн}$ - вторичный ток стороны защиты, принятой в качестве основной, определяется по (1.10).

При выборе основной стороны для уменьшения погрешности рекомендуется принимать сторону с наибольшим вторичным током. При наличии выравнивающих автотрансформаторов тока ТЛ выбор

основной стороны должен производиться по приведенным к реле вторичным номинальным токам

$$I'_{\text{В.НОМ.П}} = \frac{I_{\text{В.НОМ.П}}}{K_{\text{ТЛ.п}}} \quad (1.43)$$

где $K_{\text{ТЛ.п}}$ - коэффициент трансформации выравнивающего автотрансформатора тока ТЛ определяется по данным таблицы 1.1 и 1.2 по формуле (1.27).

На стороне, где выравнивающие автотрансформаторы тока не устанавливаются, $I'_{\text{В.НОМ.П}} = I_{\text{В.НОМ.П}}$ и ответвления на трансреакторе ТАВ выбираются по формуле

$$I_{\text{ОТВ.НОМ.ТАВ}} \leq I_{\text{В.НОМ.}} \quad (1.44)$$

Условие (1.44) позволяет выполнить на реле минимальную уставку $I_{* \text{с.п}} = 0,3$, (а не несколько большее значение), но при этом может возрасти погрешность выравнивания на неосновной стороне. Поэтому, если значения токов в (1.44) отличаются менее чем на 5%, то выбирается ближайшее $I_{\text{ОТВ.НОМ.ТАВ}}$. Если же значения токов различаются на 0,5 А и более, то для снижения погрешности выравнивания и на этой стороне целесообразно установить выравнивающие автотрансформаторы тока.

Поскольку наличие выравнивающих автотрансформаторов тока позволяет сбалансировать намагничивающие силы на трансреакторе ТАВ достаточно хорошо, то выбор основной стороны не сказывается существенно на погрешности выравнивания. Поэтому в качестве основной стороны удобно принять сторону питания, что упрощает расчет чувствительности защиты. При наличии на стороне питания выравнивающих автотрансформаторов тока подбор ближайших ответвлений (см таблицу 1.1 и 1.2) следует производить для значений $K_{\text{ТЛ}}$, обеспечивающих больший приведенный вторичный ток.

2. Отстройка от расчетного периодического тока небаланса внешнего КЗ

$$I_{\text{с.п}} = k_{\text{з}} I_{\text{нб.расч.в}} \quad (1.45)$$

где $k_{\text{з}} = 1,5$ - коэффициент запаса по избирательности для реле ДЗТ-21; $I_{\text{нб.расч.в}}$ - ток небаланса дифференциальной защиты в расчетном режиме, приведенный к реле для основной стороны.

Расчетный ток небаланса определяется как сумма трех составляющих, пропорциональных периодической составляющей тока КЗ

$$I_{\text{нб.расч.в}} = I'_{\text{нб.расч.в}} + I''_{\text{нб.расч.в}} + I'''_{\text{нб.расч.в}} \quad (1.46)$$

Составляющая $I'_{\text{нб.расч.в}}$ обусловлена погрешностью трансформаторов тока

$$I'_{\text{нб.расч.в}} = k_{\text{пер}} k_{\text{одн}} \xi I_{\text{к.расч.в}} \quad (1.47)$$

где $k_{\text{пер}} = (1 - 3)$ - коэффициент, учитывающий переходной режим; $k_{\text{одн}} = 1,0$ - коэффициент однотипности трансформаторов тока; ξ - относительная полная погрешность трансформаторов тока;

$$I_{\text{к.расч.в}} = \frac{I_{\text{к.расч}} k_{\text{сх.осн}}}{K_{\text{I.осн}} K_{\text{ТЛ.осн}}} \quad (1.48)$$

- полный ток внешнего КЗ в расчетном режиме, приведенный к реле для основной стороны.

Составляющая $I''_{\text{нб.расч.в}}$ обусловлена регулировкой коэффициента трансформации силового трансформатора (автотрансформатора) после того, как защита была сбалансирована на средних отпайках. Эта составляющая определяется как сумма токов небаланса на сторонах, где имеется регулирование

$$I''_{\text{нб.расч.в}} = \sum_I^n \Delta U_n I_{\text{к.расч.в.n}} \quad (1.49)$$

где ΔU_n - относительная погрешность регулирования напряжения, принимаемая равной половине диапазона регулирования на стороне n трансформатора; $I_{\text{к.расч.в.n}}$ - ток внешнего КЗ, протекающий по стороне n трансформатора в расчетном режиме и приведенный к реле для основной стороны.

Составляющая $I'''_{\text{нб.расч.в}}$ обусловлена неточным соответствием расчетных вторичных токов неосновных сторон защиты, принятым ответвлениям трансреактора для этих сторон. Эта составляющая определяется как алгебраическая сумма погрешностей выравнивания неосновных сторон

$$I'''_{\text{нб.расч.в}} = \sum_I^{n-1} \Delta I_n I_{\text{к.расч.в.n}} \quad (1.50)$$

$$\Delta I_n = \frac{I_{\text{отв.расч.н}} - I_{\text{отв.ном.н}}}{I_{\text{отв.расч.н}}} \quad (1.51)$$

- погрешность выравнивания стороны n трансформатора;

$$I_{\text{отв.расч.н}} = I_{\text{отв.ном.осн}} \frac{I'_{\text{в.ном.н}}}{I'_{\text{в.ном.осн}}} \quad (1.52)$$

- расчетное значение тока ответвления на стороне n трансформатора ТАУ; $I_{\text{отв.ном.н}}$ - принятые ответвления трансформатора ТАУ на неосновных (n) сторонах; $I_{\text{к.расч.в.н}}$ - ток внешнего КЗ, протекающий по стороне n трансформатора в расчетном режиме и приведенный к реле для основной стороны.

3. Выбор минимального тока срабатывания производится по большему из условий (1.42) и (1.45). при этом периодический ток небаланса определяется для режима отсутствия торможения, когда ток внешнего КЗ [см. (1.48)] принимается равным току начала торможения ($I_{\text{к.расч}} = I_{\text{торм.нач}}$), а относительная полная погрешность тока не превышает 0,05. При определении составляющих тока небаланса $I''_{\text{нб.расч.в}}$ по (1.49) и $I'''_{\text{нб.расч.в}}$ по (1.50) распределение полного тока внешнего КЗ по сторонам трансформатора ($I_{\text{к.расч.н}}$) принимается для расчетного случая, обеспечивающего наибольший суммарный ток небаланса.

4. Выбор относительного тока начала торможения определяется схемой включения тормозных обмоток в плечах защиты:

торможение осуществляется от всех плеч защиты $I_{*\text{нач.торм}} = 1$

торможение осуществляется не от всех плеч защиты $I_{*\text{нач.торм}} = 0,6$

Подбор ответвлений трансформатора тока ТА реле ДЗТ-20 производится по приведенному вторичному току

$$I_{\text{отв.торм.н}} = I'_{\text{в.ном.н}} \quad (1.53)$$

На трансформаторах тока ТА принимаются ближайšie к $I'_{\text{в.ном.н}}$ ответвления $I_{\text{отв.торм.н}}$. Для этого случая рекомендуется принимать

для $I_{*\text{нач.торм}} = 1$ $I_{\text{торм.нач}} = I_{\text{ном.осн}}$;

для $I_{*\text{нач.торм}} = 0,6$ $I_{\text{торм.нач}} = 1,2I_{\text{ном.осн}}$

5. Коэффициент торможения реле ДЗТ-20 определяется по (1.22) в расчетном режиме внешнего КЗ, при котором $K_{\text{торм}}$ получается максимальным. Из (1.22) следует, что расчетный режим должен соответствовать максимальному току небаланса по (1.46), (1.45) и минимальному суммарному току торможения по (1.21) в режиме сквозного КЗ, когда

$$I_{\text{к.расч.в.п}} = I_{\text{торм.в.п}}$$

6. Ток срабатывания отсечки определяется по большему из токов, найденных по (1.42) и (1.45). При этом в (1.42) принимается $k_{\text{отс}} = 6$, если приведенные вторичные токи примерно соответствуют ответвлениям рабочей цепи трансреактора ТАВ ($I_{\text{отв.ном.п}} = I'_{\text{в.ном.п}}$), и $k_{\text{отс}} = 9$, если выбранные ответвления существенно меньше приведенного вторичного номинального тока. При отстройке от периодических токов небаланса в (1.45) принимается $k_{\text{з}} = 1,5$ и вводится множитель $k_{\text{пер}}$, учитывающий переходный процесс. Поскольку отсечка реагирует на среднее значение напряжения трансреактора ТАВ. Значения $k_{\text{пер}}$ зависят от группы соединения и типа высоковольтных трансформаторов тока. При наиболее характерном соединении трансформаторов тока по сторонам защиты в звезду и треугольник и однотипных трансформаторах тока (только встроенных или только выносных) $k_{\text{пер}} = 2,5$, при разнотипных трансформаторах тока $k_{\text{пер}} = 3,0$.

