ISSN 0132-5280

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

Релейная защита понижающих трансформаторов и авто-трансформаторов 110-500 кВ

Расчеты

13Б

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

gost.e-ecolog.ru

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ
ПС РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

Выпуск 13 Б

Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ

Расчеты

Составлено ордена Октябрьской революции
Всесоюзным Государственным проектно-
изыскательским и научно-
исследовательским институтом
энергетических систем
и электрических сетей «Энергосетьпроект»
Министерства энергетики
и электрификации СССР

МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1985

ББК 31.27-05
Р 85
УДК 621.316.925.001.24:621.314.223

Составитель Т. Н. Дороднова

Руководящие указания по релейной защите.
Р 85 Вып. 13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110—500 кВ: Расчеты. — М.: Энергоатомиздат, 1985,—96 с., ил.
70 к. 19 000 экз.

Рассмотрены принципы и методика расчета параметров срабатывания релейной защиты на постоянном оперативном токе двух- и трехобмоточных трансформаторов мощностью 10 МВ·А и более с высшим напряжением 220—500 кВ понижающих подстанций, внедряемые в практику проектирования и эксплуатации Энергосетьпроектом.

Для инженерно-технических работников, занятых в области проектирования и эксплуатации релейной защиты, а также аспирантов и студентов электроэнергетических специальностей.

Р $\frac{2302040000\text{-}269}{051(01)\text{-}85}$ 112-85

ББК 31.27-05
6П2.1.081

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ. Вып. 13Б.
РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ПОНИЖАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ 110—500 кВ.
Расчеты

Редактор Б. Г. Файзулова
Редактор издательства Л. Л. Жданова
Технический редактор Н. П. Собакина
Художественный редактор В. А. Гозак-Хозак
Корректор Н. А. Смирнова
ИБ № 1354

Сдано в набор 16.01.85 Подписано в печать 27.05.85 Т-13015
Формат 84×108 1/16 Бумага типографская № 3 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 10,08 Усл. кр.-отт. 10,5 Уч.-изд. л. 14,38
Тираж 19 000 экз. Заказ 245 Цена 70 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054, Москва, М-54, Валовая, 28.

© Энергоатомиздат, 1985

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий выпуск «Руководящих указаний по релейной защите» утвержден заместителем министра энергетики и электрификации СССР Ф. В. Сапожниковым (протокол № 7 от 4.02.80). Выпуск предназначен для использования совместно с выпуском 13А взамен «Руководящих указаний по релейной защите. Выпуск 4. Защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов» (М.: Госэнергоиздат, 1962).

В выпуске даны новые методы расчетов дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов с реле, содержащими насыщающиеся трансформаторы тока (типов РНТ-565 и ДЗТ-11), дифференциальной защиты трансформаторов с зонами разной чувствительности, дифференциальной защиты трансформаторов и автотрансформаторов с реле типа ДЗТ-21, дифференциальной защиты ошиновок высшего и низшего напряжений автотрансформаторов, дистанционной защиты автотрансформаторов, защит синхронного компенсатора, работающего в блоке с автотрансформатором и т. д.

Настоящие Руководящие указания соответствуют гл. 3.2 «Релейная защита» ПУЭ и директивным материалам. Однако не исключена возможность временных расхождений между Руководящими указаниями и документами, которые будут изданы в дальнейшем. В таких случаях обязательными являются ПУЭ и директивные материалы.

Руководящие указания являются рекомендуемым материалом, которому должны следовать как проектные, так и эксплуатационные организации с целью максимального применения типовых решений, удешевления и ускорения строительства электроустановок, внедрения в эксплуатацию наиболее совершенных и проверенных опытом решений. Отступления от соответствующих решений, приведенных в Руководящих указаниях, допускаются в случаях, когда это обосновано конкретными местными условиями, а также для ранее запроектированных, монтируемых или действующих устройств, если эти отступления не ведут к серьезным недостаткам и не противоречат принципиальному направлению Руководящих указаний.

В выпуске учтены директивные материалы Главтехуправления Министерства энергетики и электрификации СССР (зам. начальника К. М. Антипов), а также отзывы энергетических систем и проектных организаций.

Настоящий выпуск Руководящих указаний разработан в институте «Энергосетьпроект» (зам. главного инженера С. Я. Петров) сотрудниками подразделения типовых работ отдела релейной защиты, автоматики, устойчивости и моделирования (нач. отдела Д. Д. Левкович): руководителем подразделения, главным инженером проекта В. А. Рубинчиком, главным специалистом Т. Н. Дородновой, руководителем группы З. И. Айрапетовой, инженером Н. В. Куликовой. При разработке выпуска использовались также работы других сотрудников отдела релейной защиты, автоматики, устойчивости и моделирования Энергосетьпроекта: А. Б. Чернина, Б. Я. Смелянской, Н. В. Вавина — в приложении 6, Н. Е. Рибеля и В. М. Запальской — в приложении 7, А. Б. Чернина и Э. П. Смирнова — в приложении 8, С. Я. Петрова, Н. Е. Рибеля и П. А. Бергер — в приложении 9.

В оформлении работы принимали участие инженер С. А. Дутина и ст. техник Н. Т. Андреева.

Полезные предложения, рекомендации и соображения по данному выпуску дали работники ряда организаций: Г.В. Бердов, М. М. Середин, Э. Б. Пугачевский (Южное отделение ЭСП); К. М. Добродеев, А. П. Цветков (Горьковское отделение ЭСП); Б. В. Чигиринский, В. А. Гитман (Киевское ОКП ЭСП); А. С. Засыпкин (Новочеркасский политехнический институт); В. Н. Кудрявцев (Мосэнерго); И. Р. Таубес (Рязаньэнерго); К. П. Махова (Кузбассэнерго); М. А. Шабад (Ленэнерго); К. Г. Бакалинский (Челябэнерго); Е. М. Риндзюнский (Куйбышевэнерго); В. Н. Вавин (Атомтеплоэлектропроект); В. И. Корогодский (Тяжпромэлектропроект), П. М. Ханбекян (Минэнерго Узбекской ССР).

Все замечания и пожелания просьба направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Авторы

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. В настоящем выпуске рассмотрены расчеты защит понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110—500 кВ, выполненных на постоянном оперативном токе.

1.2. Расчеты защит производятся для выбора принципов выполнения защиты, а также параметров ее срабатывания и коэффициента чувствительности для расчетных режимов работы систем и вида КЗ; при этом в случае выполнения защиты с двумя или тремя реле тока расчет чувствительности производится для реле, по которому проходит наибольший ток повреждения.

Все расчеты параметров срабатывания и чувствительности защит, за исключением чувствительности некоторых устройств со сложными характеристиками (например, реле серии ДЗТ-11), производятся по первичным токам и напряжениям.

1.3. Приведенные в настоящем выпуске указания даны в предположении, что полные погрешности трансформаторов тока, используемых для защиты, не превышают 10 % при внешних КЗ — для дифференциальной защиты и при КЗ в расчетной точке — для других защит (см. ПУЭ, п. 3.2.29.1).

1.4. Расчет токов КЗ для выбора параметров срабатывания и проверки чувствительности защит должен производиться с учетом изменения сопротивлений трансформаторов (автотрансформаторов) при регулировании напряжения под нагрузкой. При этом минимальные и максимальные значения сопротивлений трансформаторов (автотрансформаторов) и соответствующие им коэффициенты трансформации должны приниматься по возможности с учетом реально используемых положений переключателя устройства РПН.

1.5. Согласование по чувствительности защит от внешних КЗ с защитами смежных элементов производится в соответствии с ПУЭ, п. 3.2.27. В настоящем выпуске вопросы согласования рассматриваются для дистанционной защиты, токовой защиты обратной последовательности и токовой защиты нулевой последовательности, поскольку для этих защит условие согласования в ряде случаев является определяющим для выбора параметров срабатывания.

1.6. Все расчеты токов КЗ, в том числе для резервных защит, в целях упрощения производятся для начального момента времени, при этом учитывается только периодическая составляющая тока.

1.7. Приведенные в настоящем выпуске указания по расчету дифференциальной защиты трансформаторов, выполненной с реле серии РНТ-560, даны в полном объеме, несмотря на то что область применения этой защиты ограничена. Такое решение принято в связи с тем, что эти реле еще широко используются и будут использоваться в эксплуатации. Однако на вновь вводимом оборудовании, как правило, следует применять реле серии ДЗТ-11 и лишь в отдельных случаях реле серии РНТ-560.

2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ, ВЫПОЛНЕННАЯ С РЕЛЕ СЕРИИ РНТ-560

2.1. УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ

2.1.1. Ниже даны основные указания по расчету дифференциальной токовой защиты, выполненной с реле серии РНТ-560 (типов РНТ-565 и РНТ-566), применительно к двух- и трехобмоточным трансформаторам *, однако эти указания могут использоваться также и для расчета дифференциальной защиты автотрансформаторов.

Следует отметить, что в соответствии с «Руководящими указаниями по релейной защите. Выпуск 13 А» использование дифференциальных защит трансформаторов, выполненных с реле серии РНТ-560, на проектируемых подстанциях не рекомендуется, поскольку на трансформаторах с РПН такие защиты в большинстве случаев не удовлетворяют требованиям чувствительности, регламентируемым ПУЭ. Однако в данном выпуске учитывалось большое распространение таких защит в эксплуатации, а также возможность использования их в отдельных случаях при проектировании (в первую очередь для защиты двухобмоточных трансформаторов мощностью менее 25 МВ·А).

Схема внутренних соединений реле типа РНТ-565 и примеры принципиальных схем его включения в защитах двух- и трехобмоточного трансформатора показаны на рис. 2.1.

В дифференциальной защите трехобмоточных трансформаторов трансформаторы тока защиты в общем случае присоединяются к рабочей и обеим уравнительным обмоткам насыщающегося трансформатора тока (НТТ) реле типа РНТ-565 (рис. 2.1,*б*).

В дифференциальной защите двухобмоточных трансформаторов, а также трехобмоточных трансформаторов в случаях, когда вторичные токи в плечах защиты для двух сторон, соответствующие одной и той же мощности, получаются примерно одинаковыми, трансформаторы тока защиты могут присоединяться только к уравнительным обмоткам НТТ реле; при этом рабочая обмотка может не использоваться (на рис. 2.1,*а* соответствующее соединение показано пунктиром).

2.1.2. Первичный ток срабатывания защиты $I_{с,з}$ выбирается по следующим условиям.

2.1.2.1. Отстройки от расчетного максимального первичного тока небаланса $I_{нб,расч}$ при переходном режиме внешних КЗ, определяемого с учетом влияния НТТ реле, и при токе качаний (здесь и ниже первичные токи

* Для трехобмоточных трансформаторов реле серии РНТ-560 используются крайне редко.

предполагаются приведенными к одной и той же ступени напряжения),

$$I_{с,з} \geqslant k_{отс} I_{нб,расч}, \qquad (2.1)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, учитывающий погрешности реле, ошибки расчета и необходимый запас; может быть принят равным 1,3.

2.1.2.2. Отстройки от броска намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора (автотрансформатора) под напряжение

$$I_{с,з} \geqslant k k_{выг} I_{ном}, \qquad (2.2)$$

где k — коэффициент, используемый при отстройке защиты от броска намагничивающего тока, в ориентировочных расчетах принимается равным 1—1,3 (с учетом того, что рассматриваемое реле выполнено с НТТ, имеющим короткозамкнутая обмотка, которая усиливает эффект отстройки от нестационарных режимов) и в случае необходимости может быть уточнен в сторону уменьшения (см. п. 2.1.5); $k_{выг}$ — коэффициент выгодности, представляющий собой отношение электромагнитной мощности автотрансформатора к его проходной мощности, поскольку бросок намагничивающего тока определяется, в частности, объемом стали сердечника, который соответствует электромагнитной мощности автотрансформатора; для трансформаторов принимается $k_{выг}=1{,}0$; $I_{ном}$ — номинальный ток, соответствующий номинальному напряжению среднего ответвления устройства РПН и номинальной мощности трансформатора.

2.1.3. Расчетный ток небаланса $I_{нб,расч}$, входящий в (2.1), может быть определен как сумма трех составляющих

$$I_{нб,расч} = |I'_{нб,расч}| + |I''_{нб,расч}| + |I'''_{нб,расч}|, \qquad (2.3)$$

где $I'_{нб,расч}$ — составляющая, обусловленная погрешностью трансформаторов тока; $I''_{нб,расч}$ — составляющая, обусловленная регулированием напряжения защищаемого трансформатора (автотрансформатора); $I'''_{нб,расч}$ — составляющая, обусловленная неточностью установки на НТТ реле расчетных чисел витков для неосновных сторон (см. п. 2.1.6).

В (2.3) учитываются абсолютные значения составляющих тока небаланса $I'_{нб,расч}$, $I''_{нб,расч}$ и $I'''_{нб,расч}$. Последние могут определяться как значения, пропорциональные периодической составляющей соответствующих токов внешнего КЗ, по выражениям:

$$I'_{нб,расч} = k_{пер} k_{одн} \varepsilon I_{кmax}, \qquad (2.4)$$

$$I''_{нб,расч} = (\Delta U_{\alpha} k_{ток\,\alpha} + \Delta U_{\beta} k_{ток\,\beta}) I_{кmax}, \qquad (2.5)$$

$$I'''_{нб,расч} = \left(\frac{w_{I\,расч} - w_{I}}{w_{I\,расч}} k_{ток\,I} \pm \pm \frac{w_{II\,расч} - w_{II}}{w_{II\,расч}} k_{ток\,II} \right) I_{кmax}, \qquad (2.6)$$

где $I_{кmax}$ — периодическая составляющая тока (при $t=0$), проходящего через защищаемую зону при расчетном внешнем (как правило, трехфазном) металлическом КЗ на стороне, где рассматривается повреждение; определяется при работе трансформатора на расчетном ответвлении, соответствующем, как правило, минимальному значению напряжения регулируемой обмотки (—РО), или ток качаний, если в рассматриваемом случае он является расчетным; $k_{пер}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим (наличие апериодической составляющей тока); для реле серии РНТ-560, имеющего НТТ с короткозамкнутой обмоткой, может быть принят равным 1; $k_{одн}$ — коэффициент однотипности трансформатора тока; при внешних КЗ на той стороне, где защищаемый трансформатор имеет два присоединения и трансформаторы тока рассматриваемой защиты установлены в цепях этих присоединений, принимается равным 0,5—1, причем меньшее из указанных значений принимается в случаях, когда указанные трансформаторы тока обтекаются мало различающимися между собой токами и примерно одинаково нагружены: при внешних КЗ на сторонах, где защищаемый трансформатор имеет одно присоединение, коэффициент однотипности $k_{одн}$ следует принимать равным 1; ε — относительное значение полной погрешности трансформаторов тока, соответствующее установившемуся режиму КЗ или качаний; при выборе трансформаторов тока по кривым предельных кратностей при 10 %-ной погрешности принимается равным 0,1, а при 5 %-ной погрешности — 0,05; ΔU_{α} и ΔU_{β} — относительные погрешности, обусловленные регулированием напряжения на сторонах защищаемого трансформатора и принимаемые равными половине используемого диапазона регулирования на соответствующей стороне (в условиях эксплуатации следует учитывать реально используемый диапазон регулирования); при этом выбор числа витков обмоток НТТ реле (см. п. 2.1.6) производится по режиму, соответствующему среднему значению регулируемого напряжения (см. также п. 2.1.4); $k_{ток\alpha}$ и $k_{ток\beta}$ — коэффициенты токораспределения, равные отношению слагающих тока расчетного внешнего КЗ, проходящих на сторонах, где производится регулирование напряжения, к току на стороне, где рассматривается КЗ; $w_{I\,расч}$ и $w_{II\,расч}$ — расчетные числа витков обмоток НТТ реле для неосновных сторон,

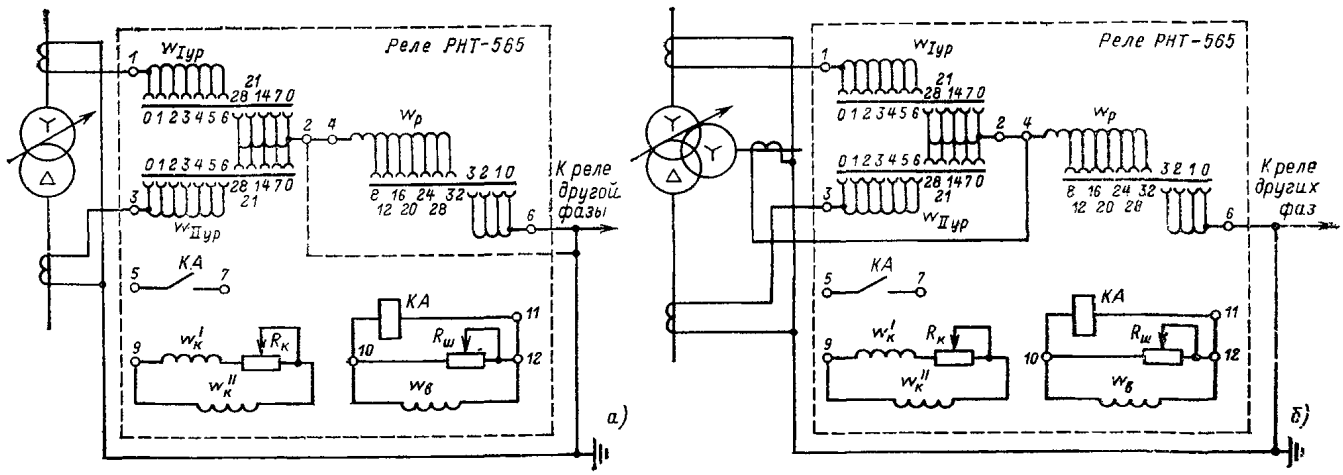


Рис. 2.1. Примеры принципиальных схем включения реле типа РНТ-565:
а — в защите двухобмоточного трансформатора; *б* — то же трехобмоточного

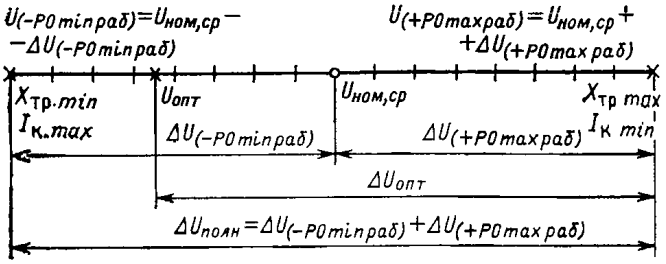


Рис. 2.2. Обозначение напряжений регулируемой обмотки трансформатора с РПН.

Примечание. Для тех трехобмоточных трансформаторов с высшим напряжением 220 кВ, у которых $u_к$, %, для ответвления, соответствующего минимальному значению напряжения регулируемой обмотки (—РО), больше чем для ответвления, соответствующего максимальному значению напряжения регулируемой обмотки (+РО), значения $X_{тр min}$ и $I_{к max}$ могут иметь место для ответвления (+РО)

определяемые по условию баланса МДС при внешних КЗ [п. 2.1.6, выражения (2.20) и (2.21)]; w_I и w_{II} — принятые (целые) числа витков обмоток НТТ реле для соответствующих неосновных сторон; $k_{ток\ I}$ и $k_{ток\ II}$ — коэффициенты токораспределения, равные отношению слагающих тока расчетного внешнего КЗ, проходящих на сторонах, где используются соответствующие числа витков w_I и w_{II} обмоток НТТ реле, к току на стороне, где рассматривается КЗ.

Использование знака «+» или «—» в (2.6) определяется направлением составляющих тока КЗ: при одинаковом направлении составляющих тока (например, к защищаемому трансформатору) используется знак «+», при противоположном — знак «—».

Выражения (2.4)—(2.6) составлены применительно к трехобмоточному трансформатору; для двухобмоточного трансформатора в правой части (2.5) и (2.6) исключаются вторые члены.

Определение составляющей тока небаланса $I'_{нб,расч}$ по (2.4) в ряде случаев может привести к завышению $I_{нб,расч}$, поскольку полная погрешность трансформаторов тока в реальных условиях может быть меньше 10 %. В этих случаях возникает вопрос о введении в расчет тока небаланса, соответствующего уточненному значению полной погрешности ε, рассчитываемому по кривым намагничивания трансформаторов тока. Указанное особенно актуально для случая, когда защищаемый трансформатор имеет два присоединения к данной сети (схема мостика или четырехугольника) и трансформаторы тока в цепи этих присоединений, используемые для дифференциальной защиты, объединяются в распределительном устройстве. Ввиду сложности этого расчета снижение полной погрешности в рассматриваемых случаях может быть грубо учтено коэффициентом $k_{одн}<1$.

2.1.4. На трансформаторах с РПН расчетное значение суммы составляющих тока небаланса $(I'_{нб}+I''_{нб})$ при необходимости может быть уточнено в сторону уменьшения, если при расчете учитывать отклонение регулятора напряжения не от среднего его положения $U_{ном,ср}$ (рис. 2.2), а от некоторого оптимального $U_{опт}$, которое характеризуется тем, что ему соответствуют равные по значению суммы составляющих тока небаланса $(I'_{нб}+I''_{нб})$ при крайних, реально возможных отклонениях регулятора в сторону увеличения $(+РО_{max раб})$ и в сторону уменьшения $(—РО_{min раб})$ напряжения регулируемой обмотки

$$(I'_{нб}+I''_{нб})_{(+РО\ max\ раб)}=(I'_{нб}+I''_{нб})_{(—РО\ min\ раб)}. \quad (2.7)$$

Положение регулятора, соответствующее оптимальному напряжению $U_{опт}$, находится между средним положением и тем крайним, реально возможным его положением, при котором значение суммарного тока, проходящего при расчетном внешнем КЗ через защищаемый трансформатор, будет максимальным $I_{к max}$ [как правило, соответствующим минимальному реальному значению напряжения регулируемой обмотки $(—РО_{min раб})$]— см. рис. 2.2.

Следует отметить, что оптимальное напряжение является расчетной величиной и может не соответствовать какому-то конкретному ответвлению.

Оптимальное напряжение $U_{опт}$ может быть определено по выражению

$$U_{опт}=[1+\Delta\underset{*}{U}_{(+РО max раб)}—\Delta\underset{*}{U}_{опт}]U_{ном,ср}, \quad (2.8)$$

где $\Delta\underset{*}{U}_{(+РО max раб)}$ — разность реального максимального и среднего относительных значений напряжения регулируемой обмотки трансформатора; $\Delta\underset{*}{U}_{опт}$ — разность реального максимального и оптимального относительных значений напряжения регулируемой обмотки трансформатора.

Относительная погрешность, обусловленная регулированием напряжения на стороне α защищаемого трансформатора, $\Delta\underset{*}{U}_{опт\alpha}$ может быть определена из (2.7) с учетом (2.4) и (2.5)

$$(k_{пер}k_{одн}\varepsilon+\Delta\underset{*}{U}_{опт\alpha}k_{ток\alpha}+\Delta\underset{*}{U}_{\beta}k_{ток\beta})I_{к(+РО max раб)}=$$
$$=[k_{пер}k_{одн}\varepsilon+(\Delta\underset{*}{U}_{полн\alpha}—\Delta\underset{*}{U}_{опт\alpha})\times$$
$$\times k_{ток\alpha}+\Delta\underset{*}{U}_{\beta}k_{ток\beta}]I_{к(—РО min раб)}, \quad (2.9)$$

где $I_{к(+РО max раб)}$ и $\underset{*}{I}_{к(—РО min раб)}$ — периодические составляющие максимальных суммарных токов (при $t=0$), проходящих при расчетном внешнем КЗ через защищаемый трансформатор при крайних реально возможных положениях регулятора, соответственно на ответвлениях (+РО *max* раб) и (—РО *min* раб); $\Delta\underset{*}{U}_{полн\alpha}$ — разность реальных максимального и минимального относительных значений напряжений регулируемой обмотки трансформатора, получаемых при регулировании напряжения на стороне α защищаемого трансформатора; $\Delta\underset{*}{U}_{опт\alpha}$ — то же, что в (2.8), на стороне α.

Из (2.9), учитывая, что $k_{пер}=1$, $k_{одн}=1$, $\varepsilon=0{,}1$, получают выражение для определения $\Delta\underset{*}{U}_{опт\alpha}$

$$\Delta\underset{*}{U}_{опт\alpha}=\frac{(0{,}1+\Delta\underset{*}{U}_{полн\alpha}k_{ток\alpha}+\Delta\underset{*}{U}_{\beta}k_{ток\beta})\times}{k_{ток\alpha}[I_{к\ (—РО\ min\ раб)}+}\rightarrow$$
$$\rightarrow\frac{\times I_{к\ (—РО\ min\ раб)}—(0{,}1+\Delta\underset{*}{U}_{\beta}k_{ток\beta})I_{к\ (+РО\ max\ раб)}}{+I_{к\ (+РО\ max\ раб)}]}. \quad (2.10)$$

Для двухобмоточных трансформаторов выражение (2.10) упрощается и приобретает следующий вид:

$$\Delta\underset{*}{U}_{опт}=\frac{(\Delta\underset{*}{U}_{полн}+0{,}1)I_{к\ (—РО\ min\ раб)}—}{I_{к\ (—РО\ min\ раб)}+}\rightarrow$$
$$\rightarrow\frac{-0{,}1I_{к\ (+РО\ max\ раб)}}{+I_{к\ (+РО\ max\ раб)}}. \quad (2.11)$$

После нахождения по (2.10) или (2.11) $\Delta\underset{*}{U}_{опт}$ определяется уточненное значение $(I'_{нб}+I''_{нб})$ по левой или правой части (2.9):

для трехобмоточного трансформатора (по левой части)

$$I'_{нб}+I''_{нб}=(0{,}1+\Delta\underset{*}{U}_{опт\alpha}k_{ток\alpha}+$$
$$+\Delta\underset{*}{U}_{\beta}k_{ток\beta})I_{к(+РО max раб)}; \quad (2.12)$$

для двухобмоточного трансформатора (по левой части)

$$I'_{нб}+I''_{нб}=(0{,}1+\Delta\underset{*}{U}_{опт})I_{к(+РО max раб)}. \quad (2.13)$$

Следует отметить, что уточнение значения тока небаланса по выражению (2.12) или (2.13) может оказаться целесообразным в тех случаях, когда ток внеш-

него КЗ (при котором определяется ток небаланса), рассчитанный при одном из крайних реально возможных положений регулятора напряжения, отличается на 15 % и более от тока, рассчитанного при среднем положении регулятора напряжения.

2.1.5. Первичный ток срабатывания защиты по условию отстройки от броска намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора (автотрансформатора) под напряжение по (2.2) может быть снижен за счет уточнения значения коэффициента k в соответствии с конкретными условиями (см. приложение П1).

Уточненное значение коэффициента k определяется по одному из следующих выражений в зависимости от значения номинального вторичного тока трансформаторов тока, установленных на стороне включаемой обмотки трансформатора (автотрансформатора):

а) при номинальном вторичном токе 5 А

$$k=1{,}7-2{,}8\underset{*}{X}_{к}; \qquad (2.14)$$

б) при номинальном вторичном токе 1 А

$$k=1{,}3-1{,}25\underset{*}{X}_{к}, \qquad (2.15)$$

где $\underset{*}{X}_{к}$ — относительное индуктивное сопротивление контура включения трансформатора (автотрансформатора), определяемое по выражению

$$\underset{*}{X}_{к}=\underset{*}{X}_{с}+k_{1}\underset{*}{X}_{в}^{(1)}. \qquad (2.16)$$

Относительное индуктивное сопротивление прямой последовательности системы (сопротивление до вводов включаемой обмотки) $\underset{*}{X}_{с}$ определяется по отношению к базовому сопротивлению

$$\underset{*}{X}_{с}=\frac{X_{с}}{X_{б}}=\frac{X_{с}}{U_{ном}^{2}/S_{ном}}. \qquad (2.17)$$

В формулах (2.16) и (2.17) $S_{ном}$ — номинальная мощность включаемого трансформатора (проходная — автотрансформатора); $U_{ном}$ — номинальное междуфазное напряжение включаемой обмотки; $\underset{*}{X}_{в}^{(1)}$ — относительное индуктивное сопротивление включаемой обмотки трансформатора (автотрансформатора) при включении одной фазы и полном насыщении стержней и ярм магнитопровода трансформатора (автотрансформатора); k_{1} — коэффициент, учитывающий увеличение индуктивного сопротивления включаемой обмотки трансформатора (автотрансформатора) за счет неполного насыщения ярм его магнитопровода.

Значения относительных индуктивных сопротивлений трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов $\underset{*}{X}_{в}^{(1)}$ приведены в табл. П1.1, двухобмоточных трансформаторов — в табл. П1.2; $\underset{*}{X}_{в}^{(1)}$ также могут быть подсчитаны по упрощенным выражениям, приведенным в табл. П1.3.

Коэффициент k_{1} ориентировочно может быть принят равным 1,15.

При расчете по (2.14) (номинальный вторичный ток 5 А) значения коэффициента k должны находиться в пределах $1{,}3>k\geqslant 0{,}9$, а при расчете по (2.15) (номинальный вторичный ток 1 А) — в пределах $1{,}3>k\geqslant 0{,}8$ (см. приложение П.1).

2.1.6. Число витков обмотки НТТ реле, соответствующее току срабатывания защиты $I_{с,з}$ для одной из сторон защищаемого трансформатора, принимаемой в расчете за основную, определяется по выражению

$$w_{осн,\,расч}=\frac{F_{с,\,р}}{I_{с,\,р,\,осн}}, \qquad (2.18)$$

где $F_{с,р}$ — магнитодвижущая сила (МДС) срабатывания реле; для реле типов РНТ-565 и РНТ-566 по данным завода $F_{с,р}=100$ А; $I_{с,р,осн}$ — ток срабатывания реле, отнесенный к основной стороне; определяется приведением первичного тока срабатывания защиты ко вторичным цепям трансформаторов тока основной стороны.

За основную может приниматься сторона, которой соответствует наибольший из вторичных токов в плечах защиты (см. п. 2.2.1) (так как при этом в общем случае ток $I'''_{нб,расч}$ получается меньше), или сторона основного питания (так как это несколько упрощает расчеты чувствительности), последнее целесообразно в случаях, когда вторичные токи в плечах защиты близки по значению.

Числа витков обмоток НТТ реле, соответствующие току срабатывания защиты $I_{с,з}$, для других (неосновных) сторон защищаемого трансформатора определяются по условию равенства нулю (при неучете небаланса) результирующей МДС в НТТ реле при нагрузочном режиме и внешних КЗ. Это обеспечивается при равенстве МДС всех сторон в условиях прохождения по ним одной и той же мощности, например номинальной мощности защищаемого трансформатора, т. е. когда имеет место соотношение

$$I_{осн,в}w_{осн}=I_{I\,в}w_{I\,расч}=I_{II\,в}w_{II\,расч}, \qquad (2.19)$$

где $I_{осн,в}$, $I_{I\,в}$ и $I_{II\,в}$ — вторичные токи в плечах защиты для основной и неосновных сторон, соответствующие номинальной мощности трансформатора (проходной — автотрансформатора); $w_{осн}$ — принятое число витков обмотки НТТ реле для основной стороны.

Из (2.19) следует:

$$w_{I\,расч}=w_{осн}\frac{I_{осн,\,в}}{I_{I\,в}}; \qquad (2.20)$$

$$w_{II\,расч}=w_{осн}\frac{I_{осн,\,в}}{I_{II\,в}}. \qquad (2.21)$$

2.1.7. Чувствительность защиты при металлических КЗ расчетного вида (m) в защищаемой зоне характеризуется коэффициентом чувствительности $k_{ч}^{(m)}$, который определяется как отношение рабочей МДС реле, равной сумме МДС обмоток НТТ реле, в условиях повреждения, к МДС срабатывания реле

$$k_{ч}^{(m)}\cdot\frac{F_{раб}^{(m)}}{F_{с,\,р}}=\sum_{n=1}^{p}\frac{I_{рn}^{(m)}w_{n}}{F_{с,\,р}}=k_{ч1}^{(m)}+\ldots+k_{чp}^{(m)}, \qquad (2.22)$$

где $F_{раб}^{(m)}$ — рабочая МДС НТТ реле при рассматриваемом металлическом КЗ расчетного вида (m); $I_{рn}^{(m)}$ — ток, подводимый к обмотке НТТ реле с числом витков w_{n}, с учетом его знака при рассматриваемом металлическом КЗ; w_{n} — число витков обмотки НТТ реле, используемое на стороне n; $F_{с,р}$ — то же, что в (2.18); $k_{ч1}^{(m)}$, ..., $k_{чp}^{(m)}$ — слагаемые коэффициента чувствительности защиты, определяемые долей тока КЗ и током срабатывания защиты на соответствующей стороне.

Слагаемые коэффициента чувствительности $k_{чn}$ для рассматриваемого вида КЗ (m) могут определяться через первичные значения токов, приведенных к стороне, принятой за расчетную, по выражению:

$$k_{чn}^{(m)}=\frac{I_{рn}^{(m)}w_{n}}{F_{с,\,р}}=\frac{I_{к\,min}^{(m)}k_{ток\,n}^{(m)}k_{сх\,n}^{(m)}w_{n}}{\frac{U_{хn}}{U_{х,\,расч}}K_{Iп}F_{с,\,р}}=\frac{I_{к\,min}^{(m)}k_{ток\,n}^{(m)}k_{сх\,n}^{(m)}}{I_{с,з\,n}k_{сх\,n}^{(3)}} \qquad (2.23)$$

или

$$k_{чn}^{(m)}=\frac{I_{кn}^{(m)}k_{схn}^{(m)}}{I_{с,\,зn}k_{схn}^{(3)}}, \qquad (2.23а)$$

где $I_{кmin}^{(m)}$ — первичное минимальное значение периодической составляющей суммарного тока КЗ рассматриваемого вида (m) в защищаемой зоне, приведенного к расчетной стороне; $I_{с,зn}$ — ток срабатывания защиты, обусловленный витками рабочей обмотки НТТ реле,

Таблица 2.1

№ п/п.	Вид КЗ	Место КЗ	Значение коэффициента схемы $k^{(m)}_{сх}$		Отношение $\frac{k^{(m)}_{сх}}{k^{(3)}_{сх}}$
			на стороне У	на стороне Д	
1	Между тремя фазами (и нагрузочный режим)	На стороне У или Д	$\sqrt{3}$	1	1
2	Между двумя фазами	На стороне У	2 (1)	$\frac{2}{\sqrt{3}}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{2}{\sqrt{3}}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$
		На стороне Д	$\sqrt{3}$	1	1
3	Одной фазы на землю	На стороне У	1	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$

установленными на стороне n, приведенный к расчетной стороне; $I_{кn}^{(m)}$ — составляющая первичного минимального тока КЗ рассматриваемого вида (m) в защищаемой зоне, проходящего на стороне n и приведенного к расчетной стороне; $U_{хn}$ и $U_{х.расч}$ — напряжения холостого хода защищаемого трансформатора соответственно на n-й и расчетной сторонах; $k_{токn}^{(m)}$ — коэффициент токораспределения для стороны n и рассматриваемого вида КЗ (m); K_{In} — коэффициент трансформации трансформаторов тока на стороне n; $k_{схn}^{(m)}$ — коэффициент схемы, определяется видом повреждения (m), схемой соединения трансформаторов тока защиты на рассматриваемой стороне (n) и схемой соединения обмоток защищаемого трансформатора (если повреждение рассматривается на другой стороне) — рис. П2.1 ($k_{схn}^{(3)}$), П2.2 и П2.3 ($k_{схn}^{(2)}$) и П2.4 ($k_{схn}^{(1)}$).

Следует отметить, что в знаменателе (2.23) и (2.23а) учтен коэффициент схемы для замыкания между тремя фазами $k_{схn}^{(3)}$, поскольку перевод на вторичную сторону тока срабатывания защиты $I_{с,зn}$ осуществляется по симметричному режиму.

В табл. 2.1 приведены значения коэффициента схемы $k_{сх}$ при различных видах и различном месте КЗ. Таблица составлена для трансформаторов со схемой соединения обмоток У/У/Д-11 исходя из следующего:

на стороне У защищаемого трансформатора трансформаторы тока соединены в треугольник (Д), а на стороне Д — в звезду (У);

рассматривается трехрелейная схема защиты; для двухрелейной схемы значения коэффициентов (там, где они отличаются) даны в скобках;

коэффициенты схемы для замыкания одной фазы на землю даны для защиты трансформаторов, в которой токи на отдельных сторонах могут определяться распределением полного тока в месте КЗ по схеме прямой последовательности (см. приложение П2).

Первая и вторая строки в табл. 2.1 могут быть использованы также при расчетах коэффициентов чувствительности защиты автотрансформатора со схемой соединения $У_{авто}$/Д-0-11.

Ток срабатывания защиты $I_{с,зn}$, приведенный к расчетной стороне, может определяться по выражению

$$I_{с,\,зn расч} = \frac{F_{с,\,р} K_{In}}{w_n k_{схn}^{(3)}} \frac{U_{хn}}{U_{х,\,расч}}. \qquad (2.24)$$

Обозначения те же, что и в (2.23).

Для реле серии РНТ-560, $F_{с,р}$ которого равна 100 А, выражение (2.24) может быть представлено в виде

$$I_{с,\,зn расч} = \frac{100 K_{In}}{w_n k_{схn}^{(3)}} \frac{U_{хn}}{U_{х.\,расч}}. \qquad (2.25)$$

Для двухобмоточных трансформаторов, а также для ориентировочных расчетов защиты трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов коэффициент чувствительности $k_ч^{(m)}$ может определяться в предположении, что весь ток повреждения проходит по одной стороне

$$k_ч^{(m)} = \frac{I_{кmin}^{(m)} k_{схn}^{(m)}}{I_{с,\,з} k_{схn}^{(3)}}, \qquad (2.26)$$

где $I_{кmin}^{(m)}$ — минимальное значение периодической составляющей суммарного тока КЗ рассматриваемого вида (m) в защищаемой зоне, приведенного к стороне основного питания; $I_{с,з}$ — ток срабатывания защиты, приведенный к стороне основного питания.

Остальные обозначения те же, что в (2.23).

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

В соответствии с ПУЭ (п. 3.2.21) требуется обеспечить наименьший коэффициент чувствительности примерно 2,0.

Допускается снижение требуемого коэффициента чувствительности примерно до 1,5 в следующих случаях (в которых обеспечение коэффициента чувствительности около 2,0 связано со значительным усложнением защиты или технически невозможно, при этом замену реле серии РНТ-560 на реле серии ДЗТ-11 не следует считать значительным усложнением):

при КЗ на выводах низшего напряжения трансформаторов мощностью менее 80 МВ·А;

в режиме включения трансформатора (автотрансформатора) под напряжение, а также для кратковременных режимов его работы (например, при отключении одной из питающих сторон);

при КЗ за реактором, установленным на стороне низшего напряжения трансформатора (автотрансформатора) и входящим в зону его дифференциальной защиты.

При наличии других защит, охватывающих реактор и удовлетворяющих требованиям чувствительности к основным защитам при КЗ за реактором, чувствительность дифференциальной защиты трансформатора (автотрансформатора) при КЗ в этой точке допускается не обеспечивать.

2.2. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТА

В соответствии с приведенными в п. 2.1 указаниями расчет дифференциальной защиты трансформатора, выполненной с реле серии РНТ-560, производится в следующем порядке.

2.2.1. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого трансформатора, соответствующие его номинальной мощности, $I_{ном}$. По этим токам определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты $I_{I\,в}$, $I_{II\,в}$ и $I_{III\,в}$, исходя из коэффициентов трансформации трансформаторов тока K_I (выбираются с учетом параметров используемого оборудования, его перегрузочной способности, требований релейной защиты и схемы соединения трансформаторов тока — при соединении трансформаторов тока в треугольник исходят из первичного тока $I_{ном}\sqrt{3}$ ввиду целесообразности, иметь вторичные токи в плече защиты, не превышающие 5 А) и коэффициентов схемы $k_{сх}$.

2.2.2. Определяются первичные максимальные токи КЗ, проходящие через защищаемый трансформатор при внешних КЗ на всех его сторонах.

2.2.3. Определяется расчетный первичный ток небаланса $I_{нб,расч}$ без учета $I'''_{нб,расч}$. Расчет производится по (2.3)—(2.5) с учетом значений токов КЗ, полученных в п. 2.2.2.

2.2.4. Определяется ориентировочное значение первичного тока срабатывания защиты $I_{с,з}$ по (2.1), исходя из значения небаланса $I_{нб}$, полученного в п. 2.2.3, и по (2.2) в соответствии с рекомендациями п. 2.1.2. Принимается большее из двух полученных значений.

Если для трансформаторов мощностью 25 МВ·А и выше значение первичного тока срабатывания защиты $I_{с,з}$ по (2.1) окажется больше 1,5 номинального тока трансформатора, то в соответствии с рекомендациями ПУЭ (п. 3.2.21.4) следует выполнять защиту с реле серии ДЗТ-11.

2.2.5. Производится предварительная проверка чувствительности. Для этого определяется первичный ток при металлических КЗ на выводах защищаемого трансформатора в расчетных по чувствительности режимах работы подстанции и питающих систем в предположении, что весь ток повреждения проходит по одной из сторон трансформатора. Коэффициент чувствительности определяется по (2.26) с учетом ориентировочного значения тока срабатывания защиты $I_{с,з}$, полученного в п. 2.2.4.

Если полученное значение коэффициента чувствительности окажется не ниже допустимого, то расчет защиты, выполненной с реле серии РНТ-560, следует продолжить, как показано ниже.

В тех случаях, когда значение коэффициента чувствительности окажется ниже допустимого, а расчетным условием для выбора тока срабатывания защиты являлась отстройка от броска намагничивающего тока по (2.2), следует произвести уточнение коэффициента k в этом выражении в соответствии с п. 2.1.5.

Если расчетным для выбора тока срабатывания защиты являлась отстройка от тока небаланса при внешних КЗ по (2.1), то следует перейти к расчету защиты, выполненной с реле серии ДЗТ-11. В тех редких случаях, когда защита, выполненная с реле серии ДЗТ-11, тоже не обеспечит требуемую чувствительность из-за отстройки от броска намагничивающего тока, следует попытаться добиться требуемой чувствительности защиты с реле серии РНТ-560, произведя расчет ее по оптимальному напряжению в соответствии с рекомендациями п. 2.1.4. Кроме того, указанный расчет целесообразно производить в условиях эксплуатации с целью увеличения чувствительности защиты, выполненной с реле серии РНТ-560.

2.2.6. Определяется число витков обмотки НТТ реле, соответствующее току срабатывания защиты $I_{с,з}$, для основной стороны. Расчет производится по (2.18) в соответствии с п. 2.1.6.

Принимается ближайшее меньшее по отношению к полученному (2.18) целое число витков $w_{осн}$ (из значений, которые могут быть установлены на НТТ реле в соответствии с имеющимися выводами).

2.2.7. Определяются числа витков обмоток НТТ реле для других (неосновных) сторон защищаемого трансформатора по (2.20) и (2.21), исходя из принятого для установки на НТТ реле числа витков $w_{осн}$ основной стороны.

В случаях, когда эти числа витков $w_{I\,расч}$ или $w_{II\,расч}$ получаются дробными, принимаются ближайшие целые (меньшие или бо́льшие) числа витков w_I и w_{II}, а расчет уточняется за счет учета составляющей тока небаланса $I'''_{нб,расч}$ (обусловленной указанным округлением), как это показано в пп. 2.2.8 и 2.2.9.

При этом для уменьшения тока небаланса $I'''_{нб,расч}$ в ряде случаев целесообразно округлять числа витков $w_{I\,расч}$ и $w_{II\,расч}$ таким образом, чтобы составляющие тока небаланса $I'''_{нб,расч}$ в (2.6) имели противоположные знаки. Однако при этом необходимо проверить, не будет ли больше результирующий ток небаланса $I_{нб,расч}$ в других случаях повреждений, в которых составляющие тока небаланса $I'''_{нб,расч}$ имеют одинаковые знаки.

2.2.8. Определяется первичный уточненный ток небаланса $I_{нб,расч}$ (с учетом составляющей $I'''_{нб,расч}$ полученной в п. 2.2.7) по (2.3).

2.2.9. Определяется ток срабатывания защиты, соответствующий принятому числу витков НТТ реле для основной стороны и приведенный к расчетной ступени напряжения n по (2.25).

2.2.10. Определяется действительный коэффициент отстройки защиты $k_{отс}$, исходя из (2.1). Если $k_{отс} \geqslant 1{,}3$, следует перейти к расчетам по п. 2.2.11; если $k_{отс} < 1{,}3$, следует принять для основной стороны новое число витков, ближайшее меньшее по отношению к принимавшемуся ранее (для реле типа РНТ-565 на один виток меньше). Затем производится пересчет числа витков для других (неосновных) сторон защищаемого трансформатора по (2.20) и (2.21). Расчет повторяется до тех пор, пока действительный коэффициент отстройки защиты $k_{отс}$, рассчитанный по току срабатывания защиты, вычисленному с учетом составляющей $I'''_{нб,расч}$ окажется примерно равным или большим 1,3.

2.2.11. Определяются первичные токи повреждения и коэффициент чувствительности по (2.22) или (2.26) в соответствии с п. 2.1.7 при металлических КЗ между двумя фазами на выводах защищаемого трансформатора с питаемых сторон в расчетных по чувствительности режимах работы подстанции и питающих систем.

Для трехобмоточных трансформаторов с высшим напряжением 110—220 кВ, для которых возможно опробование со стороны среднего напряжения, должны определяться также первичные токи повреждения и коэффициент чувствительности по выражениям (2.22) или (2.26) при металлическом замыкании на землю одной фазы на выводах высшего напряжения защищаемого трансформатора в режиме его опробования со стороны среднего напряжения.

2.3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

2.3.1. Пример

2.3.1.1. В настоящем примере дан расчет дифференциальной токовой защиты двухобмоточного трансформатора 115/6,6 кВ мощностью 16 МВ·А. Трансформатор имеет встроенное регулирование напряжения под нагрузкой (РПН) в нейтрали высшего напряжения в пределах ±16 % номинального. Исходная схема и схемы замещения прямой и обратной последовательностей приведены на рис. 2.3.

Пример рассчитан в именованных единицах. Сопротивления, приведенные к стороне высшего напряжения, на рис. 2.3,*б* указаны в омах. Сопротивления защищаемого трансформатора рассчитаны при двух крайних реально возможных положениях регулятора. Реально возможный диапазон регулирования принят от минималь-

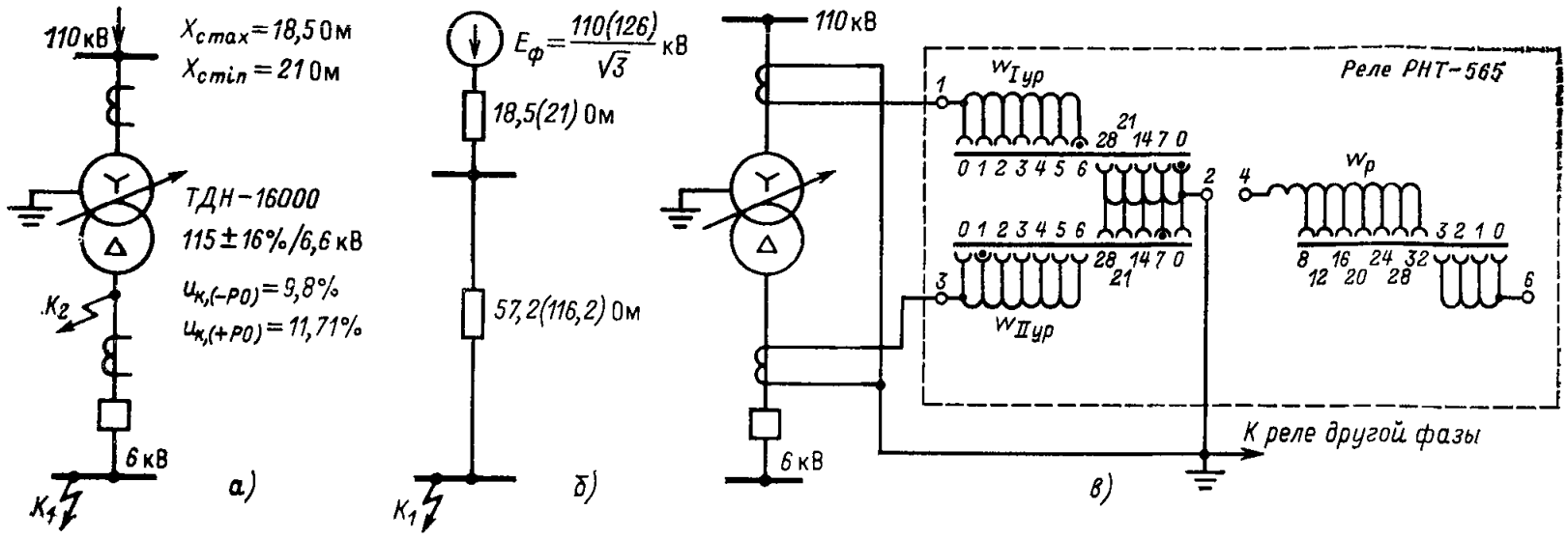


Рис. 2.3. Пример 2.3.1 расчета дифференциальной токовой защиты двухобмоточного трансформатора:

а — исходная схема; *б* — схема замещения прямой (обратной) последовательности; *в* — схема включения реле типа РНТ-565 в дифференциальной токовой защите двухобмоточного трансформатора.

Примéчание. В схеме замещения на рис. 2.3,*б* напряжения питающей системы и сопротивления трансформатора указаны для крайних реально возможных отклонений регулятора в сторону уменьшения и увеличения (в скобках) напряжения регулируемой обмотки; сопротивления системы указаны для максимального и минимального (в скобках) режимов работы

ного значения напряжения регулируемой обмотки $[U_{(-РО)}]$ до напряжения, соответствующего максимальному допустимому рабочему напряжению сети (126 кВ).

2.3.1.2. Расчет производится в следующем порядке.

2.3.1.2.1. Определяются первичные токи на сторонах высшего и низшего напряжений защищаемого трансформатора, соответствующие его номинальной мощности. По этим токам определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты, исходя из коэффициентов трансформации трансформаторов тока K_I (см. п. 2.2.1) и коэффициентов схемы $k_{сх}$ (см. табл. 2.1).

Расчеты выполнены в соответствии с п. 2.2.1 и приведены в табл. 2.2.

2.3.1.2.2. Определяется максимальный первичный ток, проходящий через защищаемый трансформатор при КЗ между тремя фазами на шинах 6 кВ (в точке K_1 на рис. 2.3,*а*).

Расчет выполнен в соответствии с п. 2.2.2

$$I_{кmax}^{(3)}=840 \text{ А}.$$

2.3.1.2.3. Определяется первичный расчетный ток небаланса $I_{нб,расч}$ без учета составляющей $I'''_{нб,расч}$ при рассматриваемом внешнем КЗ по (2.3)—(2.5) в соответствии с п. 2.2.3

$$I_{нб,расч}=(1\cdot 1\cdot 0{,}1+0{,}16)840=218{,}4 \text{ А}.$$

2.3.1.2.4. Определяется предварительно первичный ток срабатывания защиты в соответствии с п. 2.2.4:

по условию отстройки от максимального тока небаланса по (2.1) без учета составляющей тока небаланса $I'''_{нб,расч}$

$$I_{с,з}\geqslant 1{,}3\cdot 218{,}4=283{,}9 \text{ А};$$

по условию отстройки от броска намагничивающего тока по (2.2)

$$I_{с,з}\geqslant 1{,}3\cdot 80{,}4=104{,}5 \text{ А}.$$

Расчетной для выбора тока срабатывания является отстройка от тока небаланса при внешнем КЗ

$$I_{с,з}=283{,}9 \text{ А}.$$

2.3.1.2.5. Производится предварительная проверка чувствительности в соответствии с п. 2.2.5.

В рассматриваемом примере расчетным по чувствительности является КЗ между двумя фазами на стороне

Таблица 2.2

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение для стороны	
		110 кВ	6 кВ
Первичный ток на сторонах защищаемого трансформатора, соответствующий его номинальной мощности, А	$I_{ном}=\frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном,ср}}$	$\frac{16\,000}{\sqrt{3}\cdot 115}=80{,}4$	$\frac{16\,000}{\sqrt{3}\cdot 6{,}6}=1400$
Схема соединения трансформаторов тока	—	Д	У
Коэффициент трансформации трансформаторов тока	K_I	150/5	2000/5
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора, А	$I_{ном,в}=\frac{I_{ном}k_{сх}}{K_I}$	$\frac{80{,}4\sqrt{3}}{150/5}=4{,}64$	$\frac{1400}{2000/5}=3{,}5$

Таблица 2.3

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
Ток срабатывания реле на основной стороне, А	$I_{с,\ р,\ осн} = \frac{I_{с,\ з} k_{сх}}{K_{I110}}$	$\frac{283{,}9\sqrt{3}}{150/5} = 16{,}4$
Число витков обмотки НТТ реле для основной стороны:		
расчетное	По (2.18) $w_{осн,\ расч} = \frac{F_{с,\ р}}{I_{с,\ р,\ осн}}$	$\frac{100}{16{,}4} = 6{,}1$
предварительно принятое	$w_{осн} = w_{I\ ур}$	6
Число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны:		
расчетное	По (2.20) $w_{I\ расч} = w_{осн} \frac{I_{осн,\ в}}{I_{Iв}}$	$6\ \frac{4{,}64}{3{,}5} = 7{,}96$
предварительно принятое	$w_{I} = w_{II\ ур}$	8
Составляющая первичного тока небаланса, обусловленная округлением расчетного числа витков неосновной стороны для расчетного случая повреждения, А	По (2.6) $I'''_{нб,\ расч} = \left\| \frac{w_{Iрасч} - w_{I}}{w_{Iрасч}} I_{к\ max} \right\|$	$\left\| \frac{7{,}96 - 8}{7{,}96} 840 \right\| = 4{,}22$
Первичный расчетный ток небаланса с учетом составляющей $I''_{нб.расч}$, А	По (2.3) $I_{нб,\ расч} = \|I'_{нб,\ расч}\| + \|I''_{нб,\ расч}\| + \|I'''_{нб,\ расч}\|$	$218{,}4 + 4{,}22 = 222{,}62$
Ток срабатывания защиты на основной стороне, А	$I_{с,\ з} = \frac{F_{с,\ р}}{w_{осн}} \frac{K_{I110}}{\sqrt{3}}$	$\frac{100}{6} \cdot \frac{150/5}{\sqrt{3}} = 289$
Коэффициент отстройки защиты (окончательное значение)	$k_{отс} = \frac{I_{с,\ з}}{I_{нб.расч}}$	$\frac{289}{222{,}62} = 1{,}296 \approx 1{,}3$
Окончательно принятое число витков обмотки НТТ реле для установки на основной и неосновной сторонах	$w_{осн} = w_{I\ ур}$ $w_{I} = w_{II\ ур}$	6 8

6 кВ в точке К2 (рис. 2.3,*а*) в минимальном режиме работы питающей системы и при максимальном сопротивлении защищаемого трансформатора

$$I_{кmin}^{(2)} = 462 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности, определяемый по (2.26), равен

$$k_{ч} = \frac{462\sqrt{3}}{283{,}9\sqrt{3}} = 1{,}63 > 1{,}5,$$

где коэффициент схемы при КЗ между двумя фазами на стороне низшего напряжения защищаемого трансформатора $k_{схп}^{(2)} = \sqrt{3}$ взят из табл. 2.1.

Коэффициент чувствительности $k_{ч}$ больше требуемого ПУЭ в крайних случаях, поэтому расчет защиты с реле типа РНТ-565 можно продолжить. Однако в рассматриваемых условиях желательно использовать реле типа ДЗТ-11.

2.3.1.2.6. Определяется число витков обмотки НТТ реле для основной стороны 110 кВ (за основную сторону в соответствии с п. 2.2.6 принята сторона основного питания). Принимается ближайшее меньшее по отношению к полученному из (2.18) число витков $w_{осн} = 6$.

2.3.1.2.7. Определяется число витков $w_{I\ расч}$ обмотки НТТ реле для неосновной стороны 6 кВ защищаемого трансформатора по (2.20) в соответствии с п. 2.2.7. Число витков $w_{осн}$ и w_{I} уточняется после учета составляющей тока небаланса $I'''_{нб,расч}$, обусловленной неточностью установки на НТТ реле расчетных чисел витков, согласно п. 2.2.8.

Расчеты по пп. 2.3.1.2.6 и 2.3.1.2.7 приведены в табл. 2.3. Схема включения реле для рассматриваемого примера приведена на рис. 2.3,*в*.

2.3.1.2.8. Определяется значение коэффициента чувствительности для тока срабатывания защиты, соответствующего окончательно принятому, в режиме, при котором производилась предварительная проверка чувствительности, по (2.26)

$$k_{ч} = \frac{462\sqrt{3}}{289\sqrt{3}} = 1{,}6 > 1{,}5.$$

Рассмотренная защита может быть использована в крайних случаях для защиты двухобмоточного трансформатора по рис. 2.3,*а*.

2.3.2. Пример

2.3.2.1. В настоящем примере дан расчет дифференциальной токовой защиты двухобмоточного трансформатора 115/6,6 кВ мощностью 16 МВ·А. Трансформатор имеет встроенное регулирование напряжения под нагрузкой в нейтрали высшего напряжения в пределах ±16 % номинального.

Расчет дан с учетом отклонения регулятора напряжения не от среднего положения (см. пример 2.3.1), а от положения, соответствующего оптимальному напряжению $U_{опт}$. Исходная схема и схема замещения прямой (обратной) последовательности приведены на рис. 2.4.

Пример рассчитан в именованных единицах. Сопротивления, приведенные к стороне высшего напряжения, на рис. 2.4,*б* указаны в омах.

Значения сопротивлений защищаемого трансформатора при двух крайних реально возможных положениях регулятора заимствованы из примера 2.3.1, п. 2.3.1.1.

Предварительные расчеты показали, что при выборе тока срабатывания защиты $I_{с,з}$ по (2.1) с учетом (2.3)—(2.5) чувствительность дифференциальной защиты не удовлетворяет требованиям ПУЭ (при КЗ между двумя фазами на выводах низшего напряжения трансформаторов $k_ч=1{,}25<1{,}5$), а ток при внешнем КЗ в точке K_1 (рис. 2.4,*а*), рассчитанный при положении регулятора на ответвлении —РО*min*раб, отличается на 42 % > 15 % от тока, рассчитанного при среднем положении регулятора напряжения. Поэтому в соответствии с п. 2.1.4 в примере произведен расчет суммы составляющих тока небаланса ($I'_{нб}+I''_{нб}$) исходя из отклонения от оптимального напряжения регулируемой обмотки.

2.3.2.2. Расчет производится в следующем порядке.

2.3.2.2.1. Первичные номинальные токи защищаемого трансформатора, коэффициенты трансформации трансформаторов тока для защиты и вторичные номинальные токи в плечах защиты заимствуются из примера 2.3.1 (см. табл. 2.2).

2.3.2.2.2. Определяются токи, проходящие через защищаемый трансформатор при КЗ между тремя фазами на шинах 6 кВ (точка K_1 на рис. 2.4,*а*) при положениях регулятора соответственно на ответвлениях —РО*min*раб и +РО*max*раб. В настоящем примере, как и в примере 2.3.1, за используемый в эксплуатации принят реально возможный диапазон регулирования напряжения трансформатора: от напряжения, соответствующего положению РПН на крайнем ответвлении —РО*min*раб, до максимально допустимого рабочего напряжения сети, т. е. от 96,5 до 126 кВ:

$$I^{(3)}_{к\,(-РО\,min\,раб)} = 1022 А,$$

$$I^{(2)}_{к\,(+РО\,max\,раб)\,min} = 502 А;$$

$$I^{(3)}_{к\,(+РО\,max\,раб)\,max} = 600 А;$$

2.3.2.2.3. Определяются:

разность используемых максимального и минимального относительных значений напряжения регулируемой обмотки трансформатора

$$\Delta U^{*}_{полн} = \frac{126-96{,}5}{115} = 0{,}257;$$

разность реального максимального и оптимального относительных значений напряжения регулируемой обмотки трансформатора по (2.11)

$$\Delta U^{*}_{опт} = \frac{(0{,}257+0{,}1)1022-0{,}1\cdot 600}{1022+600} = 0{,}188;$$

оптимальное напряжение по (2.8)

$$U_{опт} = [1+(0{,}257-0{,}16)-0{,}188]\,115 = 104{,}4 кВ.$$

Расчеты выполнены в соответствии с п. 2.1.4.

2.3.2.2.4. Определяется первичный расчетный ток небаланса $I_{нб,расч}$ без учета составляющей $I'''_{нб,расч}$ (обусловленного неточностью установки на НТТ реле расчетного числа витков) при рассматриваемом повреждении по (2.13)

$$I'_{нб,расч}+I''_{нб,расч} = (0{,}1+0{,}188)600 = 172{,}8 А.$$

2.3.2.2.5. Предварительно определяется первичный ток срабатывания защиты без учета составляющей тока небаланса $I'''_{нб,расч}$ в соответствии с п. 2.2.4:

по условию отстройки от максимального тока небаланса по (2.1)

$$I_{с.з} \geqslant 1{,}3\cdot 172{,}8 = 224{,}6 А;$$

по условию отстройки от броска намагничивающего тока по (2.2)

$$I_{с,з} \geqslant 1{,}3\cdot 80{,}4 = 104{,}5 А.$$

Расчетной для выбора тока срабатывания является отстройка от тока небаланса при внешнем повреждении

$$I_{с,з} = 224{,}6 А.$$

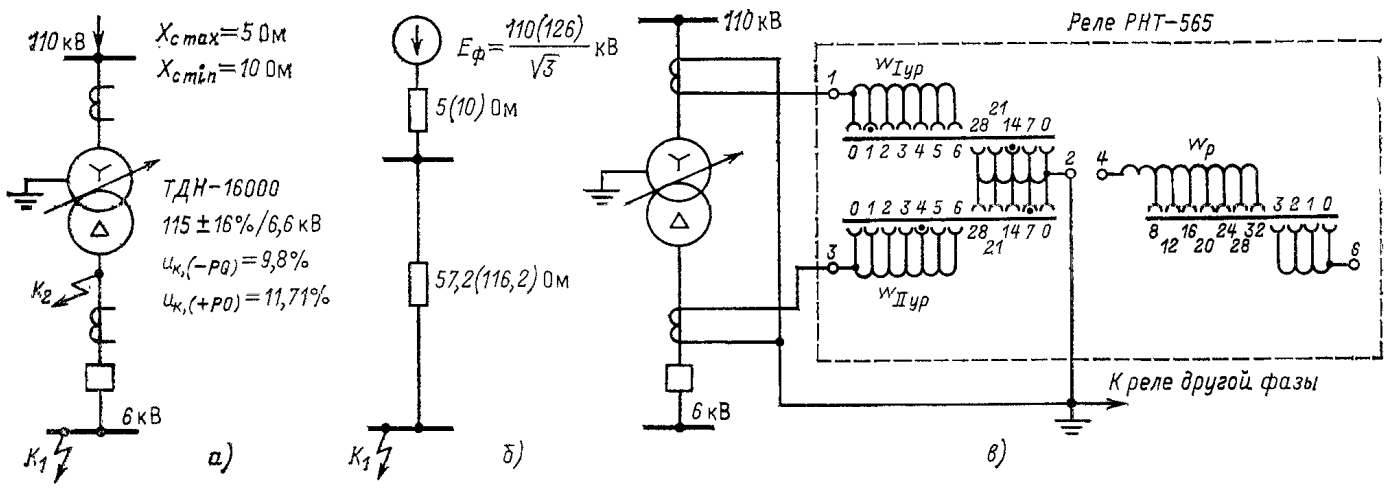


Рис. 2.4. Пример 2.3.2 расчета дифференциальной токовой защиты двухобмоточного трансформатора:

а — исходная схема; *б* — схема замещения прямой (обратной) последовательности; *в* — схема включения реле типа РНТ-565 в дифференциальной токовой защите двухобмоточного трансформатора.