7. Коэффициент чувствительности защиты (чувствительного органа) определяется при внутренних металлических КЗ при отсутствии и наличии торможения в расчетных режимах, соответствующих минимальным значениям $k_{\text{ч}}$. Выбор расчетных режимов производится так же, как и для защит с реле РНТ-560 и ДЗТ-11.

При внутренних КЗ без торможения коэффициент чувствительности определяется как

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{* \text{раб}}}{I_{* \text{с.р.мин}}} \geq 2,0 \quad (1.54)$$

где $I_{*раб} = \sum_I^n \frac{I_{к.МИН.В.п}}{I_{ОТВ.НОМ.ОСН}}$ - приведенный рабочий

(дифференциальный) ток реле; $I_{к.МИН.В.п}$ - ток внутреннего КЗ в минимальном режиме, протекающий по – стороне n трансформатора и приведенный к реле для основной стороны.

Необходимо отметить, что использование выравнивающих трансформаторов тока ТЛ позволяет сбалансировать вторичные токи защит достаточно точно. Это приводит к тому, что относительные токи срабатывания реле для различных сторон

$$I_{*с.р.МИН} = \frac{I_{с.р.n}}{I_{ОТВ.НОМ.n}}$$

будут практически одинаковы и их отдельное вычисление не требуется. Кроме того, при сбалансированности плеч защиты суммарный рабочий ток реле с погрешностью менее 5% равен приведенному вторичному току полного тока внутреннего КЗ, поэтому оценку чувствительности защиты при отсутствии торможения можно производить по первичным токам –с учетом схемы соединения ТТ на сторонах защиты [3].

$$k_{ч} = \frac{2I_{к.МИН}^{(2)}}{\sqrt{3}I_{с.з}} \geq 2,0; k_{ч} = \frac{I_{к.МИН}^{(1)}}{\sqrt{3}I_{с.з}} \geq 2,0 \quad (1.55)$$

где $I_{с.з} = \frac{I_{с.р} K_{I.ОСН} K_{ТЛ.ОСН}}{k_{сх.ОСН}}$ - ток срабатывания защиты.

При наличии торможения коэффициент чувствительности определяется по графику тормозной характеристики, для чего на рисунке 1.5 наносится точка А с координатами ($I_{*раб}; I_{*торм}$), которая соединяется с началом координат. Прямая А0 является геометрическим местом точек, соответствующим изменяющемуся переходному сопротивлению в месте КЗ (от 0 до ∞). Поскольку эта прямая во всех случаях пересекает горизонтальный участок тормозной характеристики (что соответствует срабатыванию защиты на пределе чувствительности), то коэффициент чувствительности определяется по (1.36), но требования к нему в соответствии с ПУЭ [4] снижены до 1,8.

Отметим, что реле ДЗТ-20 при выборе $I_{с.з} = 0,3I_{НОМ}$ чувствительность защиты обеспечивается с большим запасом, и

контрольную проверку чувствительности следует производить в минимальном режиме, при КЗ за наибольшим сопротивлением трансформатора или автотрансформатора и неблагоприятном коэффициенте трансформации.

Чувствительность дифференциальной токовой отсечки не определяется, так как она является вспомогательным элементом, предназначенным дублировать чувствительный орган защиты при больших кратностях тока КЗ, когда последний может работать с недопустимым замедлением.

Рекомендуется следующий порядок расчета.

1. Определяются первичные номинальные токи для всех n сторон защищаемого оборудования по (1.9)

2. Определяются вторичные номинальные токи плеч защиты по (1.10).

3. Выбираются ответвления промежуточных автотрансформаторов тока T_L , ближайшие к значениям вторичных номинальных токов сторон защиты по таблице 1.1 и 1.2, при которых рекомендуется ответвления на T_{AV} будут больше.

4. Выбираются ответвления на трансформаторе T_{AV} на сторонах, где отсутствуют промежуточные автотрансформаторы тока по (1.44).

5. Определяется коэффициент трансформации автотрансформаторов тока $K_{T_{L,n}}$ по (1.27).

6. Находятся вторичные номинальные токи, приведенные к реле $I'_{в.ном,n}$ с учетом замечаний по (1.43).

7. Выбирается основная сторона защиты по большему из токов $I'_{в.ном,n}$ с учетом замечаний п.1.2.3 (подп. 1).

8. Находятся расчетные значения ответвлений трансреактора T_{AV} для неосновных сторон защиты по (1.52).

9. Выбираются ответвления трансреактора T_{AV} для неосновных сторон и определяются по (1.51) ΔI_n - относительные погрешности выравнивания для этих сторон.

10. Определяются стороны, на которых используется торможение, находятся по (1.53) номинальные ответвления трансформаторов тока T_A и принимаются токи начала торможения в соответствии с п.1.2.3. (подп. 4).

11. Находится минимальный ток срабатывания реле по большому из значений, полученных по (1.42) и (1.45). При определении составляющих токов небаланса по (1.49) и (1.50) значение $I_{к,расч.в}$ находится по (1.48) при $I_{к,расч} = I_{нач.торм}$ и токораспределению внешнего КЗ по сторонам защиты в режиме, обеспечивающем наибольший суммарный ток небаланса.

12. Определяется по (1.18) относительный минимальный ток срабатывания $I_{*с.р.мин}$ для выполнения уставки на реле.

13. Находится коэффициент торможения защиты по (1.22). входящие в (1.22) значения $I_{*с.р}$ и $I_{*торм}$ определяются по (1.20), (1.45) и (1.21) в режиме сквозного КЗ при токораспределении по сторонам объекта, обеспечивающим наибольший ток небаланса при минимальном торможении.

14. Определяется ток срабатывания отсечки по большому значению из (1.42) и (1.45) в расчетных режимах с учетом замечаний п.1.2.3 (подп. 6). Находится по (1.17) относительный ток срабатывания и принимается к установке ближайшее большее значение.

15. Вычисляются по (1.54), (1.55) значения коэффициентов чувствительности при внутренних КЗ в расчетных точках с минимальными токами.

1.3 Максимальная токовая защита от междуфазных повреждений.

1.3.1 Особенности выполнения защиты.

Выбор схем выполнения защиты [2] производится в зависимости от типа защищаемого оборудования (трансформатор или автотрансформатор), числа обмоток и схемы питания (одностороннее или двухстороннее).

1. Для двухобмоточных трансформаторов защита устанавливается на стороне питания (ВН) и выполняется в двухрелейном исполнении с соединением ТТ в треугольник для повышения чувствительности. Первоначально рассчитывается МТЗ без пуска по напряжению, а если чувствительность недостаточна, то применяют пуск по напряжению с помощью двух блокирующих реле напряжения, включенных соответственно на междуфазное

напряжения и напряжения обратной последовательности. Если на стороне низшего напряжения (НН) имеется сдвоенный реактор или обмотка НН расщеплена (и имеет токоограничивающие реакторы), то в цепи каждого ответвления устанавливается отдельная МТЗ, как правило, с пуском по напряжению. Защита действует с двумя выдержками времени: с первой выдержкой отключается выключатель ответвления НН, со второй – все выключатели объекта.

2. Для трехобмоточных трансформаторов с односторонним питанием МТЗ с комбинированным пуском по напряжению устанавливается на стороне питания (ВН) и выполняется в трехфазном трехрелейном исполнении. Для повышения чувствительности комбинированный пуск по напряжению осуществляется со стороны среднего (СН) и низшего (НН) напряжения. Кроме того, для резервирования присоединений СН и НН на этих сторонах также устанавливаются МТЗ (как правило, с пуском по напряжению). Защита на стороне НН действует с двумя выдержками времени: с первой выдержкой времени отключается выключатель на стороне НН присоединения трансформатора, со второй выдержкой времени отключаются все выключатели трансформатора. Защита на стороне СН действует с тремя выдержками времени: с первой – отключается секционный выключатель стороны СН, со второй выдержкой времени отключается выключатель стороны СН, с третьей – все выключатели трансформатора. Защита на стороне ВН согласуется по времени с защитами сторон НН и СН и имеет наибольшую выдержку времени.