Примечание. См. примечание к рис. 2.3

Таблица 2.4

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение для стороны	
		110 кВ	6 кВ
Первичный ток на сторонах защищаемого трансформатора, соответствующий его номинальной мощности и оптимальному напряжению, А	$I_{\text{ном, опт}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{опт}}}$	$\frac{16\,000}{\sqrt{3}\,104,4} = 88,5$	$\frac{16\,000}{\sqrt{3}\,6,6} = 1400$
Схема соединения трансформаторов тока	—	Д	У
Коэффициент трансформации трансформаторов тока	K_I	300/5	2000/5
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора, А	$I_{\text{ном, в}} = \frac{I_{\text{ном, опт}} k_{\text{сх}}}{K_I}$	$\frac{88,5\sqrt{3}}{300/5} = 2,56$	$\frac{1400}{2000/5} = 3,5$

Таблица 2.5

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
Ток срабатывания реле на основной стороне, А	$I_{\text{с. р, осн}} = \frac{I_{\text{с. з}} \frac{U_{\text{опт}}}{U_{\text{хв}}}}{K_{I6}}$	$\frac{224,6 \cdot 104,4/6,6}{2000/5} = 8,9$
Число витков обмотки НТТ реле для основной стороны:		
расчетное	По (2.18) $w_{\text{осн, расч}} = \frac{F_{\text{с. р}}}{I_{\text{с. р. осн}}}$	$\frac{100}{8,9} = 11,24$
предварительно принятое	$w_{\text{осн}} = w_{\text{II ур}}$	11
Число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны:		
расчетное	По (2.20) $w_{\text{Iрасч}} = w_{\text{осн}} \frac{I_{\text{осн, в}}}{I_{\text{Iв}}}$	$11\ \frac{3,5}{2,56} = 15,1$
предварительно принятое	$w_{\text{I}} = w_{\text{I ур}}$	15
Составляющая первичного тока небаланса, обусловленная округлением расчетного числа витков неосновной стороны для расчетного случая повреждения,. А	По (2.6) $I'''_{\text{нб.расч}} = \left\| \frac{w_{\text{Iрасч}} - w_{\text{I}}}{w_{\text{Iрасч}}} I_{\text{к } max} \right\|$	$\left\| \frac{15,1 - 15}{15,1} 1022 \right\| = 6,6$
Первичный расчетный ток небаланса с учетом составляющей $I'''_{\text{нб.расч}}$, А	По (2.3) $I_{\text{нб, расч}} = \lvert I'_{\text{нб, расч}} \rvert + \lvert I''_{\text{нб, расч}} \rvert + \lvert I'''_{\text{нб, расч}} \rvert$	$172,8 + 6,6 = 179,4$
Ток срабатывания защиты (приведенный к стороне высшего напряжения), А	$I_{\text{с. з}} \geqslant \frac{F_{\text{с. р}}}{w_{\text{I ур}}} \frac{K_{I110}}{k_{\text{сх}}}$	$\frac{100}{15} \cdot \frac{300/5}{\sqrt{3}} = 231,2$
Коэффициент отстройки защиты (окончательное значение)	$k_{\text{отс}} = \frac{I_{\text{с. з}}}{I_{\text{нб, расч}}}$	$\frac{231,2}{179,4} = 1,29 \approx 1,3$
Окончательно принятое число витков обмотки НТТ реле для установки на основной и неосновной сторонах	$w_{\text{I}} = w_{\text{I ур}}$	15
	$w_{\text{осн}} = w_{\text{II ур}}$	11

2.3.2.2.6. Производится предварительная проверка чувствительности с целью выявления в первом приближении возможности выполнения защиты с реле типа РНТ-565 в соответствии с п. 2.2.5.

В рассматриваемом примере расчетным по чувствительности является КЗ между двумя фазами на стороне 6 кВ (в точке K_2, рис. 2.4,*а*) в минимальном режиме работы системы и при максимальном сопротивлении защищаемого трансформатора.

Коэффициент чувствительности, определяемый по выражению (2.26), равен

$$k_{ч} = \frac{502\sqrt{3}}{224{,}6\sqrt{3}} = 2{,}24 > 2{,}0,$$

т. е. удовлетворяет требованиям ПУЭ, поэтому расчет защиты, выполненной с реле типа РНТ-565, следует продолжить.

2.3.2.2.7. Выбор витков рабочих обмоток НТТ реле для основной стороны (6 кВ) производится в соответствии с п. 2.2.6, исходя из оптимального напряжения на регулируемой стороне. Первичный ток на стороне высшего напряжения при оптимальном напряжении $U_{опт}$

$$I_{ном.\,опт} = \frac{16\,000}{\sqrt{3}\cdot 104{,}4} = 88{,}5\ \text{А}.$$

Вторичный ток в плече защиты на стороне 110 кВ

$$I_{ном.\,опт.\,в} = \frac{88{,}5\sqrt{3}}{300/5} = 2{,}56\ \text{А}.$$

Расчеты показали, что в рассматриваемом примере коэффициент трансформации трансформаторов тока стороны 110 кВ целесообразно принять равным $K_{I110} = 300/5$, а не 150/5 (как в табл. 2.2). Указанное приводит к увеличению чувствительности защиты (за счет уменьшения составляющей тока небаланса $I'''_{нб,расч}$ в этом случае).

Окончательно выбранные коэффициенты трансформации и расчет номинальных токов приведены в табл. 2.4.

2.3.2.2.8. Определяется число витков $w_{I\,расч}$ обмотки НТТ реле для неосновной стороны 110 кВ защищаемого трансформатора по (2.20) в соответствии с п. 2.2.7. Расчеты по пп. 2.3.2.2.7 и 2.3.2.2.8 сведены в табл. 2.5.

Схема включения реле для рассматриваемого примера приведена на рис. 2.4,*в*.

2.3.2.2.9. Определяется значение коэффициента чувствительности для тока срабатывания защиты, соответствующего окончательно принятому, в режиме, при котором производилась предварительная проверка чувствительности, по (2.26)

$$k_{ч} = \frac{502\sqrt{3}}{231{,}2\sqrt{3}} = 2{,}17 > 2{,}0.$$

Рассмотренная защита имеет достаточную чувствительность и может быть использована для защиты двухобмоточного трансформатора по рис. 2.4,*а*.

3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ, ВЫПОЛНЕННАЯ С РЕЛЕ СЕРИИ ДЗТ-11

3.1. УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ

3.1.1. Ниже даны основные указания по расчету дифференциальной токовой защиты, выполненной с реле серии ДЗТ-11 (типов ДЗТ-11, ДЗТ-11/2, ДЗТ-11/3 и ДЗТ-11/4), применительно к двух- и трехобмоточным трансформаторам, а также автотрансформаторам, находящимся в эксплуатации.

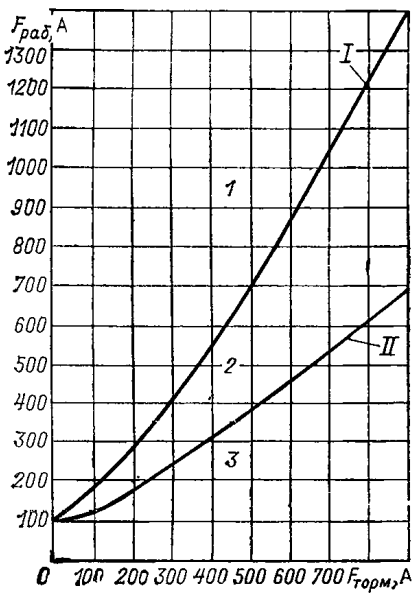


Рис. 3.1. Тормозные характеристики реле типов ДЗТ-11, ДЗТ-11/2, ДЗТ-11/3 и ДЗТ-11/4:

1 — зона срабатывания; *2* — зона срабатывания или торможения в зависимости от угла между тормозным и рабочим токами; *3* — зона торможения; *I*—характеристика срабатывания, соответствующая максимальному торможению; *II* — то же минимальному торможению

Реле серии ДЗТ-11 характеризуется наличием одной тормозной обмотки в НТТ реле, что дает возможность обеспечить торможение от тока в одном комплекте (или от суммарного тока в одной группе комплектов) трансформаторов тока. Характеристика срабатывания реле при наличии торможения $F_{раб} = f(F_{торм})$ неоднозначна и зависит от угла между рабочим $I_{раб,р}$ и тормозным $I_{торм,р}$ (см. п. 3.1.6) токами в НТТ реле.

На рис. 3.1 приведены заводские характеристики реле для таких углов между рабочим и тормозным токами, при которых обеспечивается максимальное (кривая *I*) и минимальное (кривая *II*) торможение.

Использование тормозной обмотки дает возможность не отстраивать минимальный ток срабатывания защиты $I_{с,з\,min}$ по (2.1) от токов небаланса при таких внешних повреждениях, когда имеется торможение, поскольку недействие защиты в этих случаях обеспечивается торможением. Указанное обусловливает бо́льшую чувствительность защиты.

Схема внутренних соединений реле и примеры принципиальных схем его включения в защитах двух- и трехобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов) показаны на рис. 3.2.

3.1.2. Недействие защиты при таких внешних КЗ, когда торможение отсутствует (по тормозной обмотке НТТ реле ток не проходит, например, при отключении стороны, на которой она установлена), а также при включении ненагруженного трансформатора (автотрансформатора) под напряжение, обеспечивается выбором минимального тока срабатывания защиты $I_{с,з\,min}$ по тем же условиям, что и тока срабатывания защиты $I_{с,з}$, выполненной с реле серии РНТ-560 (см. п. 2.1.2):

отстройки от расчетного максимального первичного тока небаланса $I_{нб,расч}$ при переходном режиме внешних КЗ, определяемого с учетом влияния НТТ реле, т. е. по (2.1), в котором $k_{отс}$ принимается равным 1,5;

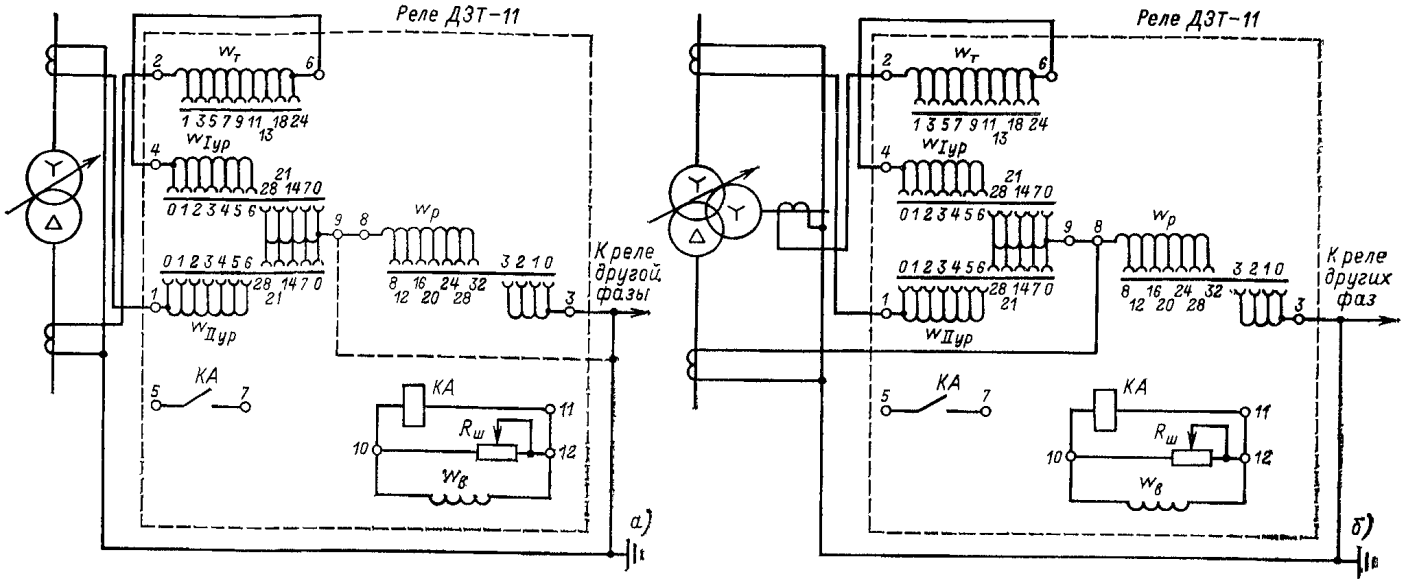


Рис. 3.2. Примеры принципиальных схем включения реле типа ДЗТ-11:
а — в защите двухобмоточного трансформатора; *б* — то же трехобмоточного

отстройки от броска намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора (автотрансформатора) под напряжение, т. е. по (2.2), в котором коэффициент k в грубо ориентировочных расчетах принимается равным 1,2—1,5 и в случае необходимости может быть уточнен в сторону уменьшения (см. п. 3.1.3).

Увеличенные значения коэффициентов в (2.1) и (2.2) по сравнению с расчетом защиты, выполненной с реле серии РНТ-560, принимаются в связи с тем, что реле серии ДЗТ-11 имеет худшие параметры в отношении отстройки от неустановившихся токов из-за отсутствия в НТТ реле короткозамкнутой обмотки.

Расчетный ток небаланса $I_{нб,расч}$ для выбора тока срабатывания защиты $I_{с,зmin}$ определяется по (2.3)—(2.6) либо при необходимости уточнения его значения в сторону уменьшения по методике, изложенной в п. 2.1.4.

3.1.3. Первичный минимальный ток срабатывания защиты по условию отстройки от броска намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора (автотрансформатора) под напряжение по (2.2) может быть снижен за счет уточнения значения коэффициента k в соответствии с конкретными условиями (см. приложение П1).

Уточненное значение коэффициента k определяется по одному из следующих выражений в зависимости от номинального вторичного тока трансформаторов тока, установленных на стороне включаемой обмотки трансформатора (автотрансформатора):

при номинальном вторичном токе 5 А

$$k=2{,}1—3{,}7\overset{*}{X}_{к}; \qquad (3.1)$$

при номинальном вторичном токе 1 А

$$k=1{,}45—1{,}6\overset{*}{X}_{к}, \qquad (3.2)$$

где $\overset{*}{X}_{к}$ — относительное индуктивное сопротивление контура включения трансформатора (автотрансформатора), определяемое по (2.16).

Значения величин, входящих в (2.16), определяются для включаемого трансформатора (автотрансформатора) в соответствии с рекомендациями п. 2.1.5. В частности, значения относительных индуктивных сопротивлений $\overset{*}{X}_{в}^{(1)}$ включаемой обмотки трансформатора (автотрансформатора) при включении одной фазы и полном насыщении стержней и ярм магнитопровода трансформатора (автотрансформатора) приведены в табл. П1.1 и П1.2, а также могут быть подсчитаны по упрощенным выражениям табл. П1.3.

Для автотрансформаторов с высшим напряжением 500 кВ, для которых отсутствуют значения $\overset{*}{X}_{в}^{(1)}$ в табл. П1.1 и упрощенные расчетные выражения для определения $\overset{*}{X}_{в}^{(1)}$ в табл. П1.3 могут использоваться рекомендации, приведенные в приложении П1.

При расчете по (3.1) (номинальный вторичный ток 5 А) значения коэффициента k должны находиться в пределах $1{,}5>k\geqslant 1$, а при расчете по (3.2) (номинальный вторичный ток 1 А) — в пределах $1{,}5>k\geqslant 0{,}8$ (см. приложение П1).

3.1.4. Число витков рабочих обмоток НТТ реле ($w_{I\,ур}$, $w_{II\,ур}$ и $w_{р}$), соответствующее минимальному току срабатывания защиты $I_{с,зmin}$, определяется так же, как и в расчете защиты, выполненной с реле серии РНТ-560, т. е. по (2.18) для основной стороны и по (2.20) и (2.21) — для неосновных сторон.

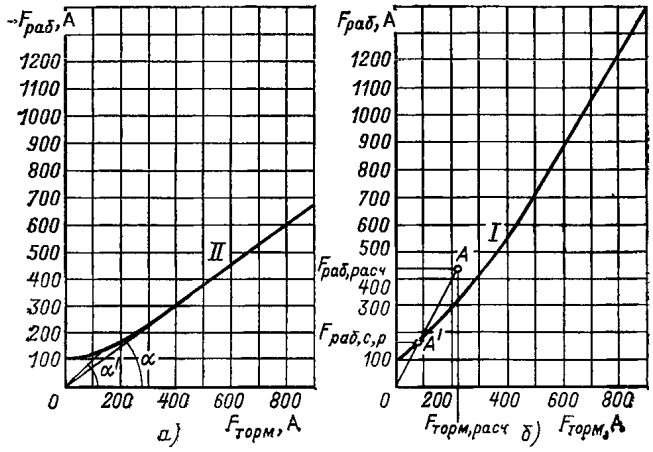
3.1.5. Выбор стороны, к трансформаторам тока которой целесообразно присоединить тормозную обмотку НТТ, реле, должен производиться таким образом, чтобы обеспечить возможно бо́льшую чувствительность защиты. Для этого необходимо иметь:

меньшее значение минимального тока срабатывания защиты $I_{с,зmin}$;

меньшее торможение при расчетном по чувствительности металлическом КЗ в защищаемой зоне (если это не противоречит первому условию).

Для ряда случаев целесообразная схема присоединения тормозной обмотки может быть выявлена на основании непосредственного рассмотрения схемы электрических соединений. Так, например, в следующих конкретных случаях тормозную обмотку, как правило, целесообразно присоединять:

на двухобмоточных трансформаторах — к трансформаторам тока, установленным на стороне низшего напряжения, а на двухобмоточных трансформаторах с расщепленной обмоткой — на сумму токов трансформаторов тока, установленных в цепи каждой из расщепленных обмоток. Целесообразность такого присоединения тормозной обмотки объясняется тем, что при этом минимальный ток срабатывания защиты $I_{с,зmin}$ определяется по (2.2), а при КЗ в защищаемой зоне торможение от тока системы отсутствует;



Фис. 3.3. Расчет защиты, выполненной с реле типа ДЗТ-11:

а — спрямление характеристики срабатывания реле, соответствующей минимальному торможению; *б* — определение рабочей МДС срабатывания реле $F_{раб.с.р}$ по характеристике, соответствующей максимальному торможению

на трехобмоточных трансформаторах — к трансформаторам тока, ограничивающим защищаемую зону с той стороны, при внешнем КЗ на которой ток небаланса имеет большее значение, если при этом минимальный ток срабатывания защиты $I_{с.з min}$ определяется по (2.2); в противном случае, т. е. если определяющим остается (2.1) — на сумму токов трансформаторов тока, установленных на сторонах среднего и низшего напряжений, если при этом не следует считаться со случаем внешнего КЗ на стороне низшего напряжения в режиме отключенного выключателя на стороне высшего напряжения или если отстройка от токов небаланса при указанном КЗ не является определяющей при рассматриваемом включении тормозной обмотки;

на автотрансформаторах — к трансформаторам тока, установленным на стороне среднего напряжения, где, как правило, предусмотрено регулирование напряжения под нагрузкой.

В тех случаях, когда присоединение тормозной обмотки на сумму токов трансформаторов тока, установленных на стороне среднего и низшего напряжений, приводит к большому загрублению, или невыполнимо из-за недостаточного числа витков тормозной обмотки, целесообразно присоединять к трансформаторам тока, установленным на сторонах среднего и низшего напряжений, разное количество витков тормозной обмотки. Необходимое при этом дополнительное присоединение к расчетному витку тормозной обмотки реле от второго трансформатора тока конструктивно может быть выполнено аналогично рассмотреннюму в п. 6 приложения ПЗ.

3.1.6. Недействие защиты при таких внешних КЗ, когда имеет место торможение (по тормозной обмотке НТТ реле проходит ток), обеспечивается с учетом характеристики срабатывания реле, соответствующей минимальному торможению (кривая *II* на рис. 3.1).

Очевидно, что несрабатывание защиты будет обеспечено, если все точки, соответствующие возможным при внешних КЗ отношениям рабочей и тормозной МДС в плоскости $F_{раб}$, $F_{торм}$, будут лежать надежно ниже этой характеристики.

В случаях, когда максимальная рабочая МДС $F_{раб max} \geqslant 200$ А, для упрощения расчета характеристика, соответствующая минимальному торможению, заменяется касательной к этой характеристике, проведенной из начала координат (рис. 3.3,*а*), а в расчет вводится тангенс угла α наклона касательной к оси абсцисс $\operatorname{tg}\alpha$.

При этом несрабатывание защиты (с запасом) будет обеспечено, если удовлетворяется неравенство

$$k_{отс}\frac{I_{раб.р}w_{раб}}{I_{торм.р}w_{торм}} \leqslant \operatorname{tg}\alpha, \qquad (3.3)$$

где $I_{раб.р}$ и $I_{торм.р}$ — рабочий и тормозной токи, подводимые к реле; $w_{торм}$ — используемое число витков тормозной обмотки НТТ реле; $w_{раб}$ — число витков рабочей обмотки НТТ реле на стороне, к которой присоединена тормозная обмотка; при этом учитывается принятое число витков, если рассматриваемая сторона является основной и расчетное число витков, если рассматриваемая сторона является неосновной; $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, учитывающий ошибку реле и необходимый запас; может быть принят равным 1,5.

Из (3.3), учитывая, что отношение токов в реле $I_{раб.р}/I_{торм.р}$ равно отношению соответствующих первичных токов $I_{раб}/I_{торм}$, а также что при внешних КЗ рабочий ток $I_{раб}$ равен току небаланса $I_{нб.расч}$, для определения необходимого числа витков тормозной обмотки получаем следующее выражение:

$$w_{торм} \geqslant k_{отс}\frac{I_{нб.расч}w_{раб}}{I_{торм}\operatorname{tg}\alpha}, \qquad (3.4)$$

где $I_{нб.расч}$ и $I_{торм}$ — соответственно первичный ток небаланса, определенный по (2.3), и первичный тормозной ток при КЗ, расчетном для выбора числа витков тормозной обмотки НТТ реле.

Остальные обозначения те же, что в (3.3).

Тангенс угла α наклона касательной к оси абсцисс при $F_{раб max} \geqslant 200$ А, исходя из заводской характеристики срабатывания, может приниматься равным примерно 0,75 (рис. 3.3,*а*).

В случае, когда максимальная рабочая МДС $F_{раб max} < 200$ А, спрямление характеристики срабатывания производится для расчетного участка. При этом кривая характеристики срабатывания заменяется прямой, которая соединяет начало координат с точкой, ограничивающей расчетный участок характеристики и соответствующей максимально возможной МДС $F_{раб max}$ при внешнем КЗ на рассматриваемой стороне, определяемой по выражению

$$F_{раб max} = k_{отс}I_{нб.расч.в}w_{раб}, \qquad (3.5)$$

где $I_{нб.расч.в}$ — расчетный максимальный вторичный ток небаланса на стороне, к которой присоединена тормозная обмотка, при внешнем КЗ на рассматриваемой стороне, определенный с учетом составляющей тока небаланса $I'''_{нб.расч}$.

Остальные обозначения те же, что в (3.3).

При спрямлении характеристики на расчетном участке в расчет необходимого числа витков тормозной обмотки по (3.4) вводится тангенс угла α′ (рис. 3.3,*а*) наклона к оси абсцисс спрямляющей прямой, проведенной из точки, ограничивающей расчетный участок.

Расчетным для определения необходимого числа витков тормозной обмотки по (3.4), т. е. обусловливающим максимальное число необходимых витков, является металлическое КЗ между тремя фазами в таком режиме работы, когда будет наибольшим отношение

$$\Delta I = \frac{I_{нб.расч}}{I_{торм}}. \qquad (3.6)$$

При этом должны рассматриваться КЗ на тех сторонах, от повреждений на которых отстройка производится с помощью торможения. Для трехобмоточного трансформатора с присоединением тормозной обмотки на сумму токов трансформаторов тока, установленных на сторонах среднего и низшего напряжений при параллельной работе трансформаторов на стороне среднего

напряжения, должен рассматриваться случай КЗ на стороне низшего напряжения. В (3.4) должно учитываться число витков рабочей обмотки НТТ реле $w_{раб}$ для стороны низшего напряжения, где рассматривается КЗ и протекает больший ток торможений, а под током $I_{торм}$ должен пониматься результирующий ток в тормозной обмотке реле, приведенный к расчетной стороне, например стороне высшего напряжения, и определяемый по выражению

$$I_{торм} = \left| I_{торм,\ НН} - I_{торм,\ СН} \frac{I_{СН,\ в}}{I_{НН,\ в}} \right|, \quad (3.7)$$

где $I_{торм,НН}$, $I_{торм,СН}$ — первичный тормозной ток соответственно на сторонах низшего и среднего напряжений при рассматриваемом внешнем КЗ на стороне низшего напряжения, приведенный к расчетной стороне; $I_{СН,в}$, $I_{НН,в}$ — вторичные токи в плечах защиты на сторонах среднего и низшего напряжений, соответствующие номинальной мощности трансформатора (проходной — автотрансформатора).

В случае, когда в защите трехобмоточного трансформатора к трансформаторам тока, установленным на сторонах среднего и низшего напряжений, присоединяется разное число витков тормозной обмотки, т. е. выполняется дополнительное присоединение к расчетному числу витков последней (п. 3.1.5), необходимое число витков тормозной обмотки следует рассчитывать, исходя из токов внешнего КЗ на рассматриваемой стороне:

для стороны среднего напряжения — по (3.4);

для стороны низшего напряжения — по выражению, составленному по аналогии с (3.4) с учетом (3.7):

$$w_{торм,\ НН} \geqslant k_{отс} \frac{I_{нб,\ расч} w_{раб,\ НН}}{I_{торм,\ НН}\ tg\alpha} + \\ + \frac{I_{торм,\ СН}}{I_{торм,\ НН}} \frac{I_{СН,\ в}}{I_{НН,\ в}} w_{торм,\ СН}, \quad (3.8)$$

где все обозначения те же, что и в (3.4) и (3.7).

3.1.7. Чувствительность защиты при металлических КЗ в защищаемой зоне в таких режимах, когда торможение отсутствует, характеризуется коэффициентом чувствительности, определяемым по (2.22) или (2.26). Расчетные режимы и виды повреждения, а также минимально допустимое значение коэффициента чувствительности аналогичны таковым для защиты, выполненной с реле серии РНТ-560.

3.1.8. Чувствительность защиты при металлических КЗ в защищаемой зоне в таких режимах, когда имеется торможение (по тормозной обмотке НТТ реле протекает ток), определяется по характеристике срабатывания реле, соответствующей максимальному торможению (кривая *1* на рис. 3.1), и оценивается коэффициентом чувствительности $k_{ч,торм}$, вычисляемым по выражению:

$$k_{ч,\ торм} = \frac{F_{раб}}{F_{раб,\ с,\ р}}, \quad (3.9)$$

где $F_{раб}$ — рабочая МДС НТТ реле при рассматриваемом металлическом КЗ; $F_{раб,с,р}$ — рабочая МДС срабатывания реле в условиях, когда защита находится на грани срабатывания при рассматриваемом КЗ, но не металлическом, а через переходное сопротивление.

Рабочая МДС НТТ реле $F_{раб}$ определяется по выражению

$$F_{раб} = \sum_{n=1}^{p} I_{раб,\ рn} w_{рабn}, \quad (3.10)$$

где $w_{рабn}$ — число витков рабочей (дифференциальной и уравнительной) обмотки НТТ реле, используемое на стороне n; $I_{раб,рn}$ — ток, подводимый к рабочей обмотке НТТ реле с числом витков $w_{рабn}$ с учетом его знака при рассматриваемом металлическом КЗ.

При одностороннем питании, а также для грубо ориентировочных расчетов при многостороннем питании рабочая МДС реле $F_{раб}$ может определяться по выражению

$$F_{раб} = I_{раб,р,полн} w_{раб,пит}, \quad (3.11)$$

где $I_{раб,р,полн}$ — ток при рассматриваемом металлическом КЗ в рабочей обмотке НТТ реле (при многостороннем питании в предположении, что он полностью проходит по стороне основного питания); $w_{раб,пит}$ — число витков рабочей обмотки НТТ реле, используемых на питающей стороне (при многостороннем питании — на стороне основного питания).

Рабочая МДС срабатывания реле $F_{раб,с,р}$, входящая в (3.9), определяется по характеристике срабатывания реле, соответствующей максимальному торможению (кривая *1* на рис. 3.1), следующим образом:

определяется тормозная МДС НТТ реле $F_{торм}$ при рассматриваемом металлическом КЗ по выражению

$$F_{торм} = I_{торм,р} w_{торм}, \quad (3.12)$$

где $I_{торм,р}$ и $w_{торм}$ — то же, что в (3.3);

на плоскость $F_{раб}$, $F_{торм}$ наносится точка, соответствующая $F_{раб}$, определенной по (3.10) или (3.11), и $F_{торм}$, определенной по (3.12), т. е. соответствующая рассматриваемому случаю металлического КЗ (точка *A* на рис. 3.3,*б*);

проводится прямая, соединяющая эту точку с началом координат (прямая *OA* на рис. 3.3,*б*). Эта прямая явится геометрическим местом точек, соответствующих рассматриваемому случаю КЗ через различные переходные сопротивления, поскольку при появлении и увеличении переходного сопротивления в месте КЗ токораспределение, а следовательно, и соотношение между рабочими и тормозными токами и МДС не изменяются.

Точка пересечения этой прямой с расчетной по чувствительности характеристикой срабатывания реле, соответствующей максимальному торможению (точка *A'* на рис. 3.3,*б*), будет являться точкой, где защита находится на грани срабатывания, и, следовательно, соответствующая этой точке рабочая МДС будет являться рабочей МДС срабатывания $F_{раб,с,р}$ при рассматриваемом случае КЗ, но через переходное сопротивление.

Расчетным для определения чувствительности является металлическое КЗ на выводах защищаемого трансформатора (автотрансформатора) при работе его на расчетном ответвлении. Расчетными режимами работы подстанции и питающих систем являются реальные режимы, обусловливающие минимальный ток при рассматриваемом виде КЗ. При этом должны учитываться такие режимы работы защищаемого трансформатора (автотрансформатора), при которых возможно бо́льшая доля тока КЗ протекает через тормозную обмотку.

На сторонах, примыкающих к сети с глухозаземленными нейтралями, должны рассматриваться КЗ между фазами и замыкания одной фазы на землю.

В соответствии с ПУЭ (3.2.21) требуется обеспечить наименьший коэффициент чувствительности $k_{ч,торм}$ около 2,0.

Допускается снижение требуемого коэффициента чувствительности до значения около 1,5 в тех же случаях, что и для защиты, выполненной с реле серии РНТ-560 (см. п. 2.1.7).

Следует отметить, что при оценке чувствительности защиты по (3.9) с учетом возможности смещения характеристики срабатывания из-за погрешности реле необходимо также, чтобы точки, соответствующие расчетным случаям КЗ (например, точка *A* на рис. 3.3,*б*), находились от расчетной по чувствительности характеристики срабатывания реле на расстояниях, не меньших, чем 10 % координат точки. Указанное является необходимым условием надежной работы реле.

3.2. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТА

В соответствии с приведенными в п. 3.1 указаниями расчет дифференциальной защиты, выполненной с реле серии ДЗТ-11, производится в следующем порядке.

3.2.1. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого трансформатора (автотрансформатора), соответствующие его номинальной мощности (проходной мощности автотрансформатора).

По этим токам определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты $I_{\text{I в}}$, $I_{\text{II в}}$ и $I_{\text{III в}}$, исходя из коэффициентов трансформации трансформаторов тока K_I (выбираются с учетом параметров используемого оборудования, его перегрузочной способности, требований релейной защиты и схемы соединения трансформаторов тока — при соединении трансформаторов тока в треугольник исходят из первичного тока $I_{\text{ном}}\sqrt{3}$ ввиду целесообразности иметь вторичные токи в плече защиты, не превышающие 5 А) и коэффициентов схемы $k_{\text{сх}}$.

3.2.2. Выбирается сторона, к трансформаторам тока которой наиболее целесообразно присоединить тормозную обмотку НТТ реле в соответствии с рекомендациями п. 3.1.5.

3.2.3. Определяется ориентировочное значение первичного минимального тока срабатывания защиты $I_{\text{с,}3min}$ без учета составляющей тока небаланса $I'''_{\text{нб,расч}}$, исходя из принятого места установки тормозной обмотки. Расчет производится в соответствии с п. 3.1.2.

Для двухобмоточных трансформаторов, а также трехобмоточных трансформаторов с включением тормозной обмотки реле на сумму токов трансформаторов тока, установленных на сторонах среднего и низшего напряжений (а также при подведении этих токов к разным числам витков тормозной обмотки), выбор минимального тока срабатывания защиты $I_{\text{с,}3min}$ производится по условию отстройки от броска намагничивающего тока при включении защищаемого трансформатора под напряжение по (2.2).

3.2.4. Определяются числа витков рабочих обмоток НТТ реле, соответствующие минимальному току срабатывания защиты $I_{\text{с,}3min}$, для основной стороны и для других сторон защищаемого трансформатора (автотрансформатора).

Расчет производится по (2.18), (2.20) и (2.21) в той же последовательности, что и для защиты, выполненной с реле серии РНТ-560 (см. пп. 2.2.6 и 2.2.7). При этом учитывается, что минимальная МДС срабатывания $F_{\text{с,р}min}$ при отсутствии торможения для реле серии ДЗТ-11 также равна 100 А.

В случае необходимости полученные числа витков НТТ реле уточняются за счет учета составляющей тока небаланса $I'''_{\text{нб, расч}}$ аналогично тому, как для реле серии РНТ-560 (п. 2.2.8). При этом в расчет вводится составляющая $I'''_{\text{нб, расч}}$, соответствующая внешнему КЗ при отсутствии торможения, являющемуся расчетным для определения минимального тока срабатывания защиты $I_{\text{с,}3min}$ (см. п. 3.2.3).

3.2.5. Определяется необходимое число витков тормозной обмотки НТТ реле в соответствии с п. 3.1.6. Для этого при внешних КЗ, отстройка от которых производится с помощью торможения, в расчетных режимах работы подстанции и питающих систем определяется первичный тормозной ток $I_{\text{торм}}$ и первичный ток небаланса $I_{\text{нб,расч}}$ по (2.3)—(2.6).

Определяется необходимое число витков тормозной обмотки НТТ реле $w_{\text{торм}}$ по (3.4). При этом исходным являются наибольшее отношение вышеуказанных токов и число витков рабочей обмотки НТТ реле $w_{\text{раб}}$ для стороны, к которой присоединяется тормозная обмотка.

3.2.6. Определяются первичные токи в месте КЗ и коэффициенты чувствительности при металлических КЗ разных видов на выводах защищаемого трансформатора (автотрансформатора) в расчетных по чувствительности режимах работы подстанции и питающих систем для случаев, когда отсутствует торможение. Расчет производится по (2.22) или (2.26) в соответствии с п. 3.1.7 так же, как для защиты с реле серии РНТ-560.

3.2.7. Определяются первичные токи в месте КЗ, соответствующие токи в реле $I_{\text{раб,р}}$ на отдельных сторонах защищаемого трансформатора (автотрансформатора) и ток в тормозной обмотке НТТ реле $I_{\text{торм,р}}$ при металлических КЗ различных видов на выводах защищаемого трансформатора (автотрансформатора) для случаев, когда имеется торможение, в расчетных по чувствительности режимах. Расчетным является минимальный режим работы питающих систем и такой режим работы (например, отключение одной из сторон) защищаемого трансформатора (автотрансформатора), при котором возможно бо́льшая доля тока КЗ протекает через тормозную обмотку.

3.2.8. Определяется рабочая МДС $F_{\text{раб}}$ и тормозная МДС $F_{\text{торм}}$ НТТ реле в рассматриваемых случаях металлических КЗ по (3.10) и по (3.12). При этом исходным являются значения токов в рабочей и тормозной обмотках НТТ, полученные в п. 3.2.7.

3.2.9. Графически определяется рабочая МДС срабатывания реле $F_{\text{раб,ср}}$ в случаях, когда защита в рассмотренных выше расчетных по чувствительности условиях находится на грани срабатывания из-за наличия переходного сопротивления в месте КЗ, исходя из расчетной по чувствительности характеристики срабатывания реле (соответствующей максимальному торможению) и значений рабочей $F_{\text{раб}}$ и тормозной $F_{\text{торм}}$ МДС, полученных в п. 3.2.8.

3.2.10. Определяется значение коэффициента чувствительности $k_{\text{ч,торм}}$ в рассматриваемых случаях повреждения с торможением по (3.9) в соответствии с п. 3.1.8. При этом используются значения рабочей МДС $F_{\text{раб}}$ и рабочей МДС срабатывания реле $F_{\text{раб,с,р}}$, полученные соответственно в пп. 3.2.8 и 3.2.9.

В случаях, когда чувствительность недостаточна, должны быть рассмотрены другие выполнения дифференциальной защиты (см. ниже).

3.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

3.3.1. В настоящем примере дан расчет дифференциальной токовой защиты понижающего трехобмоточного трансформатора 115/38,5/11 кВ мощностью 40 МВ·А. Трансформатор имеет встроенное регулирование напряжения под нагрузкой (РПН) в нейтрали высшего напряжения в пределах ±16 % номинального и переключения (ПБВ) ответвлений обмотки среднего напряжения трансформатора в пределах ±(2×2,5 %) номинального напряжения.

Трансформатор установлен на двухтрансформаторной подстанции; предусматривается питание трансформаторов со стороны ВН и параллельная работа трансформаторов на стороне 110 и 35 кВ. Исходная схема для примера расчета, а также схема замещения прямой (обратной) последовательности приведены на рис. 3.4.

Пример рассчитан в именованных единицах. Сопротивления, приведенные к стороне высшего напряжения, на рис. 3.4,*б* указаны в омах.

Сопротивления защищаемого трансформатора рассчитаны при двух крайних реально возможных положениях регулятора.

3.3.2. Расчет защиты, выполненной с реле типа ДЗТ-11, производится в следующем порядке.

3.3.2.1. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого трансформатора, соответствующие его номинальной мощности. По этим токам определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты, исходя из коэффициентов трансформации трансформа-

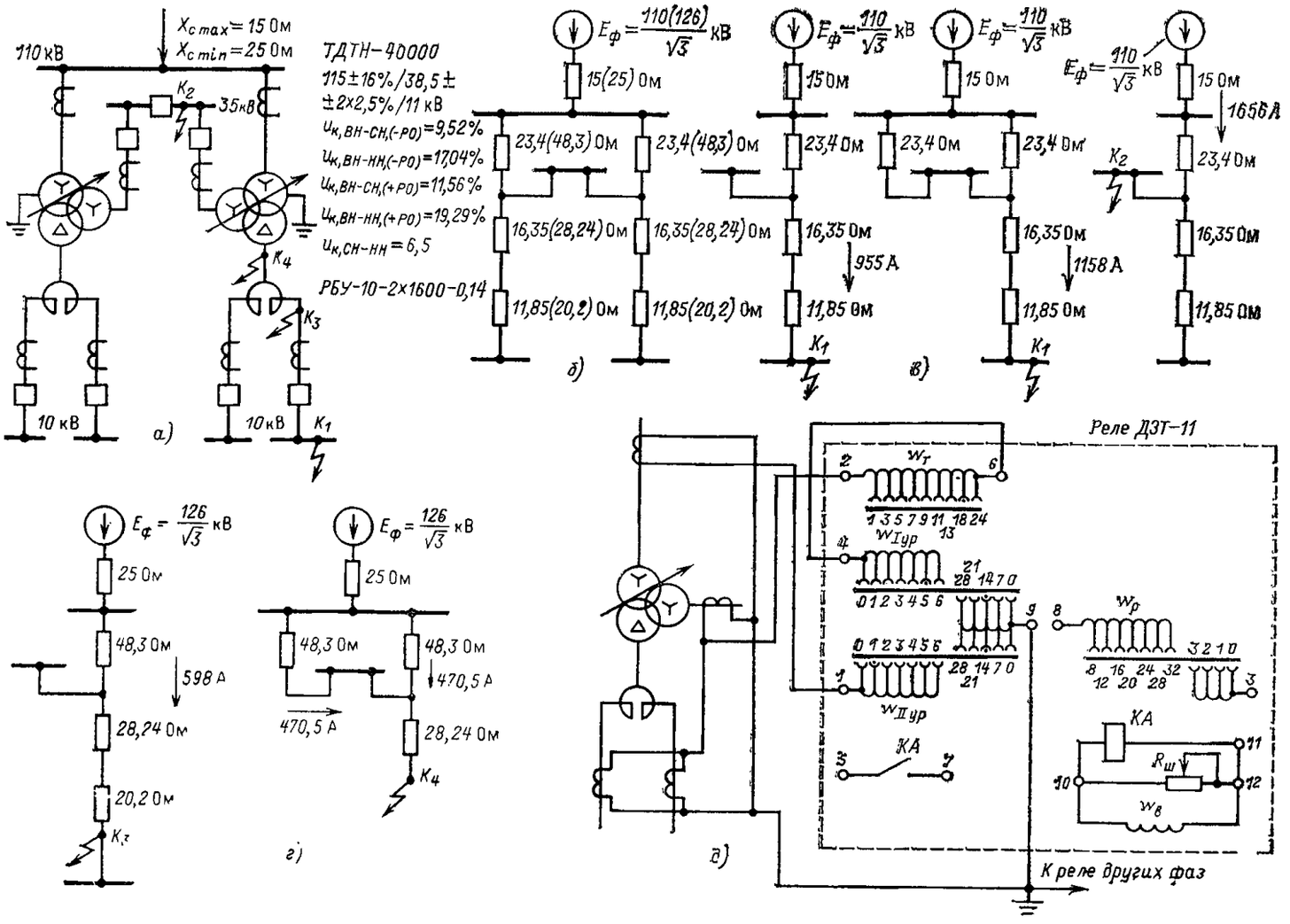


Рис. 3.4. Пример расчета дифференциальной токовой защиты трехобмоточного трансформатора:

а — исходная схема; *б* — схема замещения прямой (обратной) последовательности; *в* — схемы замещения для определения токов в трансформаторе при внешних трехфазных КЗ в точках K_1 и K_2 в максимальном режиме работы системы при раздельной и параллельной работе трансформаторов на подстанции; *г* — то же при трехфазных КЗ в защищаемой зоне в минимальном режиме работы системы; *д* — схема включения реле типа ДЗТ-11 в дифференциальной токовой защите трехобмоточного трансформатора.

Примечание. В схеме замещения на рис. 3.4.*б* напряжения питающей системы и сопротивления трансформатора указаны для крайних, реально возможных отклонений регулятора в сторону уменьшения и увеличения (в скобках) напряжения регулируемой обмотки; сопротивления системы указаны для максимального и минимального (в скобках) режима работы

торов тока K_I и коэффициентов схемы $k_{сх}$ (см. табл. 2.1).

Расчеты выполнены в соответствии с п. 3.2.1 и сведены в табл. 3.1.

3.3.2.2. Выбирается сторона, к трансформаторам тока которой целесообразно присоединить тормозную обмотку реле.

В соответствии с рекомендациями п. 3.1.5 тормозную обмотку целесообразно включить на сумму токов трансформаторов тока, установленных на сторонах среднего и низшего напряжений, так как при подключении тормозной обмотки только к трансформаторам тока, установленным на одной из сторон (среднего или низшего напряжения) защищаемого трансформатора, определяющим условием для выбора тока срабатывания защиты остается отстройка от внешнего КЗ.

Минимальный ток срабатывания защиты определяется по условию отстройки от броска намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора под напряжение в соответствии с п. 3.2.3

$$I_{с,з\,min}=1{,}5\cdot 201=301{,}5\text{ А}.$$

3.3.2.3. Определяются числа витков рабочей обмотки НТТ реле для основной стороны 110 кВ (стороны с наибольшим вторичным током в плече защиты) и для других сторон — 35 и 10 кВ, исходя из значения минимального тока срабатывания защиты ($I_{с,з\,min}$=301,5 А), полученного в п. 3.3.2.2.

Расчеты производятся в соответствии с п. 3.2.4 по (2.18), (2.20) и (2.21) и сведены в табл. 3.2.

Принимаются к использованию следующие числа витков: $w_{II\,ур}$=15 витков, что соответствует минимальному току срабатывания защиты $I_{с,з\,min}=\dfrac{100}{15}\dfrac{400/5}{\sqrt{3}}=$ = 308 А, и $w_{I\,ур}$=19 витков.

3.3.2.4. Выбирается необходимое число витков тормозной обмотки НТТ реле в соответствии с п. 3.2.5. Для этого рассматриваются внешние КЗ между тремя фазами в максимальном режиме работы системы. При включении тормозной обмотки на сумму токов трансформаторов тока, установленных на сторонах среднего и низшего напряжений, расчетным является КЗ на стороне НН при параллельной работе трансформаторов. Исходя из полученных значений токов (рис. 3.4,*в*), определяется первичный ток небаланса и необходимое число витков тормозной обмотки. Расчеты сведены в табл. 3.3.

Таблица 3.1

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение для стороны		
		110 кВ	35 кВ	10 кВ
Первичный ток на сторонах защищаемого трансформатора, соответствующий его номинальной мощности, А	$I_{ном}=\frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном,\,ср}}$	$\frac{40\,000}{\sqrt{3}\cdot 115}=201$	$\frac{40\,000}{\sqrt{3}\cdot 38{,}5}=600$	$\frac{40\,000}{\sqrt{3}\cdot 11}=2102$
Схема соединения трансформаторов тока	—	Д	Д	У
Коэффициент трансформации трансформаторов тока	K_I	400/5	1500/5	3000/5
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора, А	$I_{ном,\,в}=\frac{I_{ном}k_{сх}}{K_I}$	$\frac{201\sqrt{3}}{400/5}=4{,}35$	$\frac{600\sqrt{3}}{1500/5}=3{,}46$	$\frac{2102\cdot 1}{3000/5}=3{,}5$

Таблица 3.2

Наименование величины	Обозначение и метод определений	Числовое значение
Ток срабатывания реле на основной стороне, А	$I_{с.\,р.\,осн}=\frac{I_{с.\,з}k_{сх}}{K_{I110}}$	$\frac{301{,}5\sqrt{3}}{400/5}=6{,}52$
Число витков обмотки НТТ реле для основной стороны:		
расчетное	По (2.18) $w_{осн.\,расч}=\frac{F_{с.\,р}}{I_{с.\,р.\,осн}}$	$\frac{100}{6{,}52}=15{,}33$
принятое	$w_{осн}=w_{II\ ур}$	15
Число витков рабочей обмотки НТТ реле для стороны 35 кВ:		
расчетное	По (2.20) $w_{Iрасч}=w_{осн}\frac{I_{осн,\,в}}{I_{Iв}}$	$15\,\frac{4{,}35}{3{,}46}=18{,}86$
принятое	$w_I=w_{I\ ур}$	19
Число витков рабочей обмотки НТТ реле для стороны 10 кВ:		
расчетное	По (2.21) $w_{II\,расч}=w_{осн}\frac{I_{осн,\,в}}{I_{II\,в}}$	$15\,\frac{4{,}35}{3{,}5}=18{,}64$
принятое	$w_{II}=w_{I\ ур}$	19

Принимается ближайшее большее к рассчитанным число витков $w_{торм}$=18 витков. Схема включения реле с указанием числа использованных витков рабочих и тормозной обмоток НТТ реле приведена на рис. 3.4,*д*.

3.3.2.5. Определяется чувствительность защиты при металлических КЗ в защищаемой зоне, когда торможение отсутствует, в соответствии с п. 3.2.6. Рассматривается КЗ между двумя фазами на стороне низшего напряжения трансформатора (в точке K_3 на рис. 3.4,*а*) при раздельной работе трансформаторов в минимальном режиме работы системы.

Первичный ток в защите при рассматриваемом КЗ равен (рис. 3.4,*г*).

$$I^{(2)}_{к\,min}=598\cdot 0{,}87=520\text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности по (2.26)

$$k_ч=\frac{520\sqrt{3}}{308\sqrt{3}}=1{,}69>1{,}5.$$

3.3.2.6. Определяется чувствительность защиты при КЗ в защищаемой зоне, когда имеется торможение, в соответствии с п. 3.2.7. Рассматривается КЗ между двумя фазами на стороне низшего напряжения (в точке K_4 на рис. 3.4,*а*) при параллельной работе трансформаторов в минимальном режиме работы системы.

Первичный ток в защите на сторонах 110 и 35 кВ при рассматриваемом КЗ (рис. 3.4,*г*)

$$I^{(2)}_{кmin110}=I^{(2)}_{кmin35}=470{,}5\cdot 0{,}87=409{,}4\text{ А}.$$

Таблица 3.3

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
Результирующий ток в тормозной обмотке, А	По (3.7) $I_{торм} = I_{торм,\,НН} - I_{торм,\,СН}\frac{I_{СН,\,в}}{I_{НН,\,в}}$	$\left\lvert 1158 - \frac{1158}{2}\frac{3,46}{3,5}\right\rvert = 585,6$
Первичный расчетный ток небаланса с учетом составляющей $I'''_{нб.расч}$, А	По (2.3) — (2.6) $I_{нб,\,расч} = \lvert k_{пер}k_{одн}\varepsilon I_{к\,max}\rvert + \lvert(\Delta U_\alpha k_{ток\,\alpha} + \Delta U_\beta k_{ток\,\beta})\,I_{к\,max}\rvert + \left\lvert\frac{w_{I\,расч} - w_I}{w_{I\,расч}}k_{токI} + \frac{w_{II\,расч} - w_{II}}{w_{II\,расч}}k_{ток\,II}\right\rvert I_{к\,max}$	$1\cdot1\cdot0,1\cdot1158 + (0,16\cdot0,5 + 0,05\cdot0,5)\cdot1158 + \left\lvert\frac{18,86-19}{18,86}\times0,5 - \frac{18,64-19}{18,64}\cdot1\right\rvert 1158 = 255,92$
Число витков тормозной обмотки НТТ реле: расчетное	По (3.4) $w_{торм,\,расч} = k_{отс}\frac{I_{нб,\,расч}w_{раб,\,расч}}{I_{торм}\,tg\,\alpha}$	$\frac{1,5\cdot255,92\cdot18,64}{585,6\cdot0,75} = 16,28$
принятое	$w_{торм} = w_т$	18

Вторичный ток, подводимый к рабочей обмотке НТТ реле на стороне 110 кВ,

$$I_{раб,\,р110} = \frac{409,4\sqrt{3}}{400/5} = 8,85\text{ А}.$$

Вторичный ток, подводимый к рабочей обмотке НТТ реле на стороне 35 кВ и тормозной обмотке,

$$I_{раб,\,р35} = I_{торм,\,р} = \frac{409,4\frac{126}{38,5}\sqrt{3}}{1500/5} = 7,73\text{ А}.$$

В соответствии с п. 3.2.8 определяются рабочая $F_{раб}$ и тормозная $F_{торм}$ МДС НТТ реле по (3.10) и (3.12)

$$F_{раб} = 8,85\cdot15 + 7,73\cdot19 = 279,6\text{ А};$$

$$F_{торм} = 7,73\cdot18 = 139,14\text{ А}.$$

В соответствии с п. 3.2.9 по характеристике срабатывания реле, соответствующей максимальному торможению, графически определяется рабочая МДС срабатывания реле $F_{раб,с,р}$; для рассматриваемых условий $F_{раб}$=279,6 А, $F_{торм}$=139,14 А — по характеристике, соответствующей максимальному торможению, $F_{раб,с,р}$ = =166 А.

В соответствии с п. 3.2.10 по (3.9) определяется коэффициент чувствительности защиты при рассматриваемом КЗ с торможением

$$k_{ч,\,торм} = \frac{279,6}{166} = 1,69 > 1,5.$$

3.3.2.7. Как следует из приведенных расчетов, во всех рассмотренных случаях КЗ в защищаемой зоне как при отсутствии (см. п. 3.3.2.5), так и при наличии (см. п. 3.3.2.6) торможения защита, выполненная с реле серии ДЗТ-11, обеспечивает минимально допустимый по ПУЭ коэффициент чувствительности.

3.4. УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ С ДВУМЯ КОМПЛЕКТАМИ

Дифференциальная токовая защита с двумя комплектами — грубым и чувствительным — применяется в случаях, когда защита с одним комплектом по пп. 3.1—3.3 обеспечивает требуемую чувствительность при КЗ на выводах низшего напряжения трансформатора, но не обеспечивает требуемой чувствительности при КЗ за реактором.

Грубый комплект, действующий без выдержки времени, выполняется в соответствии с рекомендациями, приведенными в п. 3.1—3.3.

Чувствительный комплект выполняется с реле серии ДЗТ-11 (ДЗТ-11/2, ДЗТ-11/3 или ДЗТ-11/4). Принципиальные схемы включения реле в защитах с двумя комплектами двух- и трехобмоточного трансформатора приведены на рис. 3.5.

Первичный минимальный ток срабатывания чувствительного комплекта защиты $I_{с,з\,min}$ должен быть отстроен от броска намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора под напряжение с учетом затухания намагничивающего тока за время действия защиты.

Практически минимальный ток срабатывания чувствительного комплекта защиты $I_{с,з\,min}$ можно определять по условию обеспечения требуемой чувствительности и принимать, исходя из опыта эксплуатации, в пределах $I_{с,з\,min} = (0,75—1,0)I_{ном,т}$, где $I_{ном,т}$ — номинальный ток защищаемого трансформатора, а выдержка времени $t_{с,з} \approx 0,5 \div 1,0$ с.

Для трехобмоточного трансформатора эффективность чувствительного комплекта ограничивается невозможностью последовательного включения уравнительной и дифференциальной обмоток (см. рис. 3.5,*б* и *в*).

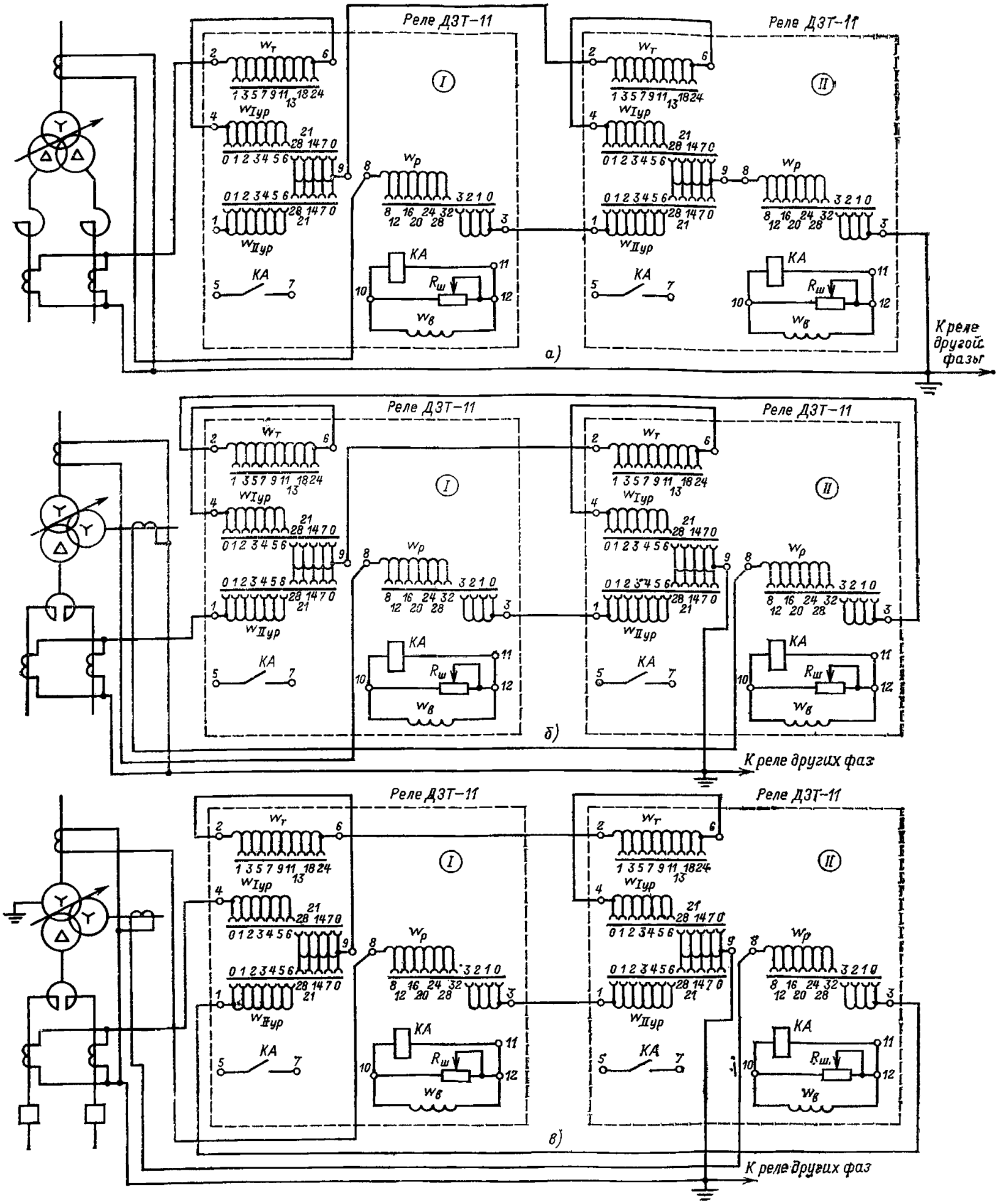


Рис. 3.5. Принципиальные схемы включения реле типа ДЗТ-11 в дифференциальной токовой защите с двумя комплектами:

а — **в защите** двухобмоточного трансформатора; *б* — в защите трехобмоточного трансформатора с включением тормозной обмотки чувствительного комплекта на сумму токов сторон СН и НН; *в* — то же с включением тормозной обмотки каждого комплекта на сумму токов СН и НН; *I* — грубый комплект; *II* — чувствительный комплект

4. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ, ИМЕЮЩАЯ ЗОНЫ РАЗНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ВЫПОЛНЕННАЯ С РЕЛЕ СЕРИИ РНТ-560 ИЛИ ДЗТ-11

Дифференциальная токовая защита с зонами разной чувствительности может применяться для двух- и трехобмоточных трансформаторов, когда защита с одной зоной чувствительности по пп. 3.1—3.3 не обеспечивает требуемой чувствительности, в случаях:

присоединения защищаемого трансформатора к стороне высшего или среднего напряжения через два выключателя (по схеме мостика или четырехугольника) — защита с зоной пониженной чувствительности;

наличия на стороне низшего напряжения токоограничивающего реактора, когда защита с одной зоной чувствительности по пп. 3.1—3.3 обеспечивает требуемую чувствительность при КЗ на выводах низшего напряжения трансформатора, но не обеспечивает требуемой чувствительности при КЗ за реактором, — защита с зоной повышенной чувствительности; требует установки трансформаторов тока между выводами низшего напряжения трансформатора и токоограничивающим реактором.

Рассматриваемое выполнение защиты в некоторых случаях может оказаться целесообразным для обеспечения чувствительности дифференциальной защиты трансформатора и его ошиновок без увеличения количества аппаратуры или ее усложнения, например без выполнения отдельных дифференциальных защит ошиновок, реактора или использования защиты типа ДЗТ-21.

4.1. УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ

4.1.1. Ниже даны основные указания по расчету дифференциальной токовой защиты трансформаторов, имеющей зоны разной чувствительности. При этом рассматриваются только особенности расчета по сравнению с обычной дифференциальной токовой защитой, выполненной с такими же реле (серии РНТ-560 или ДЗТ-11), но имеющей одну зону чувствительности; методика расчета последней подробно изложена в гл. 2 и 3.

Принципы выполнения дифференциальной токовой защиты с зонами разной чувствительности рассмотрены в приложении П3; примеры принципиальных схем с зонами пониженной и повышенной чувствительности приведены на рис. 4.1.

4.1.2. Первичный (минимальный) ток срабатывания защиты выбирается для каждой из зон, исходя из следующего.

4.1.2.1. Для основной зоны первичный ток срабатывания $I_{с,з,осн}$ выбирается так же, как для защиты с одной зоной чувствительности, выполненной с реле тех же типов, соответственно пп. 2.1.2, 2.1.3 и 3.1.2.

Для отстройки от тока небаланса, который определяется током, проходящим через основную зону при внешних КЗ, должны рассматриваться повреждения, являющиеся внешними по отношению ко всей защите в целом (а не по отношению к рассматриваемой зоне), поскольку зоны разной чувствительности охватываются не самостоятельными защитами, а одной, выполненной на общем реле, и потому селективное действие внутри зоны, охватываемой всей защитой в целом, не требуется.

4.1.2.2. Для зоны пониженной чувствительности при выполнении защиты как с реле серии РНТ-560, так и с реле серии ДЗТ-10 первичный ток срабатывания $I_{с,з,пон}$ выбирается по условию отстройки от тока небаланса при внешнем КЗ на стороне высшего напряжения соответственно по пп. 2.1.2.1, 2.1.3, 3.1.2 и по (2.1) и (2.4). Для двух- и трехобмоточных трансформаторов при отсутствии питания со стороны среднего напряжения расчет тока небаланса $I_{нб,расч}$ по (2.4) может производиться с учетом коэффициента однотипности $k_{одн}=0{,}5$.