3. Для трехобмоточных трансформаторов с двусторонним питанием МТЗ с комбинированным пуском по напряжению устанавливается на каждой стороне трансформатора (при наличии на стороне НН сдвоенного реактора на каждом ответвлении реактора). Блокировка по напряжению осуществляется со стороны НН и СН. Защиты на сторонах ВН и СН резервируют как основные защиты трансформатора, так и отходящие присоединения своей стороны. Выдержки времени защит осуществляются аналогично защитами трехобмоточных трансформаторов с односторонним питанием.

4. Для автотрансформаторов понижающих подстанций в качестве резервной защиты от междупазных повреждений применяют максимальную токовую защиту обратной последовательности с приставкой для действия при симметричных

КЗ. Поскольку автотрансформаторы имеют, как правило, двухстороннее питание, эта защита чувствительна к несимметричным повреждениям в прилегающих сетях ВН и СН. Поэтому наряду с резервированием междуфазных повреждений в автотрансформаторе защита резервирует дифференциальные защиты ошинок и несимметричные КЗ на примыкающих линиях сетей ВН и СН. МТЗ обратной последовательности с приставкой для действия при симметричных КЗ выполнена одноступенчатой с подключением токовых цепей к ТТ, встроенным на стороне ВН автотрансформатора. Цепи напряжения подключаются к трансформаторам напряжения стороны ВН. Защита выполняется направленной в сторону сети ВН, имеющей меньшие выдержки времени резервных защит по сравнению с выдержками времени резервных защит сети СН. В сторону сети СН защита действует как ненаправленная, но с большими выдержками времени. На каждой стороне автотрансформатора ВН и СН защита действует с тремя выдержками времени: с первой выдержкой времени, большей выдержек времени резервных защит примыкающей сети, отключается шиносоединительный или секционный выключатель, со второй – выключатель автотрансформатора соответствующей стороны, с третьей – все выключатели автотрансформатора.

Максимальная токовая защита с комбинированным пуском по напряжению дополнительно устанавливается на стороне НН автотрансформатора, так как МТЗ обратной последовательности имеет недостаточную чувствительность к КЗ на стороне НН. Для увеличения зоны действия защиты токовые реле подключают к встроенным ТТ на стороне НН автотрансформатора, блокировка по напряжению осуществляется со стороны НН. При наличии на стороне НН регулировочных устройств и сдвоенного реактора на каждом ответвлении реактора к секциям НН дополнительно устанавливается отдельная МТЗ с комбинированным пуском по напряжению, выполняемая так же, как и для стороны НН трансформаторов.

1.3.2 Расчет уставок срабатывания максимальной токовой защиты.

1. Ток срабатывания МТЗ без пуска по напряжению отстраивается от максимального тока нагрузки с учетом самозапуска двигательной нагрузки

$$I_{c.з} = \frac{k_з k_c I_{нагр.макс}}{k_в} \quad (1.56)$$

где $k_з = 1,2$ - коэффициент запаса по избирательности; $k_в = 0,8$ - коэффициент возврата реле РТ-40; k_c - коэффициент самозапуска, учитывающий увеличение тока заторможенной двигательной нагрузки после восстановления напряжения (определяется расчетом); при выполнении курсового проекта можно принять $k_c = (1,5 \div 2,5)$; $I_{нагр.макс}$ - максимальный ток нагрузки обычно принимается равным номинальному току трансформатора.

2. Коэффициент чувствительности защиты определяется при двухфазном металлическом КЗ в минимальном режиме

$$k_{ч} = \frac{I_{к.мин}^{(2)}}{I_{c.з}} \quad (1.57)$$

При выполнении МТЗ функции основной защиты шин - $k_{ч} \geq 1,5$; при выполнении защиты функции резервирования смежных элементов - $k_{ч} = 1,2$ при КЗ в конце зоны резервирования.

3. Выдержка времени защиты выбирается по условиям согласования с временем действия $t_{c.з.см}$ чувствительных защит резервируемых элементов

$$t_{c.з} = t_{c.з.мин} + \Delta t \quad (1.58)$$

4. Ток срабатывания МТЗ с пуском по напряжению отстраивается от номинального тока трансформатора или автотрансформатора $I_{ном}$ на стороне, где установлена защита

$$I_{c.з} = \frac{k_з}{k_в} I_{ном} \quad (1.59)$$

Значения коэффициентов $k_з$ и $k_в$ такие же, как и в подп. 1.

5. Напряжение срабатывания пускового органа минимального напряжения, выполненного в виде реле, включенного на междуфазное напряжение, определяется по условиям возврата реле после отключения внешнего КЗ

$$U_{c.з} < \frac{U_{мин}}{k_з k_в} \quad (1.60)$$

а также по условиям отстройки от токов самозапуска двигательной нагрузки при восстановлении напряжения

$$U_{c.з} < \frac{U_{c.мин}}{k_{в}} \quad (1.61)$$

где $k_{в} = 1,2$ - коэффициент возврата для реле минимального напряжения; $U_{мин}$ - минимальное междуфазное напряжение после отключения внешнего КЗ; $U_{c.мин}$ - минимальное междуфазное напряжение в условиях самозапуска при восстановлении напряжения (при выполнении курсового проекта можно принять $U_{мин} = 0,9U_{ном}$, $U_{c.мин} = 0,7U_{ном}$)

6. Напряжение срабатывания пускового органа по обратной последовательности комбинированного пуска по напряжению принимается равным минимальной уставке фильтр-реле

$$U_{2c.з} = 0,06U_{ном} \quad (1.62)$$

7. Чувствительность защиты проверяется при двухфазном КЗ в конце резервирования (при выполнении курсового проекта – на шинах НН объекта):

для токового органа

$$k_{ч.И} = \frac{I_{к.мин}^{(2)}}{I_{c.з}} \quad (1.63)$$

для минимального реле напряжения

$$k_{ч.У} = \frac{U_{c.з}}{U_{з.макс}} \quad (1.64)$$

для фильтр-реле напряжения обратной последовательности

$$k_{ч.У2} = \frac{U_{2з.мин}}{U_{2c.з}} \quad (1.65)$$

где $U_{з.макс}$ и $U_{2з.мин}$ - расчетные значения напряжения в месте установки защиты при КЗ в конце зоны резервирования (при выполнении курсового проекта $U_{з.макс}$ и $U_{2з.мин}$ определяются на шинах в месте установки защиты).

Значения нормируемых коэффициентов чувствительности для (1.64) и (1.65) такие же, как и для токового органа (см. подп. 2).

1.3.3 Расчет уставок срабатывания максимальной токовой защиты обратной последовательности.

1. Первичный ток срабатывания защиты отстраивается от тока на выходе фильтра обратной последовательности при максимально возможной нагрузке автотрансформатора

$$I_{2c.з} = \frac{k_з}{k_б} (k_{нб} I_{нагр.макс} + I_{2нec}) \quad (1.66)$$

где $k_з = 1,2$ - коэффициент запаса избирательности; $k_б = 0,8$ - коэффициент возврата исполнительного органа фильтр-реле обратной последовательности; $k_{нб} = 0,03$ - максимальный коэффициент небаланса фильтр-реле обратной последовательности; $I_{нагр.макс}$ - максимально возможный ток нагрузки автотрансформатора; $I_{2нec}$ - ток обратной последовательности, обусловленный спецификой работы электроприемников рассматриваемой сети.

2. Согласование с защитами линий по току обратной последовательности, эквивалентному уставкам срабатывания защит линий,

$$I_{2c.з} = k_з I_{2расч} \quad (1.67)$$

где $k_з = 1,1$ - коэффициент запаса по избирательности; $I_{2расч}$ - ток обратной последовательности в месте установки защиты в условиях, когда защита, с которой производится согласование, находится на грани срабатывания; рассматриваются режимы, при которых обеспечивается наибольший ток срабатывания $I_{2расч}$.

Согласование с защитами смежных линий рекомендуется производить для сетей с эффективно заземленной нейтралью с чувствительными ступенями земляных защит, а для сетей с изолированной нейтралью – с чувствительными ступенями дистанционных или максимальных токовых защит.