4.1.2.3. Для зоны повышенной чувствительности первичный ток срабатывания $I_{с,з,пов}$ выбирается по условию обеспечения принимаемой чувствительности к КЗ за реактором, так как при наличии такой зоны защита выполняется с реле серии ДЗТ-10 (см. ниже)

$$I_{с,\,э,\,пов}=\frac{I^{(2)}_{кmin}}{k_ч}, \qquad (4.1)$$

где $I^{(2)}_{кmin}$ — первичное минимальное значение периодической составляющей тока при КЗ между двумя фазами за реактором (в защищаемой зоне) и работе трансформатора на среднем ответвлении; $k_ч$ — принимаемый коэффициент чувствительности.

Коэффициент чувствительности в (4.1) рекомендуется принимать $k_ч \geqslant 2{,}5$, поскольку требуемая в соответствии с ПУЭ чувствительность ($k_ч \geqslant 1{,}5$) должна обеспечиваться при расчетном по чувствительности крайпем реально возможном отклонении регулятора.

Отстройка от тока небаланса при внешних КЗ на стороне низшего напряжения обеспечивается торможением.

Следует отметить, что возможность выполнения зоны повышенной чувствительности при использовании для защиты реле серии РНТ-560 ограничена, так как необходимая в этом случае отстройка тока срабатывания от тока небаланса при внешнем КЗ не позволяет обеспечить требуемую чувствительность.

4.1.3. Число витков рабочих обмоток НТТ реле, соответствующих току срабатывания защиты, определяется для каждой зоны как для отдельной защиты.

Для стороны рассматриваемой зоны, принимаемой за основную, расчет числа витков следует производить исходя из первичного тока срабатывания зоны по (2.18). При этом в качестве основной целесообразно принимать сторону, где установлены трансформаторы тока, ограничивающие не только рассматриваемую зону, но и всю защиту в целом.

Для неосновных сторон рассматриваемой зоны расчет числа витков следует производить, исходя из числа витков, принятого для основной стороны, и отношения вторичных токов в плечах защиты, присоединенных к трансформаторам тока, ограничивающим рассматриваемую зону, по (2.20) и (2.21).

Число витков рабочих обмоток НТТ реле, присоединяемых к трансформаторам тока, разграничивающим зоны разной чувствительности, определяется окончательно как разность витков, полученных в расчетах для смежных границ зон:

$$w_{раб,осн,пон}=w_{раб,осн}-w_{раб,пон}; \qquad (4.2)$$

$$w_{раб,осн,пов}=w_{раб,пов}-w_{раб,осн}, \qquad (4.3)$$

где $w_{раб,осн,пон}$, $w_{раб,осн,пов}$ — число витков рабочих обмоток НТТ реле, присоединяемых к трансформаторам тока, разграничивающим основную зону с зонами соответственно пониженной и повышенной чувствительности; $w_{раб,осн}$, $w_{раб,пон}$, $w_{раб,пов}$ — число витков рабочих обмоток НТТ реле, полученных для рассматриваемой стороны соответственно в расчетах основной зоны и зон пониженной и повышенной чувствительности.

4.1.4. Выбор схемы присоединения тормозной обмотки НТТ реле (при выполнении защиты с реле серии ДЗТ-11) производится следующим образом:

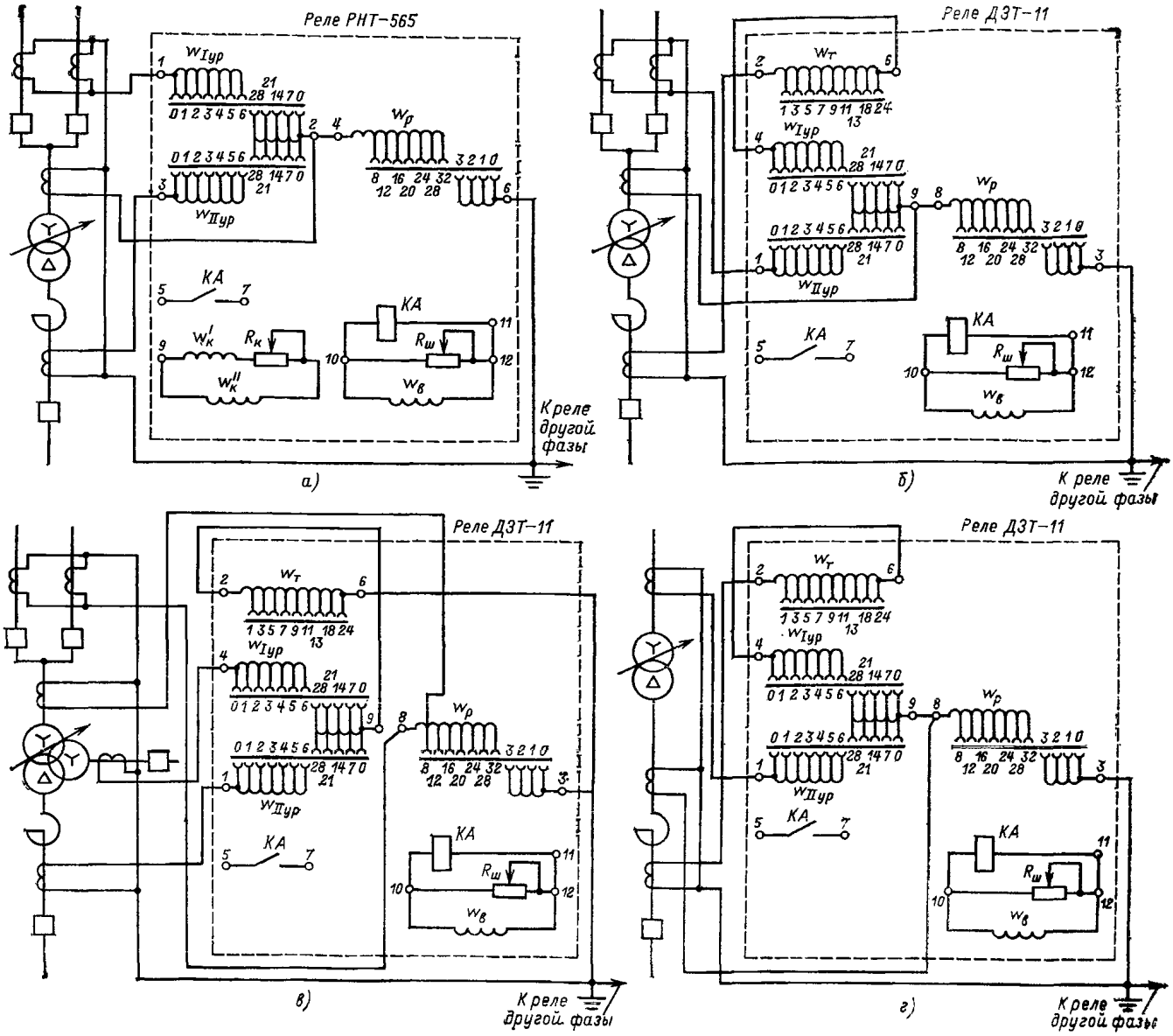


Рис. 4.1. Принципиальные схемы включения реле в дифференциальной токовой защите с двумя зонами разной чувствительности:

а — в защите двухобмоточного трансформатора с реле типа РНТ-565 с зоной пониженной чувствительности на стороне ВН; *б* — в защите двухобмоточного трансформатора с реле типа ДЗТ-11 с зоной пониженной чувствительности на стороне ВН; *в* — в защите трехобмоточного трансформатора с реле типаДЗТ-11 с зоной пониженной чувствительности на стороне ВН; *г* — в защите двухобмоточного трансформатора с реле типа ДЗТ-11 с зоной повышенной чувствительности на стороне НН

на двух- и трехобмоточных трансформаторах при отсутствии зоны повышенной чувствительности по тем же соображениям, что и для обычной дифференциальной защиты с одной зоной чувствительности, — по п. 3.1.5;

на двухобмоточных трансформаторах при наличии зоны повышенной чувствительности тормозная обмотка присоединяется к трансформаторам тока, установленным на стороне низшего напряжения и ограничивающим всю защиту в целом;

на трехобмоточных трансформаторах при наличии зоны повышенной чувствительности тормозная обмотка присоединяется к тем же трансформаторам тока, что и на двухобмоточных трансформаторах, если при этом минимальный ток срабатывания защиты $I_{с.з.min}$ для основной зоны определяется по (2.2), что соблюдается в редких случаях и ограничивает возможность применения зоны повышенной чувствительности в защите трехобмоточных трансформаторов. Если же определяющим остается (2.1), зона повышенной чувствительности выполнима только при отсутствии питания и параллельной работы на стороне среднего напряжения, при этом тормозная обмотка включается на сумму токов трансформаторов тока, установленных на сторонах низшего и среднего напряжений.

4.1.5. Число витков тормозной обмотки НТТ реле, обеспечивающих недействие защиты при внешних КЗ, определяется следующим образом,

на двух- и трехобмоточных трансформаторах при отсутствии зоны повышенной чувствительности по тем же выражениям, что и для обычной дифференциальной защиты с одной зоной чувствительности, — по (3.4), (3.7), (3.8) в соответствии с п. 3.1.6.

на двухобмоточных трансформаторах при наличии

зоны повышенной чувствительности — по (3.4), в котором $w_{раб}$ — количество витков рабочей обмотки НТТ реле, присоединяемых к тем же трансформаторам тока, что и тормозная обмотка, т. е. к трансформаторам тока, установленным на стороне низшего напряжения и ограничивающим всю защиту в целом;

на трехобмоточных трансформаторах при наличии зоны повышенной чувствительности в случае, когда тормозная обмотка присоединяется к трансформаторам тока, установленным на стороне низшего напряжения и ограничивающим всю защиту в целом, — так же, как и на двухобмоточных трансформаторах;

на трехобмоточных трансформаторах при наличии зоны повышенной чувствительности в случае, когда тормозная обмотка включается на сумму токов трансформаторов тока, установленных на стороне низшего напряжения и ограничивающих всю защиту в целом, и трансформаторов тока, установленных на стороне среднего напряжения, — по (3.4), в котором $w_{раб}$ — число витков рабочей обмотки НТТ реле, присоединяемых к трансформаторам тока, установленным на стороне низшего напряжения и ограничивающим всю защиту в целом.

Следует отметить, что в защите с зоной повышенной чувствительности при расчете по (3.4) числа витков тормозной обмотки, присоединяемых к трансформаторам тока, установленным на стороне низшего напряжения, составляющая тока небаланса $I_{нб,расч}$, обусловленная регулированием напряжения защищаемого трансформатора $I''_{нб,расч}$, должна определяться по выражению

$$I''_{нб,\,расч} = (\Delta U_{\alpha} k_{ток\,\alpha} + \Delta U_{\beta} k_{ток\,\beta}) \times \times \frac{w_{раб,\,осн}}{w_{раб,\,пов}} \frac{I_{в,\,ном,\,осн}}{I_{в,\,ном,\,пов}} I_{кmax}, \qquad (4.4)$$

где $I_{в,ном,осн}$ и $I_{в,ном,пов}$ — вторичные номинальные токи в плечах соответственно основной зоны и зоны повышенной чувствительности защиты.

Указанное определяется тем, что эта составляющая $I''_{нб}$ будет создаваться только той частью витков рабочей обмотки, определяющих ток срабатывания в зоне повышенной чувствительности, которая находится на других сторонах защищаемого трансформатора.

4.1.6. Чувствительность при металлических КЗ определяется отдельно для каждой зоны защиты. Коэффициент чувствительности для защиты, выполненной с реле серии РНТ-560, а также для защиты, выполненной с реле серии ДЗТ-11 в режимах, когда торможение отсутствует, определяется по (2.22) или (2.26) в соответствии с пп. 2.1.7 и 3.1.7.

Коэффициент чувствительности для защиты, выполненной с реле серии ДЗТ-11 в режимах, когда имеется торможение, определяется по (3.9) в соответствии с п. 3.1.8.

4.2. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТА

4.2.1. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого трансформатора, соответствующие его номинальной мощности. По этим токам определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты, исходя из коэффициентов трансформации трансформаторов тока K_I (см. п. 2.2.1) и коэффициентов схемы $k_{сх}$ (см. табл. 2.1).

4.2.2. Выбирается схема присоединения тормозной обмотки НТТ реле (при выполнении защиты с реле серии ДЗТ-11) в соответствии с п. 4.1.4.

4.2.3. Определяются первичные (минимальные) токи срабатывания для всех зон защиты.

Для основной зоны первичный ток срабатывания определяется в соответствии с пп. 2.1.2, 2.1.3, 2.2.2—2.2.5, 2.2.8 (при выполнении защиты с реле серии РНТ-560) или 3.1.2, 3.2.3 (при выполнении защиты с реле серии ДЗТ-11) и с учетом указаний п. 4.1.2.1.

Для зоны пониженной чувствительности первичный ток срабатывания определяется по (2.1) и (2.4) в соответствии с пп. 2.1.2.1, 2.1.3 (при выполнении защиты с реле серии РНТ-560) или 3.1.2 (при выполнении защиты с реле серии ДЗТ-11) и с учетом указаний п. 4.1.2.2. Для зоны повышенной чувствительности первичный ток срабатывания определяется в соответствии с указаниями п. 4.1.2.3.

4.2.4. Определяется число витков рабочих обмоток НТТ реле, соответствующее токам срабатывания каждой зоны защиты.

Для основной стороны, выбираемой для каждой зоны в соответствии с п. 4.1.3, расчет производится по (2.18). К установке на рабочих обмотках НТТ реле принимаются ближайшие меньшие по отношению к полученным из выражений витки, которые могут быть установлены на реле. Исключение составляет защита двухобмоточного трансформатора с тремя зонами чувствительности. Поскольку в этой защите трансформаторы тока, ограничивающие основную зону, ни на одной из ее сторон не будут ограничивать всю защиту в целом, то и на основной стороне основной зоны для дальнейшего расчета могут быть оставлены полученные из (2.18) дробные или целые числа витков.

Для других, неосновных сторон каждой зоны расчет числа витков производится по (2.20) и (2.21). При этом следует исходить из принятого для установки на НТТ реле числа витков основной стороны.

4.2.5. Определяются числа витков рабочих обмоток НТТ реле, присоединяемых к трансформаторам тока, разграничивающим зоны разной чувствительности. Расчет производится по (4.2) и (4.3).

К установке на рабочих обмотках НТТ реле принимаются ближайшие (меньшие или бо́льшие) по отношению к полученным из (4.2) и (4.3) целые числа витков $w_{раб,осн,пон}$ и $w_{раб,осн,пов}$ из значений, которые могут быть установлены на реле. Указанное округление и вызовет составляющую тока небаланса $I'''_{нб,\,расч}$, учитываемую ниже в п. 4.2.6.

4.2.6. Определяется необходимое число витков тормозной обмотки НТТ реле по (3.4), (3.7) и (3.8) в соответствии с пп. 4.1.5 и 4.2.2.

Для этого при внешних КЗ, отстройка от которых производится с помощью торможения, в расчетных режимах подстанции и питающих систем определяется первичный тормозной ток $I_{торм}$ и первичный ток небаланса $I_{нб,расч}$ по (2.3)—(2.6).

При этом следует учитывать, что составляющая тока небаланса $I'''_{нб,\,расч}$, определяемая по (2.6), вызывается округлением витков рабочих обмоток НТТ реле, присоединяемых к трансформаторам тока, разграничивающим зоны разной чувствительности, $w_{раб,осп,пон}$ и $w_{раб,осп,пов}$ (см. п. 4.2.5), а также что составляющая тока небаланса $I''_{нб,расч}$ при внешнем КЗ на стороне низшего напряжения и наличии зоны повышенной чувствительности должна определяться по (4.4) из п. 4.1.5, а не по (2.5).

4.2.7. Определяется чувствительность защиты, выполненной с реле серии РНТ-560 или ДЗТ-11 (в последнем случае в режимах, когда торможение отсутствует), при металлических КЗ разных видов в расчетных по чувствительности точках и режимах работы подстанций и питающих систем для всех зон защиты. Расчет производится по (2.22) или (2.26) в соответствии с пп. 2.1.7 и 3.1.7.

4.2.8. Определяется чувствительность защиты, выполненной с реле серии ДЗТ-11 в режимах, когда имеется торможение, при металлических КЗ разных видов в расчетных по чувствительности точках и режимах работы подстанций и питающих систем для всех зон защиты.

Расчет производится так же, как для защиты с одной зоной чувствительности, по (3.9) в соответствии с пп. 3.1.8 и 3.2.7—3.2.10.

4.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА, ИМЕЮЩЕЙ ЗОНУ ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НА СТОРОНЕ НН

4.3.1. В настоящем примере дан расчет дифференциальной токовой защиты двухобмоточного трансформатора 115/6,3 — 6,3 кВ мощностью 40 МВ·А. Трансформатор имеет встроенное регулирование напряжения под нагрузкой в нейтрали высшего напряжения в пределах ±16 % номинального.

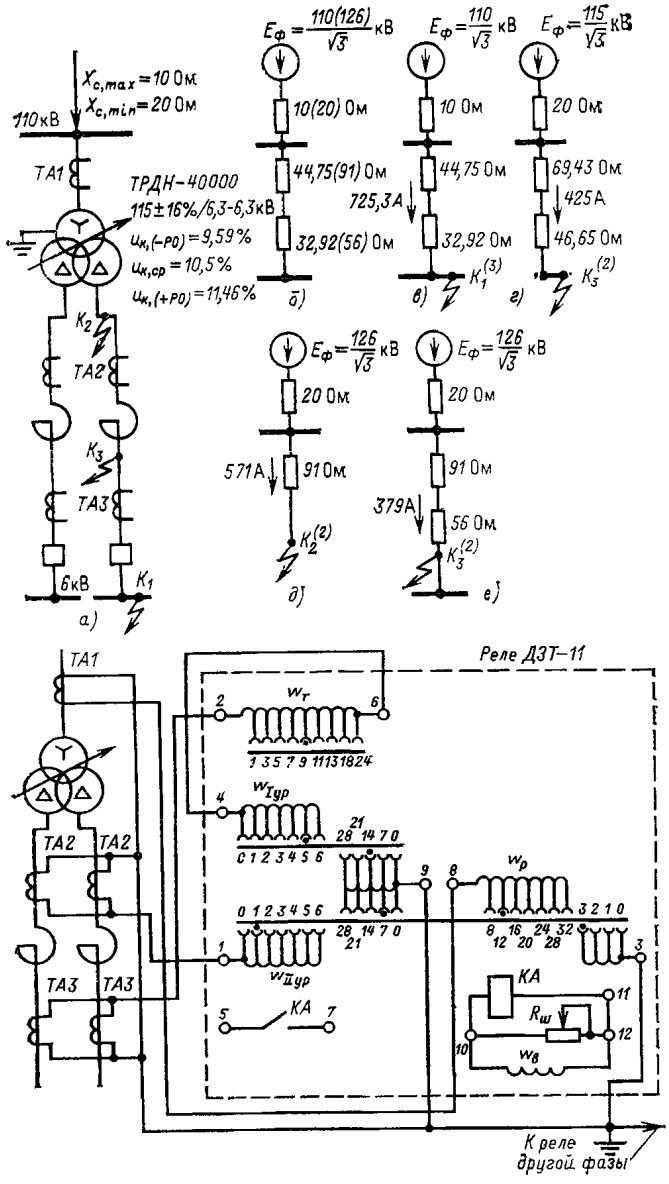


Рис. 4.2. Пример расчета дифференциальной токовой защиты двухобмоточного трансформатора, имеющей зону повышенной чувствительности, в которую входят цепи стороны НН:

а — исходная схема; *б* — схема замещения прямой (обратной) последовательности; *в* — ток в трансформаторе при внешнем КЗ; *г* — расчетный ток в трансформаторе при КЗ в зоне повышенной чувствительности; *д* — ток в трансформаторе при КЗ в основной зоне; *е* — то же в зоне повышенной чувствительности; *ж* — схема включения реле типа ДЗТ-11 в дифференциальной токовой защите двухобмоточного трансформатора с двумя зонами разной чувствительности

Исходная схема для примера расчета, а также схема замещения прямой (обратной) последовательности приведены на рис. 4.2,*а* и *б*. Пример рассчитан в именованных единицах. Сопротивления на рис. 4.2,*б*, приведенные к стороне высшего напряжения, указаны в омах.

Сопротивления защищаемого трансформатора с устройством регулирования напряжения под нагрузкой РПН рассчитаны при двух крайних реально возможных положениях регулятора.

4.3.2. Предварительными расчетами установлено, что дифференциальная токовая защита трансформатора должна выполняться с зоной повышенной чувствительности на стороне низшего напряжения, так как защита с одной зоной чувствительности, выполненная с реле серии ДЗТ-11, имеет недостаточную чувствительность к КЗ за реактором ($k_ч$=1,365<1,5).

4.3.3. Расчет защиты, выполненной с реле типа ДЗТ-11, производится в следующем порядке.

4.3.3.1. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого трансформатора, соответствующие его номинальной мощности.

По этим токам определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты, исходя из коэффициентов трансформации трансформаторов тока K_I (см. п. 2.2.1) и коэффициентов схемы $k_{сх}$ (см. табл. 2.1). Расчеты сведены в табл. 4.1.

4.3.3.2. Выбирается сторона, к трансформаторам тока которой целесообразно присоединить тормозную обмотку реле. В соответствии с рекомендациями п. 4.1.4 тормозная обмотка включается на сумму токов трансформаторов тока, установленных в цепи каждой из расщепленных обмоток низшего напряжения и ограничивающих всю защиту в целом.

4.3.3.3. Определяются минимальные токи срабатывания для всех зон защиты.

4.3.3.3.1. Для основной зоны минимальный ток срабатывания защиты определяется по условию отстройки от броска намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора под напряжение по (2.2) в соответствии с п. 3.1.2

$$I_{с.з.осн}=1{,}5\cdot 201=301{,}5\ \text{А}.$$

4.3.3.3.2. Для зоны повышенной чувствительности минимальный ток срабатывания защиты определяется по условию обеспечения $k_ч$=2,5 при КЗ между двумя фазами за реактором в минимальном режиме работы системы и при работе защищаемого трансформатора на среднем ответвлении по (4.1) в соответствии с п. 4.1.2.3

$$I_{с.з.пов}=\frac{425\sqrt{3}}{2{,}5\sqrt{3}}=170\ \text{А}.$$

4.3.3.4. Определяется необходимое число витков обмотки НТТ реле для каждой из зон защиты.

4.3.3.4.1. Для основной зоны за основную сторону принята сторона основного питания 110 кВ. Необходимое число витков рабочей обмотки НТТ реле для основной стороны определяется по (2.18), исходя из значения минимального тока срабатывания защиты $I_{с.з.осн}$= =301,5 А, полученного в п. 4.3.3.3.1.

Определяется расчетное число витков рабочей обмотки НТТ реле, принятой в расчете за неосновную (присоединенной к трансформаторам тока *ТА2*), по (2.20).

Расчеты выполнены в соответствии с п. 4.2.4 и сведены в строки 1—4 табл. 4.2.

4.3.3.4.2. Для зоны повышенной чувствительности за основную принята обмотка НТТ реле, присоединенная к трансформаторам тока *ТА3*, ограничивающим защиту в целом. Необходимое число витков рабочей обмотки НТТ реле для основной стороны этой зоны определяется, исходя из значения минимального тока срабатывания защиты $I_{с.з.пов}$=170 А, полученного в п. 4.3.3.3.2 по (4.1).

Таблица 4.1

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение для стороны		
		110 кВ	6 кВ	
Первичный ток на сторонах защищаемого трансформатора, соответствующий его номинальной мощности, А	$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} U_{ном, ср}}$	$\frac{40\,000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 201$	$\frac{40\,000}{\sqrt{3} \cdot 6{,}3} = 3670$	
Схема соединения трансформаторов тока	—	Д	У	У
Коэффициент трансформации трансформаторов тока	K_I	400/5	ТА2 3000/5	ТА3 3000/5
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора, А	$I_{ном} = \frac{I_{ном} k_{сх}}{K_I}$	$\frac{201\sqrt{3}}{400/5} = 4{,}35$	$\frac{3670}{3000/5} = 6{,}12$	$\frac{3670}{3000/5} = 6{,}12$

Таблица 4.2

№ п/п.	Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
1	Ток срабатывания реле в основной зоне, А	$I_{с.р.осн} = \frac{I_{с.з.осн} k_{сх.ВН}}{K_{ITA1}}$	$\frac{301{,}5 \cdot \sqrt{3}}{400/5} = 6{,}52$
2	Число витков обмотки НТТ реле для основной стороны основной зоны *TA1*: расчетное	По (2.18) $w_{осн.TA1расч} = \frac{F_{с.р}}{I_{с.р.осн}}$	$\frac{100}{6{,}52} = 15{,}34$
3	принятое	$w_{осн.TA1} = w_р$	15
4	Расчетное число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны основной зоны *TA2*	По (2.20) $w_{осн.TA2расч} = w_{осн.TA1} \frac{I_{в.TA1}}{I_{в.TA2}}$	$15 \frac{4{,}35}{6{,}12} = 10{,}66$
5	Ток срабатывания реле в зоне повышенной чувствительности, А	$I_{с.р.пов} = \frac{I_{с.з.пов} \frac{U_{х.с.р.ВН}}{U_{х.НН}} k_{сх}}{K_{ITA3}}$	$\frac{170 \frac{115}{6{,}3}}{3000/5} = 5{,}17$
6	Число витков обмотки НТТ реле для основной стороны зоны повышенной чувствительности *TA3*: расчетное	По (2.18) $w_{пов.TA3расч} = \frac{F_{с.р}}{I_{с.р.пов}}$	$\frac{100}{5{,}17} = 19{,}3$
7	принятое	$w_{пов.TA3} = w_{1ур}$	19
8	Расчетное число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны зоны повышенной чувствительности *TA2*	По (2.20) $w_{пов.TA2расч} = w_{пов.TA3} \frac{I_{в.TA3}}{I_{в.TA2}}$	$19 \frac{6{,}12}{6{,}12} = 19$
9	Расчетное число витков обмотки НТТ реле, присоединенной к *TA2*, разграничивающему зоны разной чувствительности	По (4.3) $w_{осн—пов.TA2 расч} = w_{пов.TA2 расч} - w_{осн.TA2 расч}$	$19 - 10{,}66 = 8{,}34$
10	Принятое число витков обмотки НТТ реле	$w_{осн.TA1} = w_р$	15
		$w_{пов.TA3} = w_{I ур}$	19
		$w_{осн—пов.TA2} = w_{II ур}$	8

Таблица 4.3

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
Первичный расчетный ток небаланса с учетом составляющей $I'''_{нб}$ при КЗ на шинах НН, А	По (2.3), (2.4), (2.6) и (4.4) $I_{нб,\ расч} = \left(k_{пер}k_{одн}\varepsilon + \right.$ $+ \Delta U \frac{w_{осн,\ TA1}\frac{I_{в,\ ном,\ TA1}}{I_{в,\ ном,\ TA3}}}{w_{пов,\ TA3}} +$ $\left. + \frac{w_{осн-пов,\ расч} - w_{осн-пов}}{w_{осн-пов,\ расч}}\right) I_{к,\ max}$ ВН	$\left(1 \cdot 1 \cdot 0{,}1 + 0{,}16 \frac{15\frac{4{,}35}{6{,}12}}{19} + \right.$ $\left. + \frac{8{,}34 - 8}{8{,}34}\right) 725{,}3 =$ $= 0{,}23 \cdot 725{,}3$
Число витков тормозной обмотки НТТ реле: расчетное принятое	По (3.4) $w_{торм,\ расч} = k_{отс}\frac{I_{нб,\ расч}w_{пов,\ TA3}}{I_{торм}\operatorname{tg}\alpha}$ $w_{торм} = w_т$	$\frac{1{,}5 \cdot 0{,}23 \cdot 725{,}3 \cdot 19}{725{,}3 \cdot 0{,}75} = 8{,}8$ 9

Определяется расчетное число витков рабочей обмотки НТТ реле, принятой для этой зоны за неосновную (присоединенной к трансформаторам тока *TA2*), по (2.20).

Расчеты выполнены в соответствии с п. 4.2.4 и приведены в пп. 5—8 табл. 4.2.

4.3.3.4.3. Определяется число витков рабочей обмотки НТТ реле, присоединенной к трансформаторам тока *TA2*, разграничивающим зоны разной чувствительности, по (4.3) в соответствии с п. 4.2.5. Расчеты приведены в пп. 9 и 10 табл. 4.2.

4.3.3.4.4. Принимаются следующие числа витков: $w_р$=15, что соответствует току срабатывания защиты в основной зоне $I_{с,\ з,\ осн} = \frac{100}{15} \cdot \frac{400/5}{\sqrt{3}} = 308$ А;

$w_{II\ ур}$=8, что соответствует току срабатывания защиты в зоне повышенной чувствительности, приведенному к стороне ВН:

при работе на среднем ответвлении

$$I_{с,\ з,\ пов} = \frac{100}{15 + 8\frac{6{,}12}{4{,}35}} \cdot \frac{400/5}{\sqrt{3}} = 176 \text{ А};$$

при работе на крайнем реально возможном ответвлении +РО (126 кВ)

$$I_{с,\ з,\ пов\ (+РО)} = \frac{100}{15 + 8\frac{6{,}12}{4{,}35} \cdot \frac{126}{115}} \cdot \frac{400/5}{\sqrt{3}} = 169 \text{ А};$$

$w_{I\ ур}$=19 витков.

4.3.3.4.5. Определяется необходимое число витков тормозной обмотки НТТ реле по (3.4) в соответствии с п. 4.2.6; для этого определяется ток небаланса $I_{нб.расч}$ по (2.3), (2.4), (2.6) и (4.4) с учетом того, что $I'''_{нб,\ расч}$ создается только той рабочей обмоткой НТТ реле, которая присоединяется к трансформаторам тока *TA1*, а $I'''_{нб}$ создается округлением витков той рабочей обмотки НТТ реле, которая присоединяется к трансформаторам тока *TA2*, разграничивающим зоны разной чувствительности.

Расчеты приведены в табл. 4.3.

4.3.3.5. Определяется чувствительность защиты при КЗ между двумя фазами в минимальном режиме работы системы в защищаемых зонах:

основной поток в точке K_2 (рис. 4.2,*д*)

$$k_{ч,\ осн} = \frac{571\sqrt{3}}{308\sqrt{3}} = 1{,}85 > 1{,}5;$$

повышенной чувствительности в точке K_3 (рис. 4.2,*е*)

$$k_{ч,\ пов} = \frac{379 \cdot \sqrt{3}}{169\sqrt{3}} = 2{,}24.$$

Расчет производился по (2.26). Защита имеет достаточную чувствительность и может быть использована для защиты трансформатора по рис. 4.2,*а*.

5. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ, ВЫПОЛНЕННАЯ С РЕЛЕ ТИПА ДЗТ-21 (ДЗТ-23)

5.1. УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ

5.1.1. Ниже даны основные указания по расчету чувствительной дифференциальной токовой защиты, выполненной с реле типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23), применительно к трансформаторам и автотрансформаторам. Устройство, принцип действия и характеристики защиты рассмотрены в приложении П5.

5.1.2. Первичный минимальный ток срабатывания защиты (ее чувствительного органа) при отсутствии торможения $I_{с,min}$ выбирается по следующим условиям.

5.1.2.1. Отстройки от расчетного первичного тока небаланса в режиме, соответствующем началу торможения, которая производится по выражениям, аналогичным (2.1) и (2.3):

$$I_{\text{с, }3min} \geqslant k_{\text{отс}} I_{\text{нб, торм. нач}} = k_{\text{отс}} (I'_{\text{нб, торм, нач}} + I''_{\text{нб, торм, нач}} + I'''_{\text{нб, торм, нач}}), \quad (5.1)$$

где $I_{\text{нб,торм,нач}}$, $I'_{\text{нб,торм,нач}}$, $I''_{\text{нб, торм, нач}}$, $I'''_{\text{нб, торм, нач}}$ — то же, что в (2.3), но в режиме, соответствующем началу торможения (когда полусумма относительных тормозных токов равна току $I^*_{\text{торм,нач}}$ — см. рис. П5.1); $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,5.

5.1.2.2. Отстройки от броска намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора (автотрансформатора) под напряжение по (2.2), в котором коэффициент k принимается равным 0,3.

Как показали исследования, проведенные в ЮО ЭСП канд. техн. наук Г. В. Бердовым и ст. научным сотрудником М. М. Серединым, включение в зону действия защиты автотрансформатора линейного регулировочного трансформатора, устанавливаемого на стороне низшего напряжения (см. «Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 13А», рис. 2.2), практически не влияет на рассматриваемое условие отстройки от броска намагничивающего тока автотрансформатора.

5.1.2.3. Обеспечения недействия защиты (в совокупности с другими факторами — см. ниже) от тока небаланса переходного режима внешнего КЗ. Условие соблюдается при

$$I_{\text{с,}3min} \geqslant 0{,}3 I_{\text{ном}}, \quad (5.2)$$

где $I_{\text{ном}}$ — то же, что в (2.2).

Указанное условие определяется тем, что недействие рассматриваемой защиты в переходном режиме внешнего КЗ обеспечивается совокупностью ряда факторов, действующих на торможение (форма кривой тока небаланса, торможение от второй гармоники, наличие торможения от фазного тока в плечах защиты), дающих гарантированный эффект при минимальном токе срабатывания защиты, удовлетворяющем (5.2). Условие 5.1.2.2 для автотрансформаторов не является расчетным, так как обеспечивается при меньших значениях $I_{\text{с,}3min}$, чем условие 5.1.2.3. Расчетным принимается большее из значений, полученных по условиям 5.1.2.1 и 5.1.2.3.

5.1.3. Первые две составляющие $I'_{\text{нб,торм,нач}}$ и $I''_{\text{нб,торм,нач}}$, входящие в выражение (5.1), могут быть определены по (2.4) и (2.5), составленным для режима, соответствующего началу торможения.

При этом коэффициент $k_{\text{пер}}$ принимается равным 1, а полная погрешность трансформаторов тока ε, учитывая дополнительную погрешность используемых в защите автотрансформаторов тока, принимается равной 5 % первичного тока, проходящего по одной, наиболее нагруженной стороне защищаемого трансформатора (автотрансформатора) в режиме, соответствующем началу торможения. Если на наиболее нагруженной стороне автотрансформаторы тока не используются, то погрешность ε может приниматься равной 3 % указанного тока, однако при этом должны рассматриваться (с целью сравнения) и погрешности ε от токов, проходящих по другим сторонам защищаемого трансформатора (автотрансформатора), где установлены автотрансформаторы тока.

Составляющая $I'''_{\text{нб,торм,нач}}$, обусловленная в рассматриваемом случае несовпадением расчетных токов (см. п. 5.1.4) и номинальных токов используемых ответвлений автотрансформаторов тока типов АТ-31 и АТ-32 или трансреактора реле *TAV*, определяется по выражению

$$I'''_{\text{нб, торм, нач}} = \left| \frac{I_{\text{1отв, расч}} - I_{\text{1отв, ном}}}{I_{\text{1отв, расч}}} - \frac{I_{\text{2отв, расч}} - I_{\text{2отв, ном}}}{I_{\text{2отв, расч}}} \right| I^*_{\text{торм, нач, п}}, \quad (5.3)$$

где $I_{\text{1отв,расч}}$ и $I_{\text{2отв,расч}}$ — расчетные значения токов на неосновных сторонах (например, на сторонах высшего и среднего напряжений) для выбора схемы включения автотрансформаторов тока типов АТ-31 и АТ-32 или ответвлений трансреактора реле *TAV*, соответствующих принятому включению (ответвлению) на основной стороне (например, на стороне низшего напряжения)—см. п. 5.1.4; $I_{\text{1отв,ном}}$ и $I_{\text{2отв,ном}}$ — ближайшие к расчетным номинальные токи принятых ответвлений автотрансформаторов тока типов АТ-31 и АТ-32 или трансреакторов реле *TAV* на неосновных сторонах; $I^*_{\text{торм,нач,п}}$ — первичный тормозной ток, соответствующий началу торможения, определяемый по (5.8), (5.9), (5.11) и (5.12).

5.1.4. Ответвления $I_{\text{отв,ном,осн}}$ трансреактора реле *TAV* или автотрансформаторов тока типов АТ-31 (АТ-32), если последние используются на рассматриваемой стороне, принимаемой в расчете за основную (например, сторона низшего напряжения), выбираются, исходя из вторичного тока $I_{\text{ном,в,осн}}$ в плече защиты на этой стороне, соответствующего номинальной мощности защищаемого трансформатора (автотрансформатора), так, чтобы

$$I_{\text{отв,ном,осн}} \leqslant I_{\text{ном,в,осн}}. \quad (5.4)$$

Ответвления автотрансформаторов тока типов АТ-31 и АТ-32 для неосновных сторон следует выбирать, исходя из вторичного тока $I_{\text{ном,в,неосн}}$ в плече защиты на рассматриваемой неосновной стороне, соответствующего номинальной мощности защищаемого трансформатора (автотрансформатора) и выбранного ответвления $I_{\text{отв,ном,осн}}$ для основной стороны:

$$I_{\text{отв, ном, неосн}} \leqslant I_{\text{отв, расч, неосн}} = I_{\text{отв, ном, осн}} \frac{I_{\text{ном, в, неосн}}}{I_{\text{ном, в, осн}}}. \quad (5.5)$$

По (5.4) и (5.5) принимаются ответвления с номинальным током, равным или ближайшим меньшим расчетного. Указанное необходимо для обеспечения возможности выставления на реле уставки относительного минимального тока срабатывания (при отсутствии торможения) $I^*_{\text{с,}pmin}$, соответствующей наименьшему возможному значению первичного минимального тока срабатывания защиты $I_{\text{с,}3min}$ (по п. 5.1.2),

$$I^*_{\text{с, }pmin} = \frac{I_{\text{с, }3min} k_{\text{сх}}}{K_I I_{\text{отв, ном}}}, \quad (5.6)$$

где K_I и $k_{\text{сх}}$ — коэффициент трансформации трансформаторов тока и коэффициент схемы для расчетной стороны.

Все величины в (5.6) должны приниматься для стороны, обусловливающей наибольшее загрубление защиты. Такой стороной является та неосновная сторона, для которой принятое ответвление $I_{\text{отв,ном,неосн}}$ больше отличается от расчетного $I_{\text{отв,расч,неосн}}$, если с этой стороны может производиться включение трансформатора под напряжение.

Увеличение уставки на реле до значений, полученных по выражению (5.6), производится с помощью резистора *R13* (см. рис. П5.2,*а*).

При выборе ответвлений автотрансформаторов тока типов АТ-31 и АТ-32 и трансреактора реле *TAV* в целях обеспечения наименьших значений $I'''_{\text{нб, торм, нач}}$ могут использоваться табл. П5.3 и П5.4, приведенные в приложении П5.

В плече защиты на основной стороне автотрансформаторы тока могут не использоваться (например, на стороне низшего напряжения в защите трансформаторов с нерасщепленной обмоткой и одиночным реактором или без реактора), если получаемая при этом кратность тока $I_{\text{ном,в,осн}}/I_{\text{отв,ном,осн}}$ позволяет обеспечить требуемую термическую стойкость автотрансформаторов и

реле при учете возможной перегрузки защищаемого (автотрансформатора).

5.1.5. Торможение, как правило, следует осуществлять от токов на всех (питающих и приемных) сторонах трансформатора (автотрансформатора). Однако, если на подстанции не имеется синхронных двигателей, в защите двух- и трехобмоточного трансформатора при наличии питания только со стороны высшего напряжения и отсутствии параллельной работы на стороне среднего напряжения принципиально в целях увеличения чувствительности защиты целесообразно было бы торможение осуществлять только от токов на приемных сторонах. Но при этом может потребоваться коэффициент торможения выше уставок, предусмотренных на реле.

Использование торможения только от токов приемных сторон обеспечивает отсутствие торможения от токов внутренних КЗ, а использование торможения от токов всех сторон при возможности питания с нескольких из них необходимо для обеспечения отсутствия торможения при $I \leqslant I_{ном}$ (см. п. 5.1.7).

5.1.6. Ответвления $I_{отв,торм,ном}$ промежуточных трансформаторов тока TA цепи торможения реле и приставки дополнительного торможения выбираются, исходя из вторичного тока $I_{ном,в}$ в плече защиты, соответствующего номинальной мощности защищаемого трансформатора (автотрансформатора), и ранее выбранных (см. п. 5.1.4) коэффициентов трансформации $K_{Iат}$ автотрансформаторов тока, если последние используются на рассматриваемой стороне

$$I_{отв,\ торм,\ ном} \leqslant I_{отв,\ торм,\ расч} = \frac{I_{ном,\ в}}{K_{Iат}}. \quad (5.7)$$

Принимаются ответвления с номинальным током, равным или ближайшим меньшим расчетного.

5.1.7. Уставка «начала торможения» $I^*_{торм,нач}$ (см. рис. П5.1) по отношению к номинальному току $I_{отв,ном}$ принятого ответвления промежуточных трансформаторов тока TA цепи торможения реле и приставки дополнительного торможения должна приниматься: $I^*_{торм,нач}=1,0$, когда торможение осуществляется от токов всех групп трансформаторов тока рассматриваемой дифференциальной защиты трансформатора (автотрансформатора), т. е. при многостороннем питании, и $I^*_{торм,нач}=0,6$, когда торможение осуществляется только от токов групп трансформаторов тока, установленных на приемных сторонах защищаемого трансформатора (автотрансформатора), т. е. при одностороннем питании.

При таком выборе уставки «начала торможения» $I^*_{торм,нач}$ и принятии ответвлений $I_{отв,торм,ном}$ промежуточных трансформаторов тока TA цепи торможения реле и приставок дополнительного торможения равными $I_{отв,торм,расч}$ по выражению (5.7) при токах, меньших соответственно:

$$I_{торм,нач,п}=I_{ном} \quad (5.8)$$

(для уставки «начала торможения» $I^*_{торм,нач}=1,0$) и

$$I_{торм,нач,п}=1,2I_{ном}, \quad (5.9)$$

(для уставки «начала торможения» $I^*_{торм,нач}=0,6$), обеспечивается отсутствие торможения.

При принятии

$$I_{отв,торм,ном} < I_{отв,торм,расч} \quad (5.10)$$

отсутствие торможения будет обеспечиваться при токах, меньших соответственно:

$$I_{торм.\ нач.\ п} = 0,5I_{ном}\left(k_{ток\ I}\frac{I_{отв\ ,\ торм,\ ном\ I}}{I_{отв,\ торм,\ расч\ I}} + k_{ток\ II}\frac{I_{отв,\ торм,\ ном\ II}}{I_{отв,\ торм,\ расч\ II}} + k_{ток\ III}\frac{I_{отв\ ,\ торм,\ ном\ III}}{I_{отв,\ торм,\ расч\ III}}\right), \quad (5.11)$$

(для уставки «начала торможения» $I^*_{торм,нач}=1,0$) и

$$I_{торм,\ нач,\ п} = 1,2I_{ном}\left(k_{ток\ II}\frac{I_{отв,\ торм,\ ном\ II}}{I_{отв,\ торм,\ расч\ II}} + k_{ток\ III}\frac{I_{отв,\ торм,\ ном\ III}}{I_{отв,\ торм,\ расч\ III}}\right) \quad (5.12)$$

(для уставки «начала торможения» $I^*_{торм,нач}=0,6$), где $k_{ток\ I}$, $k_{ток\ II}$, $k_{ток\ III}$ — коэффициенты токораспределения соответственно для сторон I, II и III в рассматриваемом режиме, т. е. по отношению к первичным токам горизонтальная часть характеристики торможений (см. рис. П5.1) несколько сокращается. Поэтому в случаях, когда токи $I_{отв,торм,расч}$ в выражении (5.10) значительно превышают токи $I_{отв,торм,ном}$, в целях обеспечения отсутствия торможения в нагрузочном режиме от тока $I_{ном}$ следует и во втором случае (при осуществлении торможения только от токов групп трансформаторов тока, установленных на приемных сторонах защищаемого трансформатора) принимать $I^*_{торм,нач}=1,0$. При этом в (5.12) вместо коэффициента 1,2 надо принимать 2.

Первичные токи начала торможения $I_{торм,нач,п}$ по (5.8), (5.9), (5.11) и (5.12) явятся расчетными при выборе минимального тока срабатывания защиты при отсутствии торможения $I_{с,з\,min}$ по (5.1).

Следует отметить, что в целях упрощения при близких значениях токов $I_{отв,торм,ном}$ и $I_{отв,торм,расч}$, входящих в (5.11) и (5.12), их отношения можно принимать равными 1,0, т. е. пользоваться (5.8) и (5.9).

5.1.8. Коэффициент торможения $k_{торм}$, равный тангенсу угла наклона тормозной характеристики реле (см. рис. П5.1), выбирается по условию обеспечения недействия защиты (в совокупности с другими факторами — см. п. 5.1.2.3) от тока небаланса переходного режима внешнего КЗ.

Отстройка от переходного (а не установившегося) режима определяется тем, что форма тока небаланса переходного режима при определенных условиях может оказаться такой, что времяимпульсный принцип и торможение от второй гармоники будут недостаточными для обеспечения надежной отстройки защиты.

Коэффициент торможения $k_{торм}$, удовлетворяющий указанным условиям, определяется по выражению, составленному исходя из тормозной характеристики реле (см. рис. П5.1)

$$k_{торм} = \frac{\Delta I^*_{д}}{0,5\Delta\Sigma I^*_{торм}} = \frac{k_{отс}I^*_{нб,\ расч,\ в} - I^*_{с,\ p\,min}}{0,5\Sigma I^*_{торм,\ расч,\ в} - I^*_{торм,\ нач}}, \quad (5.13)$$

где $I^*_{нб,расч,в}$ — относительный максимальный расчетный вторичный ток небаланса, подводимый к ответвлению трансреактора реле TAV или автотрансформаторов тока при расчетном внешнем КЗ, от которого защита должна быть отстроена соответствующим выбором коэффициента торможения $k_{торм}$; $I^*_{с,p\,min}$ — относительный ток срабатывания реле при отсутствии торможения (уставка минимального тока срабатывания), определяемый по (5.6); $0,5\Sigma I^*_{торм,расч,в}$ — полусумма относительных вторичных токов, подводимых к ответвлениям промежуточных трансформаторов тока TA цепи торможения реле и приставок дополнительного торможения при расчетном внешнем КЗ; $I^*_{торм,нач}$ — относительный вторичный ток начала торможения (уставка «начала торможения» — п. 5.1.7); $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,5.

Значения всех токов, входящих в выражение (5.13), рассчитываются по отношению к принятым ответвлениям в соответствующей цепи реле: рабочих токов — по отношению к принятым ответвлениям трансреактора

реле *TAV* или автотрансформаторов тока (см. п. 5.1.4), тормозных токов — к принятым ответвлениям промежуточных трансформаторов тока *TA* цепи торможения реле и приставок дополнительного торможения (см. п. 5.1.6).

Коэффициент торможения $k_{торм}$ может быть выражен также через относительные значения первичных токов, подводимых к защите:

$$k_{торм} = \frac{k_{отс}\overset{*}{I}_{нб.\,расч}\dfrac{I_{ном.\,в.\,осн}}{I_{отв.\,ном.\,осн}} - \overset{*}{I}_{с.\,рmin}}{0{,}5\Sigma\overset{*}{I}_{торм.\,расч}\dfrac{I_{отв.\,торм.\,расч}}{I_{отв.\,торм.\,ном}} - \overset{*}{I}_{торм.\,нач}}, \qquad (5.14)$$

где $\overset{*}{I}_{нб,расч}$ — относительный максимальный расчетный первичный ток небаланса при расчетном внешнем КЗ; $0{,}5\Sigma\overset{*}{I}_{торм,расч}$ — полусумма относительных первичных тормозных токов при расчетном внешнем КЗ; $I_{ном.в,осн}$ — вторичный ток в плече защиты на стороне, принимаемой в расчете за основную, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора (автотрансформатора); $I_{отв,ном,осн}$ — номинальный ток принятого ответвления трансреактора реле *TAV* или автотрансформаторов тока для стороны, принимаемой в расчете за основную (см. п. 5.1.4); $I_{отв,торм,расч}$ и $I_{отв,торм,ном}$ — расчетный [по выражению (5.7)] и принятый (номинальный) токи ответвлений промежуточных трансформаторов тока *TA* цепи торможения реле и приставок дополнительного торможения на соответствующих сторонах (п. 5.1.6).

Остальные обозначения те же, что и в (5.13).

Значения первичных токов $\overset{*}{I}_{нб,расч}$ и $\overset{*}{I}_{торм,расч}$, входящих в (5.14), рассчитываются по отношению к номинальному току $I_{ном}$ защищаемого трансформатора (автотрансформатора).

Расчетный максимальный первичный ток небаланса $\overset{*}{I}_{нб,расч}$ при расчетном внешнем КЗ, необходимый для определения относительных первичного $\overset{*}{I}_{нб,расч}$ по (5.14) вторичного $I_{нб,расч,в}$ по (5.13) максимального расчетного тока небаланса, может быть рассчитан по (2.3), а значения входящих в него составляющих тока небаланса $I'_{нб,расч}$, $I''_{нб,расч}$ и $I'''_{нб,расч}$ — соответственно по (2.4), (2.5) и выражению, аналогичному (5.3), но составленному для расчетного внешнего металлического КЗ. При этом в целях обеспечения недействия защиты от тока небаланса переходного режима внешнего КЗ коэффициент в (2.4), учитывающий переходный режим, рекомендуется принимать равным $k_{пер}=1{,}5\div2$.

Меньшее значение принимается при использовании на разных сторонах защищаемого трансформатора (автотрансформатора) однотипных трансформаторов тока (только встроенных или только выносных) и одинаковой схеме их соединения (например, в звезду), большее значение принимается при использовании для защиты разнотипных трансформаторов тока и разных схемах их соединения (на одной из сторон в звезду, на других — в треугольник). Полученное расчетное значение $k_{торм}$ выставляется на реле с помощью переменного резистора *R12* (рис. П5.2,*а*).

5.1.9. Первичный ток срабатывания отсечки определяется следующими условиями.

5.1.9.1. Отстройкой от броска намагничивающего тока, которая для трансформатора, а тем более автотрансформатора надежно обеспечивается уже при минимальной уставке на реле по току срабатывания отсечки ($6I_{отв,ном}$), если ответвления рабочей цепи реле выбраны (см. п. 5.1.4) примерно равными вторичным токам в соответствующих плечах защиты [$I_{отв,ном,осн}\approx I_{ном,в,осн}$ — см. (5.4)]; при выборе ответвлений рабочей цепи реле значительно меньшими вторичных токов в плечах защиты в защите трансформатора должна приниматься большая уставка ($9I_{отв,ном}$).

5.1.9.2. Отстройкой от максимального первичного тока небаланса $I_{нб,расч}$ при переходном режиме расчетного внешнего КЗ по (2.1). Значения тока небаланса $I_{нб,расч}$, входящего в выражение (2.1), и его составляющих $I'_{нб,расч}$, $I''_{нб,расч}$ и $I'''_{нб,расч}$ могут быть определены соответственно по (2.3)—(2.5) и выражению, аналогичному (5.3), но составленному для расчетного внешнего металлического КЗ. При этом, учитывая, что отсечка реагирует на среднее значение напряжения на вторичной обмотке трансреактора *TAV* и не реагирует на импульс тока небаланса в первый период от возникновения КЗ [поскольку постоянная времени ее цепи около 30 мс (см. п. 4 приложения П5)], коэффициент в (2.4), учитывающий переходный режим, следует принимать:

$k_{пер}=1{,}5\div2{,}5$ — при использовании на разных сторонах защищаемого трансформатора (автотрансформатора) однотипных трансформаторов тока (только встроенных или только выносных);

$k_{пер}=2\div3$ — при использовании на разных сторонах защищаемого трансформатора (автотрансформатора) разнотипных трансформаторов тока.

При этом меньшие значения $k_{пер}$ принимаются при одинаковой схеме соединения трансформаторов тока защиты на разных сторонах (например, в звезду), а большие значения — при разных схемах соединения трансформаторов тока защиты (на одной из сторон в звезду, на других — в треугольник).

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

Коэффициент чувствительности рассчитывается, исходя из первичных токов рассматриваемого вида (m) КЗ $I_{кmin}^{(m)}$ и минимального тока срабатывания защиты $I_{с,зmin}$ по (2.26).

В (2.26) минимальный ток срабатывания защиты при отсутствии торможения $I_{с,зmin}$ используется в связи с тем, что тормозная характеристика защиты имеет горизонтальную часть, которая и определяет ток срабатывания на грани срабатывания, например при КЗ через соответствующее переходное сопротивление. Фактически защита несколько загрубляется из-за торможения от тока нагрузки.

Следует отметить, что, как правило, чувствительность защиты при $I_{с,з}=0{,}3I_{ном}$ обеспечивается с большим запасом, поэтому необходимость в ее расчете возникает лишь в особых случаях, характеризуемых весьма малыми токами КЗ в защищаемой зоне.

Чувствительность дифференциальной токовой отсечки не определяется, так как она является вспомогательным элементом, назначение которого — предотвращение недопустимого замедления или отказа срабатывания защиты при больших кратностях тока, когда чувствительный орган может сработать с большим замедлением или не сработать из-за искажения формы кривой вторичного тока в переходном режиме КЗ (например, при значительном насыщении трансформаторов тока), и торможении вследствие этого чувствительного органа защиты токами второй и более высокими гармониками.

5.1.11. Для обеспечения действия защиты при замыкании на землю одной фазы в защищаемой зоне (на сторонах с большим током замыкания на землю) с временем, не превышающим [1], с:

$$t_{с,з}\leqslant(0{,}045+0{,}6T_1), \qquad (5.15)$$

где T_1 — постоянная времени сети, нагрузка на трансформаторы тока должна не превышать допустимую, исходя из кривых предельной кратности для тока, равного удвоенному току срабатывания отсечки ($2I_{с,з,отс}$).

[1] **Дмитренко А. М., Линт М. Г.** Влияние переходных процессов на быстродействие дифференциальной защиты ДЗТ-21. Электрические станции, 1982, № 6, с. 53—57.

Указанное необходимо для того, чтобы при больших кратностях тока КЗ, когда чувствительный орган имеет большое время действия, обеспечивалось с запасом действие отсечки с достаточно малым временем, а при токах $I_к < 2I_{с,отс}$ обеспечивалось достаточно быстрое действие чувствительного органа.

5.2. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТА

В соответствии с приведенными в п. 5.1 указаниями расчет дифференциальной защиты, выполненной с реле типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23), производится в следующем порядке.

5.2.1. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого трансформатора (автотрансформатора), соответствующие его номинальной мощности (проходной мощности для автотрансформатора). По этим токам определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты $I_{I\,в}$, $I_{II\,в}$ и $I_{III\,в}$, исходя из коэффициентов трансформации трансформаторов тока K_I (выбираются с учетом параметров используемого оборудования, его перегрузочной способности, требований релейной защиты и схемы соединения трансформаторов тока; при соединении трансформаторов тока в треугольник — исходя из первичного тока $I_{ном}\sqrt{3}$ ввиду целесообразности иметь вторичные токи в плече защиты, не превышающие номинальный ток трансформаторов тока 5 или 1 А) и коэффициента схемы $k_{сх}$.

5.2.2. Выбирается ответвление $I_{отв,ном,осн}$ трансреактора реле *TAV* или автотрансформаторов тока (если они используются в плече защиты на рассматриваемой стороне) для стороны, принятой в расчете за основную. Выбор производится в соответствии с п. 5.1.4, исходя из значений номинального вторичного тока [выражение (5.4)].

5.2.3. Выбираются ответвления трансреактора реле *TAV* или автотрансформаторов тока типа АТ-31 или АТ-32 для других, неосновных сторон $I_{отв,ном,неосн}$ по выражению (5.5) в соответствии с п. 5.1.4, исходя из выбранного по п. 5.2.2 ответвления для основной стороны и номинальных вторичных токов на соответствующих сторонах.

5.2.4. Определяются стороны, на которых используется торможение, в соответствии с п. 5.1.5.

5.2.5. Выбирается уставка «начала торможения» (1,0 или $0{,}6I_{отв,ном}$) в соответствии с п. 5.1.7.

5.2.6. Выбираются ответвления $I_{отв,торм,ном}$ промежуточных трансформаторов тока *TA* цепи торможения реле или приставок дополнительного торможения по (5.7) в соответствии с. п. 5.1.6, исходя из вторичных токов $I_{ном,в}$ в плече защиты и коэффициентов трансформации $k_{ат}$ автотрансформаторов тока типа АТ-31 или АТ-32, если они используются в плече защиты.

Однако в тех случаях, когда разница между расчетным током и ближайшим меньшим номинальным током ответвления значительно больше, чем между расчетным током и ближайшим большим номинальным током ответвления, целесообразно принимать к использованию ближайшее большее значение; связанное с этим уменьшение торможения компенсируется в дальнейшем выбором увеличенного значения коэффициента торможения — см. (5.14).

5.2.7. Определяется ток небаланса в режиме, соответствующем началу торможения $I_{нб,торм,нач}$, по (2.3)—(2.5) и (5.3) с учетом рекомендаций п. 5.1.3.

5.2.8. Определяется первичный минимальный ток срабатывания защиты (ее чувствительного органа) по (5.1) и (5.2). Определяется относительный минимальный ток срабатывания реле $I_{с,рmin}$ при отсутствии торможения по (5.6) в соответствии с п. 5.1.4.

5.2.9. Определяется коэффициент торможения защиты $k_{торм}$. Для этого определяется первичный максимальный ток, проходящий через защищаемый трансформатор (автотрансформатор) при внешнем КЗ и вычисляется значение максимального расчетного тока небаланса $I_{нб,расч}$ по (2.3)—(2.5) и (5.3). Расчет производится по выражению (5.14) в соответствии с п. 5.1.8.

5.2.10. Определяется первичный ток срабатывания отсечки в соответствии с п. 5.1.9.

5.2.11. Определяется значение коэффициента чувствительности защиты (ее чувствительного органа) $k_ч$ в соответствии с рекомендациями п. 5.1.10.

5.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ АВТОТРАНСФОРМАТОРА, ВЫПОЛНЕННОЙ С РЕЛЕ ТИПА ДЗТ-21

5.3.1. В настоящем примере дан расчет дифференциальной токовой защиты автотрансформатора 230/121/11 кВ мощностью 125 МВ·А. Автотрансформатор имеет встроенное регулирование напряжения под нагрузкой (РПН) на стороне среднего напряжения в пределах ±12 % номинального. На подстанции установлено два автотрансформатора, которые работают параллельно на сторонах 220 и 110 кВ.

Для возможности регулирования напряжения на стороне низшего напряжения установлен линейный регулировочный трансформатор 11±15 % кВ мощностью 40 МВ·А.