При согласовании с земляными защитами смежных линий ($I_{0c.з.см}$) рассматриваются режимы однофазного КЗ, двухфазного КЗ на землю и длительный неполнофазный режим смежной линии [3].

При однофазном КЗ

$$I_{2\text{расч}}^{(I)} = \frac{n_{2л}}{n_{0л.см}} \frac{I_{0с.з.см}}{3} \quad (1.68)$$

При двухфазном КЗ на землю

$$I_{2\text{расч}}^{(1,1)} = k_{\pi} \frac{n_{2л}}{n_{0л.см}} \frac{I_{0с.з.см}}{3} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma}} \quad (1.69)$$

При неполнофазном режиме работы

$$I_{2\text{расч}}^{(\text{неп})} = k_{2\text{ток}} \frac{I_{0с.з.см}}{3} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma}} \quad (1.70)$$

где $n_{2л} = n_{1л}$ - доля тока, протекающая через выбираемую защиту в расчетном режиме, определяется по схеме замещения прямой последовательности; $n_{0л.см}$ - доля тока, протекающая через смежную защиту в расчетном режиме, определяется по схеме замещения нулевой последовательности; $k_{\pi} = 1,2$ - коэффициент, учитывающий влияние переходных сопротивлений в месте КЗ; $x_{2\Sigma}$ ($x_{1\Sigma}$) и $x_{0\Sigma}$ - результирующие сопротивления обратной (прямой) и нулевой последовательностей при металлическом КЗ в конце смежной линии; $k_{2\text{ток}}$ - максимальный коэффициент токораспределения, равный отношению токов, протекающих через выбираемую защиту, к току смежной защиты в режиме каскадного отключения.

Из приведенных условий (1.68) – (1.70) расчетным обычно является (1.69). При выполнении курсового проекта с запасом в сторону избирательности можно принять

$$I_{2с.з} = (1,5 - 2,0) I_{0с.з.см} \quad (1.71)$$

Если при выполнении курсового проекта уставки земляных защит смежных линий не выбирались, то значение $I_{2\text{расч}}$ в (1.47) находится как ток обратной последовательности, протекающий через выбираемую защиту при несимметричном КЗ в конце смежной линии.

Отстройка от неполнофазного режима на смежной линии обеспечивается с запасом при $I_{2с.з} \geq 0,75 I_{\text{нагр. макс. см}}$.

Согласование с дистанционными защитами смежных линий сети НН рассмотрено в [3]. При выполнении курсового проекта согласование производится с МТЗ смежных линий сети НН, значение

$I_{2расч}$ определяется через ток срабатывания $I_{с.з.см}$ МТЗ отходящих линий

$$I_{2расч} = k_{2ток} \frac{I_{с.з.см}}{\sqrt{3}} \quad (1.72)$$

где $k_{2ток}$ - то же, что и в (1.70)

3. Чувствительность выбираемой защиты проверяется при металлическом междуфазном КЗ в конце смежной линии

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2выб}^{(2)}}{I_{2с.з}} \geq 1,2 \quad (1.73)$$

При выполнении курсового проекта оценку чувствительности допустимо произвести при двухфазном КЗ на шинах СН и ВН.

Приведенные условия выбора уставок защит обратной последовательности автотрансформатора являются расчетными для смежной сети СН. При согласовании с защитами сети ВН расчетные значения уставок получаются существенно меньше из-за малых значений $k_{2ток}$, $n_{2л}$, и при выполнении курсового проекта согласование со смежными защитами сети ВН не производится.

1.4 Дистанционные защиты автотрансформаторов.

1.4.1 Особенности выполнения защит.

1. Выбор схем выполнения защиты зависит от уровня напряжения, схемы и длин линий смежных сетей ВН и СН с учетом необходимости решения следующих задач:

а) согласования смежных защит линий высшего или среднего напряжения с защитами автотрансформаторами;

б) обеспечения дальнего резервирования в сетях ВН и СН;

в) частичного резервирования основных защит автотрансформатора.

2. Для автотрансформаторов с высшим напряжением 220 кВ обычно используется одна панель дистанционной защиты типа ПЭ 2105 в составе первой ступени (реле КРС-2) и второй ступени (КРС-3). В зависимости от необходимого объема решаемых задач применяют два варианта включения панели ПЭ 2105.

Первый вариант предусматривает установку панели ПЭ 2105 только на одной стороне автотрансформатора (обычно СН) для

решения всех задач подп.1, поскольку для стороны ВН условия подп.1 не являются расчетными. Защита подключается к трансформаторам тока и напряжения на стороне СН и действует на отключение последовательно с тремя выдержками времени: с первой выдержкой времени отключается шиносоединительный или секционный выключатель стороны СН, со второй – выключатель автотрансформатора стороны СН, с третьей - все выключатели автотрансформатора.

Второй вариант предусматривает подключение первой ступени защиты к трансформаторам тока стороны СН, второй ступени – к трансформаторам тока стороны ВН, а общие цепи напряжения защиты подключаются к трансформаторам напряжения стороны НН. Такое подключение обеспечивает решение задач подп.1, б, в для защит сторон СН и ВН при условии, что решение по подп.1, а не является расчетным. Каждый комплект реле действует на отключение последовательно с тремя выдержками на сторонах СН и ВН аналогично первому варианту выполнения защиты.

3. Для автотрансформаторов с высшим напряжением 330 кВ применяются две панели дистанционной защиты ПЭ 2105, подключаемые к трансформаторам тока и напряжения сторон СН и ВН аналогично первому варианту включения защиты для автотрансформаторов с ВН 220 кВ. Такое подключение защиты обеспечивает решение всех задач подп.1 как на стороне СН, так и на стороне ВН. Защита действует на отключение последовательно с тремя выдержками времени на сторонах СН и ВН автотрансформатора: с первой выдержкой времени отключается секционный или шиносоединительный выключатель соответствующей стороны, со второй – выключатель автотрансформатора этой стороны, с третьей – все выключатели автотрансформатора.

1.4.2 Расчет уставок срабатывания.

1. Проверяется обеспечение чувствительности смежных защит линий высшего и среднего напряжений в условиях отстройки этих защит от КЗ за автотрансформатором по (1.74) – условию отстройки от КЗ за трансформатором приемной подстанции.

$$z_{c.з}^{II} = k_з \left[z_{т} + j \frac{(1 - \Delta U)^2}{k_{ток}} x_{т} \right] \quad (1.74)$$

где ΔU - наибольший относительный предел регулировки напряжения силового трансформатора [4], например, $\Delta U = 0,12$ при регулировке $\pm 12\%$; $k_{ток} = \frac{I_{з.выб}}{I_{т}}$ - коэффициент токораспределения при КЗ за трансформатором.

Из полученных значений сопротивлений срабатывания в качестве расчетного выбирается наименьшее.

Для линий ВН – это защиты 1, 2 (рисунок 1.6, а) при отстройке от КЗ в точке К2, для линий СН – это защита 3, 4 при отстройке от КЗ в точке К1. Если чувствительность не обеспечивается, то на

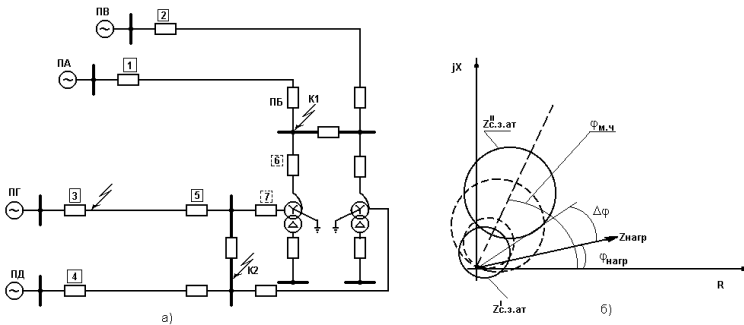


Рисунок 1.6. Расчетные условия для выбора уставок дистанционных защит автотрансформатора (а) и характеристики срабатывания (б) реле без смещения (пунктирные линии) и со смещением (сплошные линии) относительно начала координат.

автотрансформаторах устанавливаются дистанционные защиты 7 и 6 (рисунок 1.6, а) для согласования с защитами 1, 2 и 3, 4 соответственно.

Необходимость установки дистанционных защит автотрансформаторов обусловлена тем, что при непосредственном согласовании защит 1, 2 с защитой 5 (рисунок 1.6, а) возможно неселективное действие защит сети ВН и КЗ в сети СН (точка К3) и отказе выключателя или защиты 5.

Из (1.74) при $k_{\Sigma} = 0,87$ и $k_{\text{ч}} = \frac{Z_{\text{с.с}}^{\text{II}}}{Z_{\text{Л}}} > 1,25$ можно определить

длины линий смежных сетей ВН и СН, при которых требуется установка дистанционных защит автотрансформаторов

$$Z_{\text{Л}} > 2,3 \frac{Z_{\text{атВС}}}{k_{\text{ТОК}}} \quad (1.75)$$

Необходимо отметить, что значение $k_{\text{ТОК}}$ для линий сети СН, как правило, намного меньше значений $k_{\text{ТОК}}$, чем для линий сети ВН, и условие (1.75) для линий сети СН не выполняется. Поэтому направленная дистанционная защита автотрансформатора устанавливается только на стороне СН. Последнее соответствует первому варианту включения защиты (см. п.1.4.1).

2. Уставка срабатывания первой ступени дистанционной защиты автотрансформатора согласуется с уставками первых ступеней защит отходящих линий стороны, на которой устанавливается защита

$$Z_{\text{с.с.ат}}^{\text{I}} \leq \frac{k_{\Sigma} Z_{\text{с.с.см}}^{\text{I}}}{k_{\text{ТОК.ат}}} \quad (1.76)$$

где $k_{\Sigma} = 0,87$ - коэффициент запаса по избирательности; $Z_{\text{с.с.см}}^{\text{I}}$ - уставка срабатывания первой ступени защиты, с которой производится согласование; $k_{\text{ТОК}} = \frac{I_{\Sigma.ат}}{I_{\Sigma.см}}$ - коэффициент

токораспределения равный отношению тока, протекающего через автотрансформатор, к току, протекающему через защиту, с которой производится согласование при КЗ в конце зоны действия согласуемой защиты.

При сильно разветвленных сетях 220 кВ и 110 кВ значение $k_{\text{ТОК}}$ малы и условие (1.75) не является расчетным как для сети ВН, так и для сети СН, но дистанционная защита автотрансформатора все же устанавливается для обеспечения дальнего резервирования отходящих линий. При этом используется второй вариант включения защиты (см. п. 1.4.1), для которого уставка срабатывания первой ступени [3] для стороны СН и ВН автотрансформатора выбирается как

$$z_{\text{с.з.ат.СН}}^I = k_{\text{з}} z_{\text{ат.С}} + \frac{k'_{\text{з}} z_{\text{с.з.см.СН}}^I}{k_{\text{ток.ат.СН}}} \quad (1.77)$$

$$z_{\text{с.з.ат.ВН}}^I = k_{\text{з}} z_{\text{ат.В}} + \frac{k'_{\text{з}} z_{\text{с.з.см.ВН}}^I}{k_{\text{ток.ат.ВН}}} \quad (1/78)$$

где $k_{\text{з}} = 0,78$, $k'_{\text{з}} = 0,78$; $z_{\text{ат.С}}$ и $z_{\text{ат.В}}$ - сопротивления обмоток средней и высшей сторон трансформатора; $z_{\text{с.з.см.СН}}^I$ и $z_{\text{с.з.см.ВН}}^I$ - уставки срабатывания первых ступеней линий СН и ВН; $k_{\text{ток.ат.СН}}$ и $k_{\text{ток.ат.ВН}}$ - коэффициенты токораспределения, равные отношению токов через соответствующие стороны автотрансформатора к токам, протекающим через согласуемые защиты при КЗ в конце зоны действия первой ступени.

3. Уставка срабатывания второй ступени дистанционной защиты автотрансформатора отстраивается от максимального тока нагрузки автотрансформатора по (1.79) или по углу $\Delta\varphi$ (рисунок 1.6, б) при смещении характеристики [3].

$$z_{\text{с.з}}^{II} = \frac{U_{\text{мин.экспл}}}{\sqrt{3} k_{\text{н}} k_{\text{в}} I_{\text{нагр}} \cos(\varphi_{\text{м.ч}} - \varphi_{\text{нагр}})} \quad (1.79)$$

где $U_{\text{мин.экспл}}$ - минимальное эксплуатационное напряжение, предварительно может быть принято равным $0,9U_{\text{ном}}$; $k_{\text{н}} = 1,2$ - коэффициент надежности; $k_{\text{в}} = 1,1$ - коэффициент возврата (для реле сопротивления); $\varphi_{\text{м.ч}} = 65 \div 80^\circ$ - угол максимальной чувствительности реле сопротивления; $\varphi_{\text{нагр}}$ - угол сопротивления, обусловленного нагрузкой.

Первоначально $z_{\text{с.з}}$ определяется при $\cos(\varphi_{\text{м.ч}} - \varphi_{\text{нагр}}) = 1$, но если чувствительность защиты получается недостаточной, то учитывают характер нагрузки и $\varphi_{\text{м.ч}}$. Обычно $\varphi_{\text{нагр}} \leq 30 \div 40^\circ$.

4. Чувствительность второй ступени дистанционной защиты автотрансформатора определяется по (1.80) при КЗ в конце зоны дальнего резервирования (каскадное отключение КЗ на смежной с отходящей от автотрансформатора линией).

$$k_{\text{ч}}^{\text{II}} = \frac{Z_{\text{с.з}}^{\text{II}}}{Z_{\text{л}} + \frac{Z_{\text{л.см}}}{k_{\text{ток}}}} \geq 1,2 \quad (1.80)$$

где $k_{\text{ток}} = \frac{I_{\text{з.выб}}}{I_{\text{т}}}$ - коэффициент токораспределения при КЗ за трансформатором, $I_{\text{з.выб}}$ - ток, протекающий через ТТ защиты, для которой выбирается уставка.

Для частичного резервирования основных защит трансформатора и увеличения зоны дальнего резервирования рекомендуется [3] частичное смещение характеристик первой ступени в третий квадрант, а характеристик второй ступени – в первый квадрант (рисунок 1.6, б).

1.5 Максимальная токовая защита от замыканий на землю.

1.5.1 Особенности выполнения защит.

1. Выбор схем максимальной токовой защиты нулевой последовательности на сторонах с эффективно заземленной нейтралью зависит от типа защищаемого оборудования (трансформатор или автотрансформатор) и схемы подключения объекта на стороне высшего напряжения (сборные шины, четырехугольник, мостик).

2. Для трансформаторов МТЗ от замыканий на землю устанавливается на стороне ВН только при наличии двухстороннего питания и выполняется одноступенчатой. Защита подключается к трансформатору тока, установленному в нейтрали трансформатора, и действует на отключение с двумя выдержками времени: с первой отключается выключатель стороны ВН, со второй – все выключатели трансформатора.

3. Для автотрансформаторов МТЗ от замыканий на землю устанавливается на сторонах ВН и СН и подключается, как правило, к трансформаторам тока, встроенным во втулки на сторонах ВН и СН автотрансформаторов. На стороне СН защита выполнена трехступенчатой и направленной в сторону отходящих линий сети СН. Каждая ступень действует на отключение с двумя выдержками времени: с первой отключается выключатель стороны СН, со второй

– все выключатели автотрансформатора. На стороне ВН при наличии сборных шин или многоугольника защита также выполняется трехступенчатой и направленной в сторону отходящих линий сети ВН, т.е. аналогично защите стороны СН. При наличии на стороне ВН схемы мостика МТЗ от замыканий на землю на стороне ВН выполняется одноступенчатой и ненаправленной.

Токовые органы третьих ступеней земляных защит совместно с реле контроля непереключения фаз образует защиту от неполнофазного режима автотрансформатора.

При выводе из работы защит шин СН и ВН вводится оперативное ускорение по времени первой (или второй) ступеней защит от замыканий на землю. Защита действует последовательно на разделение –систем (секций) шин, отключение выключателя на стороне установки защиты и отключение всех выключателей автотрансформатора.

1.5.2 Расчет уставок срабатывания.

При расчете уставок максимальных токовых защит от замыканий на землю используются те же подходы, что и при выборе уставок вторых и третьих ступеней земляных защит линии с эффективно заземленной нейтралью. Обязательное заземление нейтралей автотрансформаторов ухудшает связь по нулевой последовательности между сетями СН и ВН, что позволяет выполнить земляные защиты селективными по отношению к сетям смежных напряжений СН и ВН.