Исходная схема для примера расчета, а также схемы замещения прямой (обратной) и нулевой последовательностей приведены на рис. 5.1. Пример рассчитан в именованных единицах. Сопротивления, приведенные

Таблица 5.1

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение для стороны		
		220 кВ	110 кВ	10 кВ
Первичный ток на сторонах защищаемого автотрансформатора, соответствующий его проходной мощности, А	$I_{ном} = \frac{S_{ном,\,прох}}{\sqrt{3}\,U_{ном}}$	$\frac{125\,000}{\sqrt{3}\cdot 230}=314$	$\frac{125\,000}{\sqrt{3}\cdot 121}=597$	$\frac{125\,000}{\sqrt{3}\cdot 11}=6569$
Коэффициент трансформации трансформаторов тока	K_I	750/5	1000/5	3000/5
Схема соединения трансформаторов тока	—	Д	Д	У
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий проходной мощности защищаемого автотрансформатора, А	$I_{ном,\,в} = \frac{I_{ном} k_{сх}}{K_I}$	$\frac{314\cdot\sqrt{3}}{750/5}=3{,}62$	$\frac{597\cdot\sqrt{3}}{1000/5}=5{,}16$	$\frac{6569\cdot 1}{3000/5}=10{,}95$

Таблица 5.2

№ п/п	Наименование величин	Обозначение и метод определения	Числовое значение для стороны		
			220 кВ	110 кВ	10 кВ
1	Номинальный ток принятого ответвления трансреактора реле на основной стороне, А	По (5.4) $I_{отв, ном, осн} \leqslant I_{ном, в, осн}$	3,63	—	—
2	Расчетный ток ответвления автотрансформаторов тока на неосновных сторонах, А	По (5.5) $I_{отв, расч, неосн} = I_{ном, в, неосн} \frac{I_{отв, ном, осн}}{I_{ном, в, осн}}$	—	$5,16\frac{3,63}{3,62}=5,17$	$10,95\frac{3,63}{3,62}=10,98$
3	Тип автотрансформаторов тока, которые включаются в плечо защиты	По табл. П5.4	—	АТ-32	АТ-32
4	Номинальный ток используемого ответвления автотрансформаторов тока, к которому подводятся вторичные токи в плече защиты, А		—	5,15	10,92
5	Номер используемого ответвления автотрансформаторов тока, к которому подводятся вторичные токи в плече защиты		—	1—8	1—11
6	Номер используемого ответвления автотрансформаторов тока, к которому подключается реле		—	1—5	1—7
7	Номинальный ток используемого ответвления автотрансформаторов тока, к которому подключается реле, А		—	2,5	4,25
8	Номинальный ток принятого ответвления трансреактора реле на неосновных сторонах, А		—	2,5	4,25
9	Номер используемого ответвления трансреактора реле		4	6	3
10	Расчетный ток ответвления промежуточных трансформаторов тока цепи торможения реле, А	По (5.7) $I_{отв, торм, расч} = \frac{I_{ном, в}}{k_{ат}}$	3,62	$\frac{5,16}{5,15/2,5}=2,51$	$\frac{10,95}{10,92/4,25}=4,27$
11	Номинальный ток принятого ответвления приставки и промежуточных трансформаторов тока, А	$I_{отв, торм, ном}$	3,75	2,5	3,75
12	Номер используемого ответвления приставки и промежуточных трансформаторов тока реле	По табл. П5. 2	2	4	2

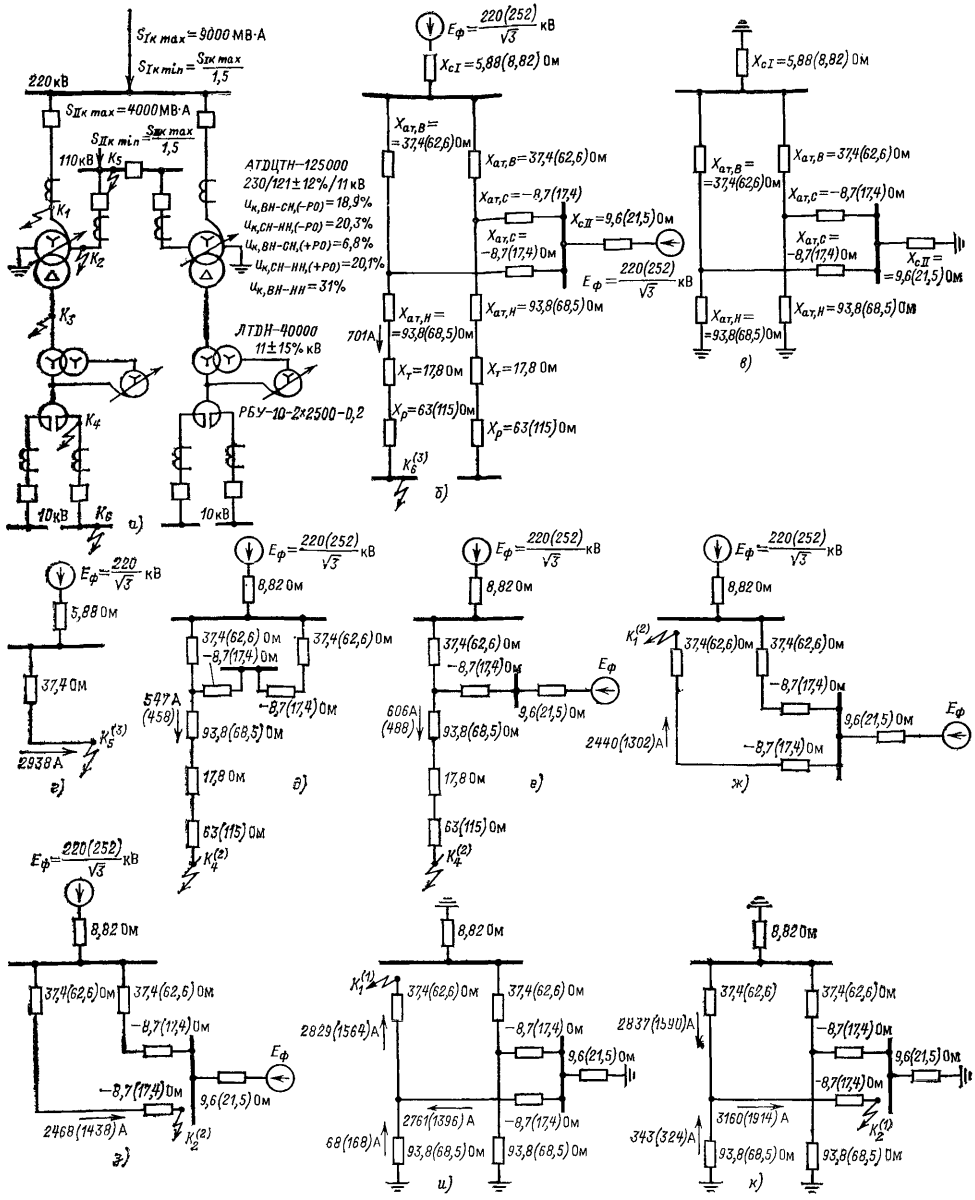

$S_{Iк\,max}$=9000 МВ·А
$S_{Iк\,min}=\frac{S_{Iк\,max}}{1,5}$
220 кВ
$S_{IIк\,max}$=4000 МВ·А
$S_{IIк\,min}=\frac{S_{IIк\,max}}{1,5}$
110 кВ
АТДЦТН–125000
230/121±12%/11 кВ
$u_{к,ВН-СН,(-РО)}$=18,9%
$u_{к,СН-НН,(-РО)}$=20,3%
$u_{к,ВН-СН,(+РО)}$=6,8%
$u_{к,СН-НН,(+РО)}$=20,1%
$u_{к,ВН-НН}$=31%
ЛТДН–40000
11±15% кВ
РБУ–10–2×2500–0,2
10 кВ
$E_ф=\frac{220(252)}{\sqrt{3}}$ кВ
$X_{сI}$=5,88(8,82) Ом
$X_{сII}$=9,6(21,5) Ом
$X_{ат,В}$=37,4(62,6) Ом
$X_{ат,С}$=–8,7(17,4)
$X_{ат,Н}$=93,8(68,5) Ом
$X_т$=17,8 Ом
$X_р$=63(115) Ом
701А
а)
б)
в)
г)
д)
е)
ж)
з)
и)
к)

Рис. 5.1.

Рис. 5.1. Пример расчета дифференциальной токовой защиты автотрансформатора, выполненной с реле типа ДЗТ-21:

а — исходная схема; *б* — схема замещения прямой (обратной) последовательности и токораспределение при внешнем трехфазном КЗ в точке K_6 в режиме I2; *в* — схема замещения нулевой последовательности; *г* — схема замещения прямой последовательности для определения тока при внешнем трехфазном КЗ в точке K_5 в режиме III1; *д* — схемы замещения прямой (обратной) последовательности для определения токов КЗ между двумя фазами в защищаемой зоне в точке K_4 в режиме IV2; *е* — то же, что и *д*, но в режиме I1; *ж* — то же, что и *д*, но в точке K_1 в режиме II2; *з* — то же, что и *д*, но в точке K_2 в режиме III2; *и* — схема замещения нулевой последовательности для определения токов однофазного КЗ в защищаемой зоне в точке K_1 в режиме II2; *к* — то же, что и *и*, но в точке K_2 в режиме III2.

Примечания: 1. В схемах замещения на рис. 5.1 даны номинальное и максимальное рабочее (в скобках) напряжения сети. Сопротивления питающих систем указаны для максимального и минимального (в скобках) режимов работы. Сопротивления автотрансформатора и токи КЗ указаны для крайних отклонений регулятора в сторону увеличения и уменьшения (в скобках) напряжения регулируемой обмотки. Сопротивления линейного регулировочного трансформатора при минимальном и максимальном коэффициентах трансформации практически одинаковы и поэтому указаны одним значением. Сопротивления реактора указаны для крайних отклонений регулятора линейного регулировочного трансформатора при отрицательном и положительном (в скобках) регулировании. Сопротивления всех элементов указаны в омах и приведены к стороне высшего напряжения.

2. Режимы обозначены: I — включены обе системы и все выключатели автотрансформатора; II — включены обе системы, но отключен выключатель защищаемого автотрансформатора со стороны ВН; III — включены обе системы, но отключен выключатель защищаемого автотрансформатора со стороны СН; IV — отключена система СН, все выключатели включены; 1 — в работе находится один автотрансформатор; 2 — в работе находятся два автотрансформатора.

3. Схемы замещения прямой (обратной) последовательности для случаев *и* и *к* приведены соответственно на рис. 5.1,*ж* и *з*

к стороне высшего напряжения, на схемах замещения указаны в омах. Сопротивления защищаемого автотрансформатора рассчитаны при двух крайних положениях регулятора.

Сопротивления линейного регулировочного трансформатора и реактора (сопротивления которого рассчитаны при двух крайних положениях регулировочного автотрансформатора) заимствованы из примера расчета дифференциальной защиты цепей стороны низшего напряжения (см. п. 7.3).

5.3.2. Расчет защиты производится в следующем порядке.

5.3.2.1. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого автотрансформатора, соответствующие его проходной мощности. По этим токам определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты $I_{ном,в}$, исходя из коэффициентов трансформации трансформаторов тока K_I и коэффициентов схемы $k_{сх}$. Расчеты выполнены в соответствии с п. 5.2.1 и сведены в табл. 5.1.

5.3.2.2. Выбираются ответвления трансреактора реле *TAV* для основной стороны (за основную принимается сторона 220 кВ, на которой вторичный ток в плече защиты примерно равен номинальному току ответвления трансреактора реле) $I_{отв,ном,осн}$.

Расчет производится по выражению (5.4) в соответствии с п. 5.1.4.

5.3.2.3. Выбираются ответвления автотрансформаторов тока АТ-32 для неосновных сторон 110 и 10 кВ $I_{отв,ном,неосн}$, исходя из выбранного ответвления трансреактора реле *TAV* для основной стороны $I_{отв,ном,осн}$ (п. 5.3.2.2.) и номинального вторичного тока в плече защиты на рассматриваемой неосновной стороне $I_{ном,в,неосн}$ (п. 5.3.2.1), по выражению (5.5) в соответствии с п. 5.1.4. Расчеты по пп. 5.3.2.2 и 5.3.2.3 сведены в пп. 1—9 табл. 5.2.

5.3.2.4. Определяются стороны, на которых используется торможение, в соответствии с рекомендациями п. 5.1.5.

Ввиду наличия питания с двух сторон и возможности передачи нагрузки как со стороны ВН, так и со стороны СН целесообразно осуществлять торможение от токов, проходящих во всех сторонах защищаемого автотрансформатора. Для этого, помимо промежуточных трансформаторов реле, используется приставка дополнительного торможения.

5.3.2.5. Выбирается уставка «начала торможения» $I_{торм,нач}=1{,}0$ в соответствии с п. 5.1.7 и на основании п. 5.3.2.4.

5.3.2.6. Выбираются ответвления промежуточных трансформаторов тока и приставки дополнительного торможения, исходя из вторичных токов $I_{ном,в}$ и выбранных в п. 5.3.2.3 коэффициентов трансформации автотрансформаторов тока АТ-32 $k_{ат}$ ($k_{ат}$ определяются из пп. 4 и 7 табл. 5.2), по выражению (5.7) в соответствии с п. 5.1.6.

Номинальный ток принятого ответвления приставки, установленной в цепях защиты со стороны 220 кВ, равный 3,75 А, больше расчетного — 3,62 А. Такое превышение возможно в соответствии с п. 5.2.6.

Расчеты сведены в пп. 10—12 табл. 5.2.

5.3.2.7. Определяется первичный тормозной ток, соответствующий «началу торможения», по (5.11)

$$I_{торм,\,нач,\,п}=0{,}5\cdot 314\left(\frac{3{,}75}{3{,}62}\,1+\frac{2{,}5}{2{,}51}\,.1\right)=318{,}5\text{ А}.$$

5.3.2.8. Определяется ток небаланса в режиме, соответствующем «началу торможения», по выражениям (5.1), (2.4), (2.5) и (5.3) в соответствии с пп. 5.1.2.1 и 5.1.3.

$$I_{нб,\,торм,\,нач}=\left(1.1\cdot 0{,}05+0{,}12+\left|\frac{5{,}17-5{,}15}{5{,}17}\right|\right)318{,}5=55{,}5\text{ А}.$$

5.3.2.9. Определяется первичный минимальный ток срабатывания защиты (ее чувствительного органа) по следующим условиям:

отстройки от расчетного первичного тока небаланса в режиме, соответствующем началу торможения, по (5.1)

$$I_{с,з\,min}\geqslant 1{,}5\cdot 55{,}5=83{,}3\text{ А};$$

отстройки от тока небаланса переходного режима внешнего КЗ, по выражению (5.2)

$$I_{с,з\,min}=0{,}3\cdot 314=94\text{ А};$$

За расчетное принимается большее из полученных расчетных значений $I_{с,з\,min}=94$ А.

5.3.2.10. Определяется относительный минимальный ток срабатывания реле (его чувствительного органа) при отсутствии торможения по (5.6). За расчетную принимается сторона среднего напряжения в соответствии с п. 5.1.4

$$I_{*с,\,р\,min}=\frac{94\,\dfrac{230}{121}\sqrt{3}}{1000/5\cdot 5{,}15}=0{,}301\approx 0{,}3.$$

5.3.2.11. Определяется первичный максимальный ток, проходящий через защищаемый автотрансформатор при внешнем КЗ (схема замещения для расчета тока внешнего КЗ приведена на рис. 5.1,*г*)

$$I_{к\,max}=\frac{220}{\sqrt{3}\,(5{,}88+37{,}4)}=2938\text{ А},$$

Таблица 5.3

Вид КЗ в защищаемой зоне и режим работы систем	Коэффициент чувствительности защиты ДЗТ-21	
	при +РО	при —РО
КЗ между двумя фазами на стороне НН автотрансформатора за реактором в режиме 1V2 (рис. 5.1, *д*)	$\frac{547\sqrt{3}}{94\sqrt{3}}=5,82$	$\frac{458\sqrt{3}}{94\sqrt{3}}=4,87$
КЗ между двумя фазами на стороне НН автотрансформатора за реактором в режиме I1 (рис. 5.1, *е*)	$\frac{606\sqrt{3}}{94\sqrt{3}}=6,45$	$\frac{488\sqrt{3}}{94\sqrt{3}}=5,19$
КЗ между двумя фазами на стороне ВН автотрансформатора в режиме II2 (рис. 5.1, *ж*)	$\frac{2440\cdot2}{94\sqrt{3}}=30$	$\frac{1302\cdot2}{94\sqrt{3}}=16$
КЗ между двумя фазами на стороне СН автотрансформатора в режиме III2 (рис. 5.1, *з*)	$\frac{2468\cdot2}{94\sqrt{3}}=30,35$	$\frac{1438\cdot2}{94\sqrt{3}}=17,7$
КЗ на землю одной фазы на стороне ВН автотрансформатора в режиме II2 (рис. 5.1, *и*)	$\frac{2761\cdot1}{94\sqrt{3}}=17$	$\frac{1396\cdot1}{94\sqrt{3}}=8,6$
КЗ на землю одной фазы на стороне СН автотрансформатора в режиме III2 (рис.5.1, *к*)	$\frac{2837\cdot1}{94\sqrt{3}}=17,4$	$\frac{1590\cdot1}{94\sqrt{3}}=9,8$

и соответствующий ему максимальный расчетный ток небаланса $I_{\text{нб,расч}}$ по (2.3)—(2.5) и (5.3), причем (5.3) составлено для расчетного внешнего КЗ (определяется $I'''_{\text{нб, расч}}$, а вместо $I_{\text{торм,нач,н}}$ используется $I_{\text{к}max}$); коэффициент, учитывающий переходный режим, $k_{\text{пер}}$ в (2.4) принят равным 2 (п. 5.1.8.3)

$$I_{\text{нб, расч}}=\left(2\cdot1\cdot0,1+0,12+\left|\frac{5,17-5,15}{5,17}\right|\right)2938=952\text{ А}.$$

5.3.2.12. Определяется коэффициент торможения защиты по (5.14) в соответствии с п. 5.1.8

$$k_{\text{торм}}=\frac{1,5\dfrac{952}{314}\dfrac{3,62}{3,63}-0,3}{0,5\dfrac{2938}{314}\left(\dfrac{3,62}{3,75}+\dfrac{2,51}{2,5}\right)-1}=0,516.$$

5.3.2.13. Определяется первичный ток срабатывания отсечки $I_{\text{с,отс}}$ по условию отстройки от максимального первичного тока небаланса $I_{\text{нб,расч}}$ при переходном режиме КЗ на шинах 110 кВ по (2.1) в соответствии с п. 5.1.9.2.

Значения тока небаланса $I_{\text{нб,расч}}$, входящего в выражение (2.1), и его составляющих $I'_{\text{нб, расч}}$, $I''_{\text{нб, расч}}$ и $I'''_{\text{нб, расч}}$ определяются соответственно по (2.3), (2.4), (2.5) и выражению, аналогичному (5.3), но составленному для расчетного КЗ; коэффициент $k_{\text{пер}}$ в (2.4) принят равным 3

$$I_{\text{нб, расч}}=\left(3\cdot1\cdot0,1+0,12+\left|\frac{5,17-5,15}{5,17}\right|\right)2938=1245\text{ А};$$

$$I_{\text{с,отс,расч}}=1,5\cdot1245=1870\text{ А}.$$

Уставка отсечки принята равной $6I_{\text{отв,ном}}$. При такой уставке первичный ток срабатывания отсечки больше его расчетного значения и равен

$$I_{\text{с, отс}}=6\cdot3,63\frac{750/5}{\sqrt{3}}=1890\text{ А}.$$

5.3.2.14. Определяется коэффициент чувствительности защиты (ее чувствительного органа) $k_{\text{ч}}$ по (2.26) в соответствии с п. 5.1.10.

Схемы замещения для расчетных видов КЗ в защищаемой зоне и соответствующие им токи приведены на рис. 5.1,*д*—*к*.

Результаты расчетов $k_{\text{ч}}$ сведены в табл. 5.3. Из табл. 5.3 следует, что чувствительность защиты обеспечивается с большим запасом. Указанное подтверждает то обстоятельство, что расчет чувствительности дифференциальной защиты, выполненной с реле типа ДЗТ-21, как правило, производить не требуется.

5.3.2.15. Следует отметить, что для рассматриваемого автотрансформатора мощностью 125 МВ·А более целесообразным с точки зрения обеспечения большей чувствительности к повреждениям в линейном регулировочном трансформаторе (в примерах рассмотрены КЗ за реактором) является использование отдельной дифференциальной токовой защиты цепей стороны низшего напряжения автотрансформатора (см. гл. 7) и включение рассмотренной дифференциальной защиты автотрансформатора на встроенные в автотрансформатор со стороны НН трансформаторы тока (см. «Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 13А» п. 2.1.2).

6. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ОШИНОВКИ ВЫСШЕГО (СРЕДНЕГО) НАПРЯЖЕНИЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

6.1. УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ

6.1.1. Ниже даны основные указания по расчету дифференциальной токовой защиты ошиновки высшего (среднего) напряжения автотрансформаторов, выполненной с реле серии ДЗТ-11 (см. «Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 13А», рис. 2.2).

Защита присоединяется к трансформаторам тока, встроенным во втулки высшего (среднего) напряжения автотрансформатора, и к выносным, установленным в цепях выключателей высшего (среднего) напряжения или встроенным во втулки этих выключателей, трансформаторам тока. Тормозная обмотка НТТ реле присоединяется к одному из трансформаторов тока, установленных в цепях выключателя высшего (среднего) напряжения, примыкающего к более мощной части сети. Указанное обеспечивает отсутствие торможения при КЗ в зоне действия защиты в режиме опробования автотрансформатора со стороны среднего (высшего) напряжения и меньшее значение минимального первичного тока срабатывания защиты (при отсутствии торможения), т. е. бо́льшую чувствительность защиты.

Настоящие указания могут использоваться также при расчете дифференциальной токовой защиты ошиновки высшего напряжения трансформатора.

6.1.2. Первичный ток срабатывания защиты выбирается по условию отстройки от расчетного максимального первичного тока небаланса $I_{нб,расч}$ при переходном режиме внешнего КЗ в случае отсутствия торможения, т. е. при отключенном выключателе, на ток в цепи которого включена тормозная обмотка НТТ реле. При этом должно рассматриваться КЗ, внешнее по отношению к дифференциальным защитам собственно автотрансформатора и его ошиновок.

Отстройка производится по (2.1), в котором $k_{отс}$ принимается равным 1,5.

6.1.3. Недействие защиты при внешних КЗ на стороне, где установлена рассматриваемая защита, в случаях, когда на этой стороне включены оба выключателя и токи КЗ частично или полностью не ограничиваются сопротивлением автотрансформатора, обеспечивается торможением.

Расчет требуемого числа витков тормозной обмотки НТТ реле производится по (3.4), в котором $w_{раб}$ — расчетное или принятое число витков рабочей обмотки НТТ реле, присоединенной к тем же трансформаторам тока, что и тормозная обмотка.

6.1.4. Чувствительность защиты оценивается при металлическом КЗ между двумя фазами и при замыканиях на землю одной фазы на ошиновке высшего (среднего) напряжения в режиме опробования автотрансформатора, как правило, со стороны среднего (высшего) напряжения и работе автотрансформатора на расчетном ответвлении.

Расчетными режимами работы подстанции и питающих систем являются реальные режимы, обусловливающие минимальный ток при расчетном виде КЗ.

Коэффициент чувствительности $k_ч$ определяется по (2.26) в соответствии с п. 2.1.7, поскольку в рассматриваемом случае торможение отсутствует.

В соответствии с ПУЭ (п. 3.2.21) при КЗ на ошиновке высшего (среднего) напряжения автотрансформатора в режиме опробования требуется обеспечить наименьший коэффициент чувствительности — порядка 1,5.

7. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ЦЕПЕЙ СТОРОНЫ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

7.1. УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ

7.1.1. Ниже даны основные указания по расчету дифференциальной токовой защиты цепей стороны низшего напряжения автотрансформаторов, выполненной с реле серии ДЗТ-11 (см. «Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 13А», рис. 2.1 и 2.3).

Защита присоединяется к трансформаторам тока, встроенным во втулки низшего напряжения автотрансформатора, и к выносным трансформаторам тока, установленным на ответвлениях к секциям шин 6—10 кВ. Тормозная обмотка НТТ реле включается на сумму токов выносных трансформаторов тока, что обеспечивает отсутствие торможения при КЗ в защищаемой зоне.

7.1.2. Первичный минимальный ток срабатывания защиты выбирается по следующим условиям.

7.1.2.1. При наличии на стороне низшего напряжения автотрансформатора линейного регулировочного трансформатора — по условию отстройки от броска намагничивающего тока в линейном регулировочном трансформаторе при включении его под напряжение; при этом наибольшее значение рассматриваемого намагничивающего тока будет в случае, когда магнитопроводы обоих элементов линейного регулировочного трансформатора (последовательного трансформатора и регулировочного автотрансформатора) насыщаются, а магнитопровод основного автотрансформатора не насыщается.

Расчет производится по (2.2), в котором значение k принимается равным 1,2—1,5, а ток $I_{ном}$ равным $I_{эм,рег,ном}$ — номинальному току, соответствующему электромагнитной мощности линейного регулировочного трансформатора, определяемому по выражению

$$I_{эм,рег,ном} = I_{л,рег,ном} k_п, \qquad (7.1)$$

где $I_{л,рег,ном}$ — номинальный ток линейного регулировочного трансформатора («ток в линии»), соответствующий среднему положению переключающего устройства; $k_п$ — коэффициент трансформации последовательного трансформатора, определяемый по выражению (см. приложение П6):

$$k_п = \frac{U_{л,доб,кр}}{U_{Iном}}, \qquad (7.2)$$

где $U_{л,доб,кр}$ — линейное добавочное напряжение при работе регулировочного автотрансформатора на крайнем ответвлении; $U_{Iном}$ — номинальное линейное напряжение линейного регулировочного трансформатора.

7.1.2.2. При отсутствии на стороне низшего напряжения автотрансформатора линейного регулировочного трансформатора — по условию обеспечения заданной чувствительности в защищаемой зоне; при этом рекомендуется принимать коэффициент чувствительности $k_ч \geqslant 2{,}0$.

7.1.3. Числа витков рабочих обмоток НТТ реле, соответствующих минимальному току срабатывания защиты $I_{с,з min}$, определяются по (2.18) и (2.20) в соответствии с п. 3.1.4.

7.1.4. Недействие защиты при внешних КЗ на стороне низшего напряжения обеспечивается торможением.

Расчет требуемого числа витков тормозной обмотки НТТ реле производится по выражению (3.4), в котором $w_{раб}$ — расчетное или принятое число витков рабочей обмотки НТТ реле, присоединенной к выносным трансформаторам тока, установленным на ответвлениях к секциям шин 6—10 кВ.

7.1.5. Чувствительность защиты оценивается при металлическом КЗ между двумя фазами коэффициентом

чувствительности $k_ч$, определяемым исходя из того, что при КЗ в защищаемой зоне торможение отсутствует:

$$k_ч = \frac{I^{(2)}_{кmin}}{I_{с,зmin}}, \qquad (7.3)$$

где $I^{(2)}_{кmin}$ — минимальное значение периодической составляющей тока КЗ при замыкании между двумя фазами в защищаемой зоне; $I_{с,зmin}$ — минимальный ток срабатывания защиты, определяемый числом использованных витков рабочей обмотки НТТ реле, присоединенной к трансформаторам тока, встроенным во втулки низшего напряжения автотрансформатора.

При наличии на стороне низшего напряжения автотрансформатора линейного регулировочного трансформатора или токоограничивающего реактора чувствительность проверяется при КЗ за этими элементами; КЗ между последовательным трансформатором и регулировочным автотрансформатором может не рассматриваться, если (как это и выполняется в настоящее время) оба эти элемента линейного регулировочного трансформатора располагаются в одном баке и защищаются газовым реле и реле давления.

Чувствительность защиты определяется при работе силового автотрансформатора и линейного регулировочного трансформатора на расчетных ответвлениях. Расчетными режимами работы подстанции и питающих систем являются реально возможные режимы, обусловливающие минимальный ток КЗ.

В соответствии с ПУЭ (п. 3.2.21) при КЗ на выводах низшего напряжения автотрансформатора и за линейным регулировочным трансформатором требуется обеспечить наименьший коэффициент чувствительности — примерно 2,0, а при КЗ за токоограничивающим реактором — 1,5.

7.2. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТА

В соответствии с приведенными в п. 7.1 указаниями расчет дифференциальной защиты цепей стороны низшего напряжения, выполненной с реле серии ДЗТ-11, производится в следующем порядке.

7.2.1. При наличии на стороне низшего напряжения автотрансформатора линейного регулировочного трансформатора.

7.2.1.1. Определяется первичный ток $I_{ном}$ на стороне низшего напряжения силового автотрансформатора, соответствующий его проходной мощности.

По этому току определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты $I_{I в}$ и $I_{II в}$, исходя из коэффициентов трансформации трансформаторов тока K_I (выбираются с учетом параметров используемого оборудования, его перегрузочной способности, требований релейной защиты и схемы соединения трансформаторов тока) и коэффициентов схемы $k_{сх}$.

7.2.1.2. Тормозная обмотка НТТ реле включается на сумму выносных трансформаторов тока в соответствии с рекомендациями п. 7.1.1.

7.2.1.3. Определяется первичный ток срабатывания защиты по (2.2) с учетом (7.1). Значение номинального тока линейного регулировочного трансформатора $I_{л,рег,ном}$, входящего в (7.1), принимается на основании технических данных линейного регулировочного трансформатора (см., например, табл. 7.1), значение коэффициента трансформации последовательного трансформатора определяется по (7.2).

7.2.1.4. Определяется число витков рабочей обмотки НТТ реле, соответствующее току срабатывания защиты для основной и неосновной сторон. Расчет производится в соответствии с п. 3.1.4 по выражениям (2.18) и (2.20) в той же последовательности, что и для защиты, выполненной с реле серии РТН-560 (см. пп. 2.2.6 и 2.2.7). При этом учитывается, что минимальная МДС срабатывания при отсутствии торможения $F_{с,рmin}$ для реле серии ДЗТ-11 также равна 100 А.

В случае необходимости полученные числа витков рабочей обмотки НТТ реле уточняются в соответствии с техническими возможностями реле серии ДЗТ-11 (см. п. 7.3.2.3).

7.2.1.5. Определяется необходимое число витков тормозной обмотки НТТ реле в соответствии с п. 3.1.6.

Для этого при внешних КЗ, отстройка от которых производится с помощью торможения, в расчетных режимах работы подстанции и питающих систем определяется первичный тормозной ток $I_{торм}$ и первичный ток небаланса $I_{нб,расч}$ по выражениям (2.3)—(2.6).

Определяется необходимое число витков тормозной обмотки НТТ реле $w_{торм}$ по (3.4).

7.2.1.6. Определяются первичные токи в месте КЗ и коэффициенты чувствительности при металлических КЗ между двумя фазами в защищаемой зоне в расчетных по чувствительности режимах работы подстанции и питающих систем.

Расчет производится по (7.3) в соответствии п. 7.1.5.

7.2.2. При отсутствии на стороне низшего напряжения автотрансформатора линейного регулировочного трансформатора.

7.2.2.1. Производятся расчеты в соответствии с п. 7.2.1.1 и выполняются рекомендации п. 7.2.1.2.

7.2.2.2. Определяется первичный ток срабатывания защиты по условию обеспечения заданной чувствительности в защищаемой зоне в соответствии с рекомендациями п. 7.1.2.2. Для этого производятся расчеты по п. 7.1.5.

7.2.2.3. Далее расчеты выполняются в соответствии с рекомендациями пп. 7.2.1.4, 7.2.1.5.

7.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ЦЕПЕЙ СТОРОНЫ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРА

7.3.1. В настоящем примере дан расчет дифференциальной токовой защиты с реле серии ДЗТ-11 цепей стороны низшего напряжения автотрансформатора 230/121/11 кВ мощностью 125 МВ·А при наличии на стороне низшего напряжения линейного регулировочного трансформатора мощностью 40 МВ·А.

Для данного примера использованы исходные данные и расчетые сопротивлений питающих систем и автотрансформаторов, которые были приведены в примере расчета защиты автотрансформатора с реле серии ДЗТ-21 (см. п. 5.3.1 и рис. 5.1,*а*, *б*, *д*, *е*).

Исходная схема цепей стороны низшего напряжения приведена на рис. 7.1,*а*. Параметры линейного регулировочного трансформатора ЛТДН-40000 11±15% кВ даны в табл. 7.1. Сопротивления линейного регулировочного трансформатора, Ом, приведенные к низшему напряжению на выводах силового автотрансформатора, определены при крайних положениях переключающего устройства регулировочного автотрансформатора в соответствии с приложением П6 по выражению (П6.13):

при положительном регулировании

$$Z_{л,рег} = \frac{10{,}6 \cdot 1650}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 2471} = 0{,}0409 \text{ Ом}.$$

при отрицательном регулировании

$$Z_{л,рег} = \frac{7{,}8 \cdot 1650}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 1825{,}2} = 0{,}0407 \text{ Ом}.$$

На схемах замещения (см. рис. 5.1,*б* и *д*) дано одно значение сопротивления линейного регулировочного трансформатора, Ом, приведенное к стороне высшего напряжения 220 кВ, так как разница между значениями

Таблица 7.1

Положение указателя переключателя	Напряжение добавочное (линейное) $U_{л.доб}$, В	Ток в линии $I_{л.рег.ном}$, А	$u_к$, %		
			регулировочного трансформатора в целом	регулировочного автотрансформатора	последовательного трансформатора
1	+1650	2471	10,6	0	10,57
2	+1485	2428	11,7	0,09	11,53
3	+1320	2386,5	13,1	0,31	12,75
4	+1155	2346,1	15,0	0,6	14,35
5	+990	2307,6	17,4	0,9	16,43
6	+825	2270,1	20,7	1,16	19,42
7	+660	2233,8	25,3	1,31	23,89
8	+495	2198,7	32,8	1,32	31,35
9	+330	2164,6	47,6	1,13	46,3
10	+165	2131,5	92,2	0,7	91,18
11	0	2099,5	—	—	—
12	0	2099,5	—	—	—
13	0	2099,5	—	—	—
14	—165	2068,4	89,5	0,69	88,48
15	—330	2038,2	44,8	1,06	43,59
16	—495	2008,9	30,0	1,21	28,65
17	—660	1980,4	22,4	1,16	21,18
18	—825	1952,7	17,8	1,0	16,71
19	—990	1925,6	14,5	0,75	13,73
20	—1155	1899,6	12,1	0,49	11,61
21	—1320	1874,1	10,3	0,25	10,02
22	—1485	1849,3	8,9	0,07	8,79
23	—1650	1825,2	7,8	0	7,81

сопротивлений при крайних положениях переключающего устройства регулировочного автотрансформатора незначительна.

Сопротивление реактора рассчитано также при двух крайних положениях переключающего устройства регулировочного автотрансформатора, соответствующих минимальному и максимальному коэффициенту трансформации последнего.

Коэффициент трансформации последовательного трансформатора определяется по выражению (7.2)

$$k_п = \frac{1650}{11\,000} = 0,15.$$

7.3.2. Расчет защиты производится в следующем порядке.