1. Ток срабатывания первой ступени защиты выбирается по большему из двух условий:

а) согласование с уставками первых (вторых) ступеней защит от замыканий на землю отходящих линий данной стороны автотрансформатора (защиты 1, 2 с защитами 5, 6; защиты 3, 4 с защитами 7, 8, рисунок 1.7);

б) отстройка от тока $3I_0$ неполнофазного режима сети.

Согласование с защитами смежных линий производится как:

$$I_{0с.з.ат}^I = k_з k_{ток.ат} I_{0с.з.см}^{I(II)} \quad (1.81)$$

где $k_з = 1,1$ - коэффициент запаса по избирательности; $I_{0с.з.см}^{I(II)}$ - уставки срабатывания первых (вторых) ступеней земляных защит

отходящих линий; $k_{\text{ток.ат}} = \frac{3I_{0\text{ат}}}{3I_{0\text{з.см}}}$ - коэффициент

токораспределения, равный отношению тока нулевой последовательности, протекающего по стороне автотрансформатора, для которой выбирается уставка, к току нулевой последовательности защиты, с которой производится согласование, при КЗ в конце зоны действия этой ступени.

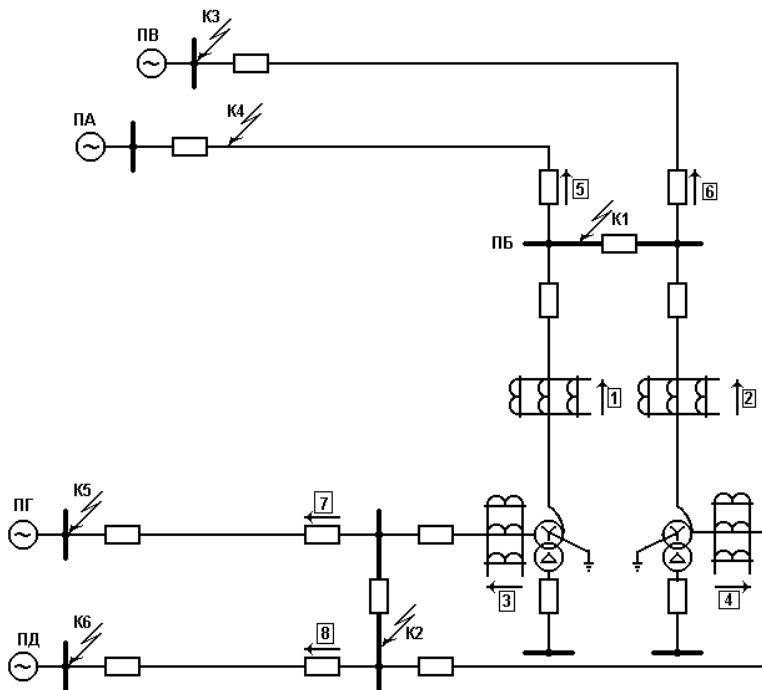


Рисунок 1.7. Расчетные условия для выбора уставок МТЗ от замыканий на землю для автотрансформаторов.

При нескольких отходящих линиях от шин данной стороны автотрансформатора согласование производится с защитой каждой линии в режимах, когда $k_{\text{ток.ат}}$ имеет наибольшее значение. Из всех полученных по (1.81) значений тока срабатывания защиты в качестве расчетного принимается наибольшее.

Отстройка от тока неполнофазного режима линий или из-за цикла ОАПВ на смежных линиях производится как

$$I_{0c.з.ат}^I = k_з 3I_{0неп} \quad (1.82)$$

где $k_з$ - коэффициент запаса по избирательности, принимается равным 1,3 при напряжении сети 110 – 220 кВ и 1,4-1,5 при напряжении 330 – 500 кВ; $3I_{0неп}$ - определяется расчетом по схемам замещения в соответствующем режиме.

При выполнении курсового проекта можно принять, что отстройка от цикла ОАПВ обеспечивается по времени срабатывания защиты, а ток неполнофазного режима принять приближенно равным $0,75I_{нагр}$ линии, работающей в неполнофазном режиме.

2. Ток срабатывания второй ступени защиты определяется аналогично (1.81) со вторыми (третьими) ступенями земляных защит смежных линий, проверяется по условию (1.82) и должен быть отстроен от тока небаланса на выходе фильтра токов нулевой последовательности при трехфазном КЗ на стороне НН автотрансформатора с учетом нагрузочного режима

$$I_{0c.з.ат}^{II(III)} = \frac{k_з}{k_в} (k_{нб} I_{к.расч} + 3I_{0неп}) \quad (1.83)$$

где $k_з = 1,25$ - коэффициент запаса по избирательности; $k_в$ - коэффициент возврата реле (РТ-40 – 0,84 РНТ-560 – 0,6); $k_{нб}$ - коэффициент небаланса фильтра, принимается равным 0,05 при кратности тока КЗ равной 3, и 0,1 – при больших кратностях; $I_{к.расч}$ - ток в месте установки защиты при трехфазном КЗ (асинхронном ходе, качаниях) в расчетном режиме; $3I_{0неп}$ - ток нулевой последовательности, обусловленный возможной работой линий в неполнофазном режиме.

При выполнении учебного проекта можно принять, что отстройка от качаний, асинхронного хода и неполнофазного режима в цикле ОАПВ выполнена по времени ($t_{c.з.ат}^{II} \geq 1,5c$).

3. Ток срабатывания третьей ступени защиты определяется аналогично (1.81) с третьими (четвертыми) ступенями земляных защит смежных линий и отстраивается по (1.83) от тока небаланса на выходе фильтра при трехфазном КЗ на стороне НН автотрансформатора.

4. Ток срабатывания ускоряемой ступени земляной защиты должен быть отстроен от броска намагничивающего тока

автотрансформатора в режиме разновременного включения фаз выключателя.

5. Выдержка времени первой, второй и третьей ступеней защиты принимается на ступень селективности $\Delta t = 0,5$ с больше выдержек времени тех защит, с которыми производится согласование.

6. Чувствительность защиты проверяется в минимальном режиме при однофазном металлическом КЗ

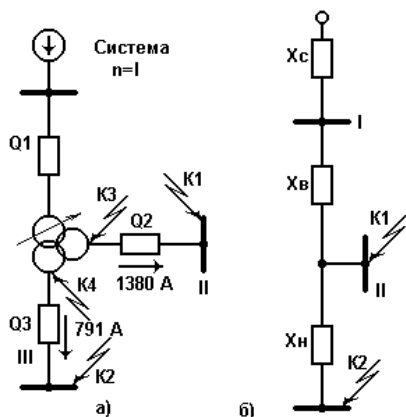
$$k_{\text{ч}} = 3 \frac{I_{0\text{з},\text{МИН}}^{(1)}}{I_{0\text{с},\text{З}}} \quad (1.84)$$

Для первой и второй ступеней защит чувствительность ($k_{\text{ч}} \geq 1,3 \div 1,5$) проверяется при КЗ на шинах в месте установки защиты (для защит 1, 2 – точка К1; для защит 3, 4 – точка К2, рисунок 1.7) при условии, что выбранные уставки срабатывания обеспечивают чувствительность земляных защит в сети смежного напряжения.

Для третьей ступени защиты чувствительность ($k_{\text{ч}} \geq 1,2$) проверяется при однофазных замыканиях на землю в конце смежных линий (для защит 1, 2 – точки К3, К4; для защит 3, 4 – точки К5, К6, рисунок 1.7).

2. Пример расчета защит понижающего трансформатора.

2.1 Исходные данные к расчету защит.



Требуется рассчитать защиту трехобмоточного трансформатора ТДЦТН-63000/220 ($230 \pm 12\%/38, 5 \pm 5\%/11$ кВ), Y/Y/ Δ -11, $U_{кВС} = 12,5\%$, $U_{кВН} = 24\%$, $U_{кСН} = 10,5\%$, питающего от энергосистемы с параметрами $x_{с.макс} = 120\text{М}$, $x_{с.мин} = 180\text{М}$ (сопротивления приведены к $U_{ср.ном} = 230\text{кВ}$).

Для составления схемы замещения (рисунок 2.1) вычисляются сопротивления трансформатора:

Рисунок 2.1. Поясняющая схема (а) и схема замещения (б) к примеру расчета защиты понижающего трансформатора

$$x_B = \frac{U_{кВ}}{100} \frac{U_{ср.ном}^2}{S_T} = \frac{13}{100} \frac{230^2}{63} = 1090\text{М}$$

$$x_c \approx 0; x_H = \frac{U_{кН}}{100} \frac{U_{ср.ном}^2}{S_m} = \frac{11}{100} \frac{230^2}{63} = 92,40\text{М}$$

$$U_{кВ} = 0,5(U_{кВС} + U_{кВН} - U_{кСН}) = 0,5(12,5 + 24 - 10,5) = 13\%$$

$$U_{кС} = 0,5(12,5 + 10,5 - 24) = 0\%$$

$$U_{кН} = 0,5(10,5 + 24 - 12,5) = 11\%$$

При расчетах токов КЗ для защит трансформаторов с РПН следует учесть изменение сопротивления за счет регулирования

напряжения. Для трансформаторов 220 кВ приближенно можно принять:

$$x_{Т.МИН} = x_{Т.НОМ} (1 - \Delta U)^2; x_{Т.МАКС} = x_{Т.НОМ} (1 + \Delta U)^2$$

отсюда $x_{В.МИН} = 109(1 - 0,12)^2 = 84,4 \text{ Ом};$

$$x_{В.МАКС} = 137 \text{ Ом}; x_{Н.МИН} = 71,6 \text{ Ом}; x_{Н.МАКС} = 116 \text{ Ом}$$

Ток КЗ на шинах среднего напряжения (точка К1, рисунок 2.1)

$$I_{К.МАКС}^{(3)} = \frac{U_{ср.НОМ}}{\sqrt{3}(x_{С.МАКС} + x_{В.МИН})} =$$

$$= \frac{230}{\sqrt{3}(12 + 84,4)} = 1,38 \text{ кА}$$

$$I_{К.МИН}^{(2)} = \frac{U_{ср.НОМ}}{2(x_{С.МИН} + x_{В.МАКС})} =$$

$$= \frac{230}{2(18 + 137)} = 0,742 \text{ кА}$$

Ток КЗ на шинах НН (точка К2, рисунок 2.1)

$$I_{К.МАКС}^{(3)} = \frac{U_{ср.НОМ}}{\sqrt{3}(x_{С.МАКС} + x_{В.МИН} + x_{Н.МИН})} =$$

$$= \frac{230}{\sqrt{3}(12 + 84,4 + 71,6)} = 0,791 \text{ кА}$$

$$I_{К.МИН}^{(2)} = \frac{U_{ср.НОМ}}{2(x_{С.МИН} + x_{В.МАКС} + x_{Н.МАКС})} =$$

$$= \frac{230}{2(18 + 137 + 116)} = 0,424 \text{ кА}$$

2.2 Расчет продольной дифференциальной токовой защиты.

Предварительный расчет дифференциальной защиты и выбор типа реле.

1. Ток срабатывания защиты определяется по большему из двух расчетных условий (1.1) и (1.2):

а) отстройка от броска тока намагничивания

$$I_{c.з} = k_{отс} I_{ном} = 1,3 \cdot 158 = 205A$$

где $I_{ном} = \frac{S_T}{\sqrt{3}U_{ср.ном}} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,158кA$

б) отстройка от тока небаланса, выполняется с учетом выражений (1.2) - (1.6):

$$I_{c.з} = k_{з} (k_{одн} \varepsilon + \Delta U_I + \Delta U_{II}) I_{к.макс(K1)}^{(3)} = \\ = 1,3(1,0 \cdot 0,1 + 0,12 + 0,05)1380 = 484A$$

Принимается $I_{c.з} = 484A$

2. Предварительная проверка чувствительности производится по первичным токам при двухфазном КЗ на стороне НН (точка К4, рисунок 2.1):

$$k_{ч} = \frac{I_{к.мин(K4)}^{(2)}}{I_{c.з}} = \frac{424}{484} = 0,875 < 2$$

3. Поскольку защита с реле типа РНТ не обеспечивает чувствительности, а расчетной является отстройка от тока небаланса, то следует применить реле типа ДЗТ-11, для которого ток срабатывания защиты выбирается по условиям:

а) отстройка по (1.1) от броска намагничивающего тока

$$I_{c.з} = k_{отс} I_{ном} = 1,5 \cdot 158 = 237A$$

б) отстройка по (1.2) от тока небаланса при КЗ на СН

$$I_{c.з} = k_{з} (k_{одн} \varepsilon + \Delta U_I + \Delta U_{II}) I_{к.макс(K1)}^{(3)} = \\ = 1,5(1,0 \cdot 0,1 + 0,12 + 0,05)1380 = 560A$$

в) отстройка по (1.2) от тока небаланса при КЗ на НН

$$I_{c.з} = k_{з} (k_{одн} \varepsilon + \Delta U_I) I_{к.макс(K2)} = \\ = 1,5(1,0 \cdot 0,1 + 0,12)791 = 261A$$

Принимаем реле ДЗТ-11 с уставкой тормозной обмотки со стороны СН. Тогда отстройка по подп.3 б) будет обеспечена за счет торможения, а ток срабатывания защиты принимается по большему из условий 3 а) и 3 в): $I_{c.з} = 261A$.

4. Определяется чувствительность защиты при КЗ на стороне НН при минимальном регулировании:

$$k_{\text{ц}} = \frac{I_{\text{к.мин}}^{(2)}(K4)}{I_{\text{с.з}}} = \frac{424}{261} = 1,63$$

Это значение $k_{\text{ц}}$ несколько меньше нормируемого, однако, уже при номинальном коэффициенте трансформации трансформатора ток КЗ составит:

$$I_{\text{к.мин}}^{(2)} = \frac{230}{2(18 + 109 + 92,4)} = 524\text{А}$$

и требуемый коэффициент чувствительности обеспечивается

$$k_{\text{ц}} = \frac{524}{261} = 2,01$$

Поэтому защита с реле ДЗТ-11 может быть применена.

Выбор уставок реле ДЗТ.

1. Первичный и вторичный токи сторон трансформатора определяются по выражениям (1.9) и (1.10). Данные расчета приведены в таблице 1.1.

Из таблицы 1.1 следует, что в качестве основной следует взять сторону НН (11 кВ), имеющую больший вторичный номинальный ток.

2. Ток срабатывания реле для основной стороны определяется по выражению (1.11)

$$I_{\text{ср.осн}} = \frac{I_{\text{с.з}} k_{\text{сх}} \frac{U_{\text{ср.ном}}}{U_{\text{номп}}}}{K_{\text{In}}} = \frac{261 \cdot 1 \cdot \frac{230}{11}}{\frac{4000}{5}} = 6,82\text{А}$$

3. Расчетное число витков рабочей обмотки для основной стороны определяется по (1.12)

$$W_{\text{осн.расч}} = \frac{F_{\text{ср}}}{I_{\text{с.р.осн}}} = \frac{100}{6,82} = 14,65 \text{ витков}$$

Принимается $W_{\text{раб.осн}} = 14$ витков, что соответствует

фактическому току срабатывания реле $I_{\text{с.р.осн}} = \frac{100}{14} = 7,14\text{А}$.

4. Расчетные числа витков для других сторон трансформатора определяются по (1.13)

для стороны 220 кВ $w_{расчI} = 14 \frac{4,13}{3,42} = 16,9$. Принимается

$$w_I = 17;$$

для стороны 35 кВ $w_{расчII} = 14 \frac{4,13}{4,09} = 14,1$. Принимается

$$w_{II} = 14.$$

5. Уточненный ток срабатывания защиты с учетом погрешности выравнивания находится по выражениям (1.2) – (1.6):

$$\begin{aligned} I_{с.з} &= k_3 (k_{одн} \varepsilon + \Delta U_I + \Delta w_I) I_{к.макс}(K2) = \\ &= 1,5(1,0 \cdot 0,1 + 0,12 + 0,006) 791 = 268 A' \end{aligned}$$

$$\text{где } \Delta w_I = \frac{w_{Ирасч} - w_I}{w_{Ирасч}} = \frac{16,9 - 17}{16,9} = 0,006.$$

Таблица 2.1. Расчет первичных и вторичных токов сторон трансформатора.

Обозначение параметров	I-ВН-230 кВ	II-СН-38,5 кВ	III-НН-11 кВ
$I_{номп}, A$	$\frac{63000}{(\sqrt{3} \cdot 230)} = 158$	$\frac{63000}{(\sqrt{3} \cdot 38,5)} = 945$	$\frac{63000}{(\sqrt{3} \cdot 11)} = 3310$
K_{In}	400/5	2000/5	4000/5
Схема соединения ТТ	треугольник	треугольник	Звезда
$I_{в.номп}, A$	$\frac{158 \cdot \sqrt{3}}{400/5} = 3,42$	$\frac{945 \cdot \sqrt{3}}{2000/5} = 4,09$	$\frac{3310}{4000/5} = 4,13$

6. Уточненный расчетный ток срабатывания реле определяется по (1.11)

$$I_{ср.осн} = \frac{I_{с.з} k_{сх} \left(\frac{U_{ср.ном}}{U_{номIII}} \right)}{k_{I(III)}} = \frac{268 \cdot 1 \cdot \left(\frac{230}{11} \right)}{\frac{4000}{5}} = 7 < 7,14A$$

Поскольку уточненный расчетный ток срабатывания реле (7А) меньше фактического (7,14А), то выбор рабочих витков закончен.

7. Расчетный ток небаланса защиты при КЗ на стороне СН, где предусмотрено торможение, с учетом погрешности выравнивания находится по выражениям (1.3) – (1.6)

$$I_{нб.расч} = k_з \left(k_{пер} \varepsilon + \Delta U_I + \Delta U_{II} + \Delta w_{II} \right) I_{к.макс(K1)} = \\ = 1,5(1,0 \cdot 0,1 + 0,129 + 0,05 + 0,007)1380 = 382A$$

$$\text{где } \Delta w_{II} = \frac{14,1 - 14}{14,1} = 0,007$$

8. Число витков тормозной обмотки находится по выражению (1.15)

$$w_{торм} = \frac{k_з I_{нб.расч} w_{рабн}}{I_{к.макс(K1)} \operatorname{tg} \alpha} = \frac{1,5 \cdot 382 \cdot 14}{1380 \cdot 0,75} = 7,75$$

Таким образом, к установке на реле принимаются следующие витки:

$$w_I = 17, w_{II} = 14, w_{III} = 14 \text{ и } w_{торм} = 8.$$

9. Чувствительность защиты определяется приблизительно по первичным токам при расчетном КЗ на стороне НН для случаев минимального и нормального регулирования трансформатора

$$k_{\psi} = \frac{424}{273} = 1,56 \text{ и } k_{\psi} = \frac{524}{273} = 1,92$$

где $I_{с.з} = 273A$ – фактический ток срабатывания защиты, определяется из выражения (1.11) по $I_{с.р} = 7,14A$.

Поскольку коэффициент чувствительности защиты при нормальном регулировании напряжения практически соответствует нормируемому, а при минимальном регулировании достаточно высок, то защита с реле ДЗТ-11 рекомендуется к установке. Заметим, что включение тормозной обмотки на сумму вторичных токов сторон СН и

НН позволяет выбрать ток срабатывания по условию 3 а) и обеспечить $k_{\text{ч}} \geq 2$ во всех режимах. Уточнение числа витков реле предлагается произвести самостоятельно.

2.3 Расчет максимальной токовой защиты с комбинированным пуском по напряжению.

В соответствии с п.1.3.1 подп.1 для трехобмоточных трансформаторов с односторонним питанием в качестве резервной защиты рекомендуется установка на стороне питания МТЗ с пуском или без пуска по напряжению.

1. Первоначально определяется ток срабатывания МТЗ без пуска по напряжению в соответствии с выражением (1.56)

$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_{\text{з}}}{k_{\text{б}}} k_{\text{с}} I_{\text{нагр.макс}} = \frac{1,2}{0,8} 2,5 \cdot 158 = 592 \text{ A}$$

2. Чувствительность защиты проверим по (1.57) при КЗ на шинах СН и НН в минимальных расчетных режимах (см. п.2.1)

$$k_{\text{ч}} = \frac{742}{592} = 1,25 \text{ и } k_{\text{ч}} = \frac{424}{592} < 1$$

Поскольку чувствительность МТЗ без пуска по напряжению оказывается недостаточной, применим блокировку по напряжению со сторон СН и НН трансформатора. В этом случае ток срабатывания защиты, определенный по уравнению (1.59), равен

$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_{\text{з}}}{k_{\text{б}}} I_{\text{НОМ}} = \frac{1,2}{0,8} 1,0 \cdot 158 = 237 \text{ A}$$

а чувствительность защиты в тех же расчетных точках составит:

$$k_{\text{ч}} = \frac{742}{237} = 3,13 \text{ и } k_{\text{ч}} = \frac{424}{237} = 1,8$$

3. Напряжение срабатывания органа блокировки при симметричных КЗ определим приближенно по выражению (1.61)

$$U_{\text{с.з}} \leq \frac{U_{\text{с.Мин}}}{k_{\text{б}}} = \frac{0,7 \cdot 220}{1,2} = 128 \text{ кВ}$$

4. Напряжение срабатывания органа блокировки при несимметричных КЗ определяется по (1.62)

$$U_{2\text{с.з}} = 0,06 U_{\text{НОМ}} = 0,06 \cdot 230 = 13,8 \text{ кВ}$$

5. Чувствительность блокирующих органов проверяется при КЗ на приемных сторонах трансформатора, куда и подключены блокирующие реле, т.е. $U_{к.заш}^{(3)} = 0$, а

$$U_{2к.заш} = \frac{U_{\phi}}{2} = \frac{230}{2 \cdot \sqrt{3}} = 66,5 \text{ кВ}$$

Тогда

$$k_{чU} = \frac{U_{с.з}}{U_{к.макс}} = \frac{119}{0} > 1,5$$

$$k_{чU} = \frac{U_{2к.заш}}{U_{2с.з}} = \frac{66,5}{13,8} = 4,82 > 1,5$$

Поскольку при КЗ на приемных сторонах трансформатора $k_{ч} > 1,5$, то дифференциальные защиты шин на этих сторонах можно не устанавливать.

6. Ток срабатывания защиты от симметричного перегруза, действующей на сигнал, определяется по условию отстройки от номинального тока трансформатора на стороне, где установлена защита, по выражению

$$I_{с.з} = \frac{k_s}{k_b} I_{т.ном} = \frac{1,05}{0,8} 158 = 207,4 \text{ А}$$

7. Выдержки времени МТЗ согласуются с выдержками времени защит линий на сторонах СН и НН.

3. Задание на расчетно-графическую работу

Выполнить расчет продольной дифференциальной токовой защиты от всех видов замыканий на выводах и в обмотках сторон с заземленной нейтралью, а также от многофазных замыканий на выводах и в обмотках сторон с изолированной нейтралью. Студенты дневного отделения выполняют расчет защиты с помощью реле ДЗТ-21 или любого микропроцессорного комплекта защиты. Студенты заочного отделения выполняют расчет защиты с помощью реле ДЗТ-11. Сопротивление системы $x_{c.макс} = 12(Ом)$, $x_{c.мин} = 18(Ом)$.

Таблица 3.1

Номер варианта	Тип трансформатора
1	ТМТН-6300/110
2	ТДТН-10000/110
3	ТДТН-16000/110
4	ТДТН-25000/110
5	ТДТН-40000/110
6	ТДТН-63000/110
7	ТДТН-80000/110
8	ТДЦТН-80000/110
9	ТДТН-25000/220
10	ТДТН-40000/220
11	ТДТН-25000/220
12	АТДЦТН-63000/220/110
13	АТДЦТН- 125000/220/110
14	АТ ДЦТН-200000/220/110
15	АТДЦТН-250000/220/110
16	ТРДНС-40000/330
17	ТРДЦН-63000/330
18	АТДЦТН-125000/330/110
19	АТДЦТН-200000/330/110
20	АТДЦТН-240000/330/220
21	ТРДЦН- 100000/220
22	ТРД-125000/220
23	ТРДН-25000/110
24	ТРДЦН-160000/220
25	ТРДНС-40000/220

Номер варианта	Тип трансформатора
26	ТРДН-63000/220
27	ТРДЦН-63000/220
28	ТРДЦН-100000/220
29	ТДЦ-12500/110
30	ТДЦ-200000/110

Список литературы.

1. Жуков С.Ф. Расчет защит трансформаторов и автотрансформаторов. Учебное пособие. – Мариуполь: 2001.
2. Дьяков А.Ф, Платонов В.В. Основы проектирования релейной защиты электроэнергетических систем. Учебное пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2000.
3. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13А. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110 – 500 кВ. Схемы М.: Энергоиздат, 1985.
4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13В. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ. Расчеты. М.6 Энергоиздат, 1985.
5. Правила устройства электроустановок. М.: Энергоиздат, 1986.