7.3.2.1. Определяется первичный ток на стороне низшего напряжения силового автотрансформатора, соответствующий его проходной мощности; по этому току

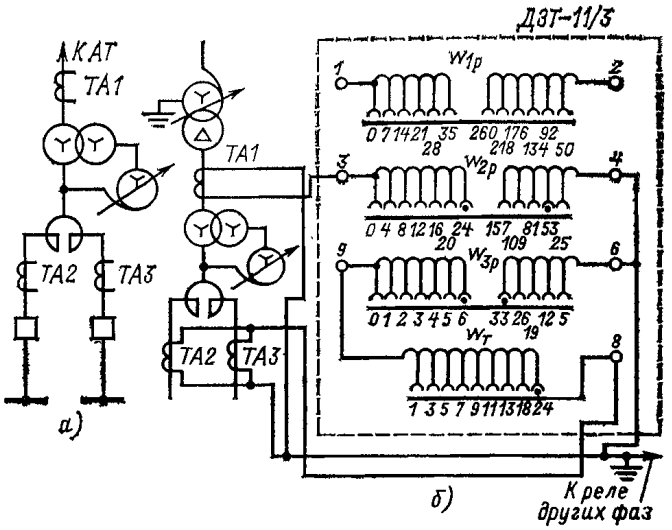


Рис. 7.1. Пример расчета дифференциальной токовой защиты цепей стороны низшего напряжения автотрансформатора:

а — **исходная схема (см. также рис. 5.1,*а*); *б* — схема включения реле типа ДЗТ-11/3**

определяются вторичные токи в плечах защиты, исходя из коэффициентов трансформации трансформаторов тока K_I (см. п. 2.2.1) и коэффициентов схемы $k_{сх}$. Расчеты сведены в табл. 7.2.

7.3.2.2. Предварительно определяется первичный ток срабатывания защиты по условию отстройки от броска намагничивающего тока в линейном регулировочном трансформаторе при включении его под напряжение по (2.2) с учетом (7.1)

$$I_{с.з} = 1,5 \cdot 2099,5 \cdot 0,15 = 472 \text{ А}.$$

7.3.2.3. Определяется число витков обмотки НТТ реле для основной (*ТА1* на рис. 7.1,*а*) и неосновной (*ТА2* и *ТА3*) сторон в соответствии с рекомендациями п. 2.1.6 по (2.18) и (2.20). Расчеты сведены в табл. 7.3. Расчетное число витков $w_{осн.расч}$ равно 254 (см. п. 2 табл. 7.3). Однако максимальное число витков, которое может быть принято для основной стороны, ограничено техническими данными реле серии ДЗТ-11. По допустимым значениям тока в реле серии ДЗТ-11 в нормальном режиме с учетом возможных перегрузок

$$\left(I_{доп.реле} \geqslant I_{в.ТА1} = \frac{1,4 I_{л.рег.ном}}{K_{ITA1}} = \frac{1,4 \cdot 2471}{6000/5} = 2,88 \text{ А} \right)$$

для основной стороны может быть исполь-

Таблица 7.2

Наименование величины	Числовое значение для трансформатора тока	
	ТА1	*ТА2, ТА3*
Первичный ток на стороне низшего напряжения силового автотрансформатора, соответствующий его проходной мощности, А	$\frac{125\,000}{\sqrt{3} \cdot 11} = 6568$	
Схема соединения трансформаторов тока	У	У
Коэффициент трансформации трансформаторов тока K_I	6000/5	3000/5
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий проходной мощности силового автотрансформатора, А	$\frac{6568}{6000/5} = 5,47$	$\frac{6568}{3000/5} = 10,94$

Таблица 7.3

№ п/п.	Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
1	Ток срабатывания реле на основной стороне, А	$I_{с.р.осн}=\frac{I_{с.з}}{K_{I10}}$	$\frac{472}{6000/5}=0,394$
2	Расчетное число витков обмотки НТТ реле на основной стороне	По (2.18) $w_{осн.расч}=\frac{F_{с.р}}{I_{с.р.осн}}$	$\frac{100}{0,394}=254$
3	Принятое число витков обмотки НТТ реле для установки на основной стороне	$w_{осн}=w_{2р}$	77
4	Расчетное число витков обмотки НТТ на неосновной стороне	По (2.20) $w_{Iрасч}=w_{осн}\frac{I_{осн.в}}{I_{Iв}}$	$77\ \frac{5,47}{10,94}=38,5$
5	Принятое число витков обмотки НТТ реле для установки на неосновной стороне	$w_{I}=w_{3р}$	39
6	Ток срабатывания защиты на основной стороне, А	$I_{с.з}=\frac{F_{с.р}}{w_{осн}}\frac{K_{I10}}{k_{сх}}$	$\frac{100}{77}\cdot\frac{6000/5}{1}=1560$

зована часть обмотки $w_{2р}$ реле типа ДЗТ-11/3, имеющая 77 витков, для которой $I_{доп.реле}=3,5$ А. Поэтому принятое число витков основной обмотки НТТ реле (см. п. 3, табл. 7.3) равно 77.

7.3.2.4. Ток срабатывания защиты, определяемый числом используемых витков обмотки НТТ реле для основной стороны, $I_{с.з}=1560$ А.

7.3.2.5. Выбирается необходимое число витков тормозной обмотки НТТ реле в соответствии с п. 7.1.4. Для этого рассматривается внешнее КЗ между тремя фазами на стороне низшего напряжения в точке K_6 (см. рис. 5.1,*б*) при параллельной работе двух автотрансформаторов в максимальном режиме работы систем высшего и среднего напряжений.

Определяется первичный ток небаланса и необходимое число витков тормозной обмотки, исходя из полученного значения тока внешнего КЗ. Расчеты по п. 7.3.2.5 сведены в табл. 7.4.

Принимается к использованию ближайшее большее число витков $w_{торм}=24$ витка. Схема включения реле с указанием числа используемых витков рабочих и тормозной обмоток НТТ реле приведена на рис. 7.1,*б*.

7.3.2.6. Определяется чувствительность защиты при КЗ между двумя фазами в защищаемой зоне в точке K_4 (см. рис. 5.1,*а*) при отключенной системе среднего напряжения и работе системы высшего напряжения в минимальном режиме. Определяется коэффициент чувствительности, исходя из тока КЗ и тока срабатывания защиты в соответствии с п. 7.2.1.6, по (7.3)

$$k_{ч}=\frac{458\frac{230}{11}}{1560}=6,1.$$

Таблица 7.4

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
Первичный расчетный ток небаланса с учетом составляющей $I'''_{нб.расч}$, А	По (2.3) с учетом (2.4) — (2.6) $I_{нб.расч}=\left(k_{пер}k_{одн}\varepsilon+\Delta U k_{ток}+\left\|\frac{w_{Iрасч}-w_{I}}{w_{Iрасч}}\right\|\right)I_{кmax}$	$\left(1\cdot1\cdot0,1+0,15\cdot1+\left\|\frac{38,5-39}{38,5}\right\|\right)701=184$
Расчетное число витков тормозной обмотки НТТ реле	По (3.4) $w_{торм.расч}=k_{отс}\frac{I_{нб.расч}w_{раб.расч}}{I_{торм}\operatorname{tg}\alpha}$	$\frac{1,5\cdot184\cdot38,5}{701\cdot0,75}=20,5$
Принятое число витков тормозной обмотки НТТ реле	$w_{торм}=w_{т}$	24

8. ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ МНОГОФАЗНЫХ КЗ

8.1. УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ

8.1.1. Ниже даны основаные указания по выявлению необходимости установки и расчету дистанционной защиты автотрансформатора от многофазных КЗ, выполненной с помощью панели (либо двух панелей) типа ПЗ-5 (или ПЭ2105), которая содержит два комплекта реле сопротивления: типа КРС-2 — первая ступень и типа КРС-3 — вторая ступень (см. «Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 13А», рис. 2.1—2.3 и 3.1).

8.1.2. Установка дистанционной защиты автотрансформаторов может потребоваться по условиям обеспечения:

8.1.2.1. Согласования защит смежных линий с защитами автотрансформатора.

8.1.2.2. Дальнего резервирования в сетях высшего или среднего напряжения.

Одновременно защита может частично резервировать основные защиты автотрансформатора.

Использование дистанционной защиты по условию 8.1.2.1 может оказаться необходимым в случаях, когда при отстройке вторых ступеней дистанционных защит, установленных на противоположных концах смежных линий высшего или среднего напряжения, от КЗ за рассматриваемым автотрансформатором чувствительность этих ступеней к КЗ в конце защищаемой линии не обеспечивается.

При согласовании рассматриваемых вторых ступеней дистанционных защит линий с первыми ступенями защит линий за автотрансформатором (например, вторых ступеней защит линий высшего напряжения подстанции с первыми ступенями защит линий среднего напряжения) может иметь место неселективное действие этих вторых ступеней при отказе первой ступени защиты линии за автотрансформатором (например, линии среднего напряжения), с которой производилось согласование, а также при отказе ее выключателя с отказом УРОВ или при КЗ на шинах за автотрансформатором (например, на шинах среднего напряжения) и отказе срабатывания или выводе из работы защиты этих шин. Поэтому в рассматриваемом случае целесообразно согласовывать вторые ступени дистанционной защиты смежных линий со специально устанавливаемой дистанционной защитой автотрансформатора (первая ступень).

На автотрансформаторах с высшим напряжением 220 кВ указанное согласование необходимо в первую очередь при отсутствии на линиях смежного напряжения полноценного ближнего резервирования.

Использование дистанционной защиты по условию 8.1.2.2 может оказаться необходимым для отключения КЗ на смежной линии, например среднего напряжения, при отказе срабатывания ее защиты или выключателя (в последнем случае — при отказе срабатывания УРОВ), если при этом не обеспечивается чувствительность других резервных защит автотрансформатора от многофазных КЗ (токовой защиты обратной последовательности и максимальной токовой защиты с пуском напряжения).

Дистанционная защита, как и другие резервные защиты автотрансформатора, с первой выдержкой времени действует на деление шин (на отключение шиносоединительного или секционного выключателя), что обеспечивает повышение эффективности дальнего резервирования, т. е. повышение чувствительности защит смежных присоединений и уменьшение числа неселективных отключений. Последнее наиболее эффективно при действии первой ступени защиты, поэтому использование этой ступени принципиально целесообразно, даже если оно не требуется по условию 8.1.2.1, особенно при отсутствии на отходящих линиях полноценного ближнего резервирования (см. «Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 13А»). Однако, учитывая малую вероятность указанных неселективных отключений при сравнительно редких многофазных КЗ, применительно к автотрансформаторам с высшим напряжением 220 кВ следует рассматривать возможность отказа в целях упрощения от первой ступени при наличии на отходящих линиях ближнего резервирования защит, если эта ступень не требуется по условию 8.1.2.1.

8.1.3. Установка дистанционной защиты на автотрансформаторе по условию 8.1.2.1 требуется, если удовлетворяется следующее неравенство:

$$\underline{Z}^{II}_{с.з.л} = 0{,}87\left(\underline{Z}_л + \frac{\underline{Z}_{ат.ВН\text{-}СН}}{k_{ток.л}}\right) < k_ч \underline{Z}_л, \quad (8.1)$$

где $\underline{Z}^{II}_{с.з.л}$ — сопротивление срабатывания второй ступени защиты, установленной на противоположном конце линии, определенное по условию отстройки от КЗ за рассматриваемым автотрансформатором; $\underline{Z}_л$ — сопротивление рассматриваемой линии; $\underline{Z}_{ат.вн\text{-}сн}$ — минимально возможное с учетом регулирования сопротивление рассматриваемого автотрансформатора между сторонами высшего и среднего напряжений, приведенное к напряжению рассматриваемой линии; $k_{ток.л}$ — коэффициент токораспределения, равный отношению тока в линии к току в автотрансформаторе при КЗ за автотрансформаторами; $k_ч$ — требуемый ПУЭ коэффициент чувствительности дистанционной защиты к КЗ в конце защищаемой линии; принимается равным 1,25.

Следует отметить, что для автотрансформаторов с высшим напряжением 330 кВ и выше коэффициент токораспределения $k_{ток}$ может быть комплексной величиной из-за учета предшествующего реального нагрузочного режима сети.

Если не учитывать углы величин $\underline{Z}_л$, $\underline{Z}_{ат.вн\text{-}сн}$ и $k_{ток.л}$, то условие (8.1) может быть переписано в следующем виде:

$$Z_л > \frac{0{,}87 Z_{ат.ВН\text{-}СН}}{k_{ток.л}(1{,}25 - 0{,}87)} = 2{,}3\frac{Z_{ат.ВН\text{-}СН}}{k_{ток.л}}. \quad (8.2)$$

Используя (8.2) и значения параметров автотрансформаторов с высшим напряжением 220—500 кВ, приведенные в табл. 8.1, можно ориентировочно оценить, при какой протяженности линий высшего или среднего напряжения на рассматриваемых автотрансформаторах потребуется установка дистанционной защиты по условию 8.1.2.1.

Результаты такой оценки для случая, когда при отстройке от КЗ за автотрансформатором должен рассматриваться режим отсутствия подпитки и при наличии на подстанции одного ($k_{ток.л} = 1{,}0$) и двух ($k_{ток.л} = 2$) и автотрансформаторов, приведены в табл. 8.2.

8.1.4. При установке дистанционной защиты по условию 8.1.2.2 следует учитывать возможность смещения в первый квадрант комплексной плоскости характеристики реле сопротивления второй ступени защиты (комплект КРС-3 панели), что облегчает обеспечение дальнего резервирования.

Однако указанное смещение характеристики в случае, когда при этом она не охватывает начало смежной линии, защита которой резервируется, допустимо лишь при условии, что в зоне недействия рассматриваемой второй ступени дистанционный защиты с запасом обеспечивается действие ее первой ступени или токовой защиты обратной последовательности и максимальной токовой защиты с пуском напряжения автотрансформатора.

8.1.5. В целях упрощения следует стремиться устанавливать на автотрансформаторе с высшим напряжением 220 кВ одну панель дистанционной защиты. При этом в общем случае первая ступень панели может использоваться как по условию 8.1.2.1, так и по условию 8.1.2.2, т. е. в качестве второй ступени за-

Таблица 8.1

Тип и номинальная мощность автотрансформатора, МВ·А	Номинальные напряжения автотрансформатора на сторонах, кВ			$u_к$, % ВН-СН	$X_{ат}$, ВН-СН, приведенное к стороне, Ом	
	ВН	СН	НН		ВН	СН
АТДТН-32	230	121—12 % 121 121+12 %	6,6; 11; 38,5	20 11 7	330,6 181,8 115,7	70,9 50,3 40,2
АТДЦТН-63	230	121—12 % 121 121+12 %	6,6; 11; 38,5	21 11 7	176,3 92,4 58,8	22,4 25,6 20,4
АТДЦТН-125	230	121—12 % 121 121+12 %	6,6; 11; 13,8; 38,5	18,9 11 6,8	80 46,6 28,8	17,1 12,9 10
АТДЦТН-200	230	121—12 % 121 121+12 %	6,6; 11; 13,8; 15,75; 38,5	19,4 11 6,7	51,3 29,1 17,7	11 8,1 6,2
АТДЦТН-250	230	121—12 % 121 121+12 %	11; 13,8; 15,75; 38,5	20,9 11 7,1	21,7 11,4 7,4	9,5 6,5 5,2
АТДЦТН-125	330	115—12 % 115 115+12 %	6,6; 11; 15,75; 38,5	10,3 10 10,8	89,7 87,1 94,1	8,4 10,6 14,3
АТДЦТН-200	330	115—12 % 115 115+12 %	6,6; 11; 15,75; 38,5	10,6 10 11	57,7 54,5 59,9	5,4 6,6 9,1
АТДЦТН-125	500	121	6,6; 11; 38,5	10,5	210	12,3
АТДЦТН-250	500	121	11; 38,5	10.5	105	6,2
АОДЦТН-167	$\frac{500}{\sqrt{3}}$	$230/\sqrt{3}$— —12,36 % $230/\sqrt{3}$ $230/\sqrt{3}$+ +12,36 %	11; 13,8; 15,75; 20; 38,5	12 11 12	60 55 60	9,7 11,6 16
АОДЦТН-267	$\frac{500}{\sqrt{3}}$	$230/\sqrt{3}$— —11,2 % $230/\sqrt{3}$ $230/\sqrt{3}$+ +11,2 %	11; 13,8; 15,75; 20; 38,5	9 8,5 9,5	28,2 26,6 29,7	4,7 5,6 7,8
АОДЦТН-167	$\frac{500}{\sqrt{3}}$	$330/\sqrt{3}$— —12 % $330/\sqrt{3}$ $330/\sqrt{3}$+ +12 %	11; 38,5	13,5 9,5 10	67,5 47,5 50	22,8 20,7 27,3

щиты, поскольку при выборе назначения ступеней панели предпочтение следует отдавать осуществлению дальнего резервирования. В последнем случае рекомендуется использование эллиптической характеристики.

На автотрансформаторах с высшим напряжением 330 кВ и выше, как правило, устанавливаются две панели.

8.1.6. Схема подключения цепей тока защиты определяется в зависимости от назначения данной ступени. Как правило, цепи тока подключаются к трансформаторам тока на той стороне автотрансформатора, в которую направлена рассматриваемая ступень. Однако при использовании ступени для осуществления ближнего резервирования основных защит автотрансформатора (см. п. 8.1.2) и направленности ее в сторону шин среднего (высшего) напряжения, цепи тока этой ступени должны подключаться к трансформаторам тока на стороне высшего (среднего) напряжения автотрансформатора так, чтобы последний входил в зону действия ступени. Из-за такого включения ток в рассматриваемой ступени при КЗ за автотрансформатором будет зависеть от положения РПН последнего, что приводит к уменьшению чувствительности защиты (см. также п. 8.1.8).

Таблица 8.2

Номинальная мощность автотрансформатора, МВ·А	Номинальное напряжение сети, кВ		Длина линий, км, при которой в отсутствие подпитки потребуется установка на подстанции дистанционной защиты по условию согласования с ней защиты линий (п. 8.1.2.1)			
			в сети ВН		в сети СН	
	ВН	СН	при двух автотрансформаторах на ПС	при одном автотрансформаторе на ПС	при двух автотрансформаторах на ПС	при одном автотрансформаторе на ПС
32	220	110	⩾332,3	665	115,5	231
63	220	110	169	338	58,5	117,4
125	220	110	82,8	165,5	28,7	57,5
200	220	110	50,9	102	17,8	35,7
250	220	110	21,3	42,5	15	30
125	330	110	324	626	30,2	60,4
200	330	110	196,5	392	19,4	38,8
125	500	110	805	1610	47,2	94
250	500	110	402	805	23,8	47,5
167×3	500	220	210,5	422	37,2	74,4
267×3	500	220	102	204	18	36
167×3	500	330	182	364	79,2	158,8

Примечание. Удельные сопротивления линий принимались: 0,4 Ом/км для линий 110 и 220 кВ; 0,32 Ом/км для линий 330 кВ; 0,3 Ом/км для линий 550 кВ.

8.1.7. Цепи напряжения защиты могут в общем случае включаться на фазные напряжения (относительно нулевой точки системы) трансформатора напряжения, установленного непосредственно на выводах низшего напряжения автотрансформатора, или на междуфазные напряжения трансформатора напряжения, установленного на шинах среднего или высшего напряжения. Последнее целесообразно в случаях, когда обе ступени защиты включаются на трансформаторы тока, установленные на той же стороне автотрансформатора, на которой установлен используемый для защиты трансформатор напряжения. При таком включении обеспечивается максимальная чувствительность при внешних КЗ защиты, направленной в сторону сети.

Использование трансформатора напряжения стороны низшего напряжения наиболее целесообразно при включении ступеней защиты на трансформаторы тока разных сторон автотрансформатора. Однако в этом случае напряжение в защите при КЗ на стороне среднего напряжения автотрансформатора будет зависеть от положения РПН последнего, что приводит к уменьшению чувствительности защиты.

8.1.8. Первичное сопротивление срабатывания первой ступени защиты, используемой для обеспечения согласования защит смежных линий по условию 8.1.2.1 $Z^{I}_{с,з,ат}$ при включении ее на трансформатор напряжения, установленный на выводах низшего напряжения автотрансформатора, выбирается:

при направленности характеристики реле к шинам среднего напряжения — по условию согласования с первыми ступенями защит смежных линий среднего напряжения

$$Z^{I}_{с,з,ат} \leqslant \frac{Z_{ат,СН}}{1+\beta+\delta} + \frac{1-\alpha}{1+\beta+\delta}\frac{Z^{I}_{с,з,л,СН}}{k_{ток,ат,СН}} = 0{,}87Z_{ат,СН} + 0{,}78\frac{Z^{I}_{с,з,л,СН}}{k_{ток,ат,СН}}. \quad (8.3)$$

(Здесь и в дальнейшем все входящие в выражения сопротивления должны быть приведены к одной и той же ступени напряжения);

при направленности характеристики реле к шинам (ошиновке) высшего напряжения — по условию согласования с первыми ступенями защит смежных линий высшего напряжения

$$Z^{I}_{с,з,ат} \leqslant \frac{Z_{ат,ВН}}{1+\beta+\delta} + \frac{1-\alpha}{1+\beta+\delta}\frac{Z^{I}_{с,з,л,РН}}{k_{ток,ат,ВН}} = 0{,}87Z_{ат,ВН} + 0{,}78\frac{Z^{I}_{с,з,л,ВН}}{k_{ток,ат,ВН}}, \quad (8.4)$$

где $Z^{I}_{с,з,л,СН}$ и $Z^{I}_{с,з,л,ВН}$ — первичные сопротивления срабатывания первой ступени защиты линии соответственно среднего и высшего напряжений; $k_{ток,ат,СН}$ и $k_{ток,ат,ВН}$ — коэффициенты токораспределения, равные отношению тока в автотрансформаторе к току в линии соответственно среднего и высшего напряжений в расчетном по согласованию случае КЗ, при этом расчетным явится КЗ в таком реально возможном режиме работы, которому соответствует наибольший коэффициент токораспределения; α — погрешность трансформаторов тока и релейной аппаратуры в сторону уменьшения защищаемой зоны, принимается равной 0,1; β — погрешность трансформаторов напряжения с учетом падения напряжения в их цепях и релейной аппаратуры в сторону увеличения защищаемой зоны, принимается равной 0,05; δ — погрешность, вызванная неточностью расчета первичных электрических величин, и необходимый запас, принимается равной 0,1; $Z_{ат,ВН}$ и $Z_{ат,СН}$ — минимально возможное (с учетом регулирования) сопротивление обмоток соответственно высшего и среднего напряжений рассматриваемого автотрансформатора, приведенное к напряжению рассматриваемой линии.

Выражения (8.3) и (8.4) составлены в предположении, что питание со стороны низшего напряжения автотрансформатора отсутствует.

При использовании для защиты трансформатора напряжения, установленного на стороне среднего напряжения автотрансформатора, выражение (8.3) приобретает вид

$$Z^{I}_{с,з,ат} \leqslant \frac{1-\alpha}{1+\beta+\delta}\frac{Z^{I}_{с,з,л,СН}}{k_{ток,ат,СН}} = 0{,}78\frac{Z^{I}_{с,з,л,СН}}{k_{ток,ат,СН}}. \quad (8.3а)$$

При использовании для защиты трансформатора напряжения, установленного на стороне высшего напряжения автотрансформатора, (8.4) приобретает вид

$$Z^{I}_{с,з,ат} \leqslant \frac{1-\alpha}{1+\beta+\delta}\frac{Z^{I}_{с,з,л,ВН}}{k_{ток,ат,ВН}} = 0{,}78\frac{Z^{I}_{с,з,л,ВН}}{k_{ток,ат,ВН}}. \quad (8.4а)$$

В случаях, когда первая ступень подключена к трансформаторам тока, установленным на стороне защиты, согласуемой с рассматриваемой первой ступенью защиты автотрансформатора, т. е. когда автотрансформатор входит в зону, защищаемую рассматриваемой первой ступенью, последняя должна быть дополнительно отстроена от КЗ на элементах стороны низшего напряжения, не имеющих быстродействующей защиты, например на шинах 6—10 кВ данной подстанции. Указанное может недопустимо ограничить чувствительность рассматриваемой ступени.

В целях обеспечения частичного резервирования основных защит автотрансформатора при включении защиты на трансформаторы тока, установленные на той стороне автотрансформатора, в которую направлена рассматриваемая первая ступень, желательно иметь смещение характеристики реле в третий квадрант. Однако это смещение может ограничиваться необходимостью отстройки от КЗ на элементах стороны низшего напряжения, не имеющих быстродействующей защиты.

При включении первой ступени защиты на трансформатор напряжения, установленный на выводах низшего напряжения автотрансформатора, указанное смещение характеристики в третий квадрант необходимо для обеспечения действия рассматриваемой ступени при КЗ на шинах среднего напряжения.

8.1.9. Первичное сопротивление срабатывания второй ступени защиты, используемой для обеспечения дальнего резервирования по п. 8.1.2.2, $Z^{II}_{с,з,ат}$, выбирается по условию отстройки от векторов сопротивлений нагрузки в месте установки защиты в расчетных нагрузочных, в том числе и послеаварийных, режимах. При этом в первую очередь должны рассматриваться режимы, обусловливающие большие углы $\varphi_{нагр}$ при малых сопротивлениях нагрузки $Z_{нагр}$.

Расчет $Z^{II}_{с,з,ат}$ производится по выражениям: для характеристики со смещением ($a \neq 0$)

$$Z^{II}_{с,з,ат} \leqslant \frac{Z_{нагр,расч}}{k} \times \frac{(1+2a)\cos(\varphi_{max\,ч} - \varphi_{нагр}) - \sqrt{(1+2a)^2\cos^2(\varphi_{max\,ч} - \varphi_{нагр}) - 4a(1+a)}}{2a}; \quad (8.5)$$

для характеристики, проходящей через начало координат ($a=0$),

$$Z^{II}_{с,з,ат} \leqslant \frac{Z_{нагр,расч}}{k\cos(\varphi_{max\,ч} - \varphi_{нагр})}, \quad (8.6)$$

где a — смещение характеристики срабатывания второй ступени защиты, отн. ед., (по отношению к уставке при отсутствии смещения, т. е. по отношению к диаметру окружности характеристики срабатывания); при смещении в третий квадрант принимается отрицательным, при смещении в первый квадрант — положительным; $\varphi_{max\,ч}$ — угол максимальной чувствительности реле; $Z_{нагр,расч}$ и $\varphi_{нагр}$ — значение и угол векторов сопротивлений нагрузки в месте установки защиты в расчетных нагрузочных, в том числе и послеаварийных режимах; k — коэффициент, равный произведению коэффициента отстройки $k_{отс}$ на коэффициент возврата $k_{в}$; ориентировочно может быть принят равным 1,25 ($k_{отс}=1{,}2$; $k_{в}=1{,}05$).

Следует отметить, что при выборе смещения a характеристики срабатывания в первый квадрант для автотрансформаторов с высшим напряжением 330 кВ и выше необходимо учитывать возможность емкостного характера $Z_{нагр}$, связанного, например, с внешней емкостной проводимостью линий электропередачи.

Вывод выражений (8.5) и (8.6) дан в приложении П7. В этом же приложении дан анализ выражения (8.5) при различных смещениях, из которого следует, что во всем возможном диапазоне смещений, т. е. при $-0{,}1 \leqslant a \leqslant 0{,}5$, перед квадратным корнем должен учитываться только знак «—». При смещении характеристики срабатывания в первый квадрант ($a>0$) как знак «—», так и знак «+» перед корнем дают положительные значения сопротивления $Z^{II}_{с,з,ат}$, но при использовании знака «—» получается характеристика с меньшим сопротивлением срабатывания, применение которой ограничено тем, что она в ряде случаев не обеспечивает необходимую чувствительность, а при использовании знака «+» получается характеристика с большим сопротивлением срабатывания, которая, однако, оказывается не отстроенной от сопротивлений нагрузки, бо́льших минимально возможного сопротивления $Z_{нагр,расч}$.

При смещении характеристики в первый квадрант на $0{,}1 \leqslant a \leqslant 0{,}5$ обеспечивается отстройка защиты от

Таблица 8.3

Наименование величины	Числовые значения								
Угол ($\varphi_{max\,ч}$—$\varphi_{нагр}$—$\Delta\varphi$) в (8.7) и ($\varphi_{max\,ч}$—$\varphi_{нагр}$) в (8.8), град	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Смещение a не меньше [в (8.7)] или не больше [в (8.8)], отн. ед.	0,5	0,372	0,278	0,205	0,153	0,111	0,077	0,052	0,033

любого по значению сопротивления нагрузки с углом $\varphi_{нагр}$, т. е. отстройка от вектора сопротивления нагрузки по углу, если удовлетворяется выражение

$$a \geqslant \frac{1-\sin(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр}-\Delta\varphi)}{2\sin(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр}-\Delta\varphi)}, \qquad (8.7)$$

где $\Delta\varphi$ — угол, учитывающий погрешность реле, его коэффициент возврата и необходимый запас, принимается 15—5° при смещении $0{,}1 \leqslant a \leqslant 0{,}5$ (бо́льшие значения $\Delta\varphi$ принимаются при меньших смещениях a).

Вывод (8.7) дан в приложении П7.

Из анализа (8.5), который приведен в приложении П7, следует, что при смещении характеристики срабатывания в первый квадрант ($a>0$) действительные значения сопротивления срабатывания $Z^{II}_{с,з,ат}$ могут быть получены только при условии

$$a \leqslant \frac{1-\sin(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})}{2\sin(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})}. \qquad (8.8)$$

Как показал анализ, (8.7) и (8.8) удовлетворяются, если между значениями углов и смещения a соблюдаются соотношения, приведенные в табл. 8.3.

При направлении обеих ступеней в одну сторону и смещении второй ступени в первый квадрант надежное перекрытие зон, охватываемых первой и второй ступенями, т. е. надежное «зацепление» характеристик срабатывания указанных ступеней в случае, когда они имеют одинаковые углы максимальной чувствительности, равные углу сопротивления линии ($\varphi^{I}_{max\,ч}=\varphi^{II}_{max\,ч}=\varphi_{л}$), обеспечивается, если:

$$a \leqslant \frac{0{,}9Z^{I}_{с,\,з,\,ат}-0{,}1Z^{II}_{с,\,з,\,ат}}{1{,}1Z^{II}_{с,\,з,\,ат}-0{,}9Z^{I}_{с,\,з,\,ат}} \qquad (8.9)$$

или

$$Z^{II}_{с,\,з,\,ат} \leqslant \frac{0{,}9(1+a)Z^{I}_{с,\,з,\,ат}}{0{,}1+1{,}1a}, \qquad (8.10)$$

где $Z^{I}_{с,\,з,\,ат}$ и $Z^{II}_{с,\,з,\,ат}$ — сопротивления срабатывания соответственно первой и второй ступеней защиты, направленных в одну сторону.

Вывод (8.9) и (8.10) дан в приложении П7.

В условиях эксплуатации рекомендуется также производить согласование по чувствительности с последними (третьими) ступенями дистанционных защит смежных линий, если при этом обеспечивается требуемая чувствительность (см. п. 8.1.12).

8.1.10. Пригодность выбранного сопротивления срабатывания первой ступени защиты (см. п. 8.1.8) оценивается по чувствительности второй ступени дистанционной защиты линии, для которой потребовалась установка дистанционной защиты автотрансформатора по условию 8.1.2.1.

8.1.11. Выдержка времени первой ступени защиты выбирается по условию согласования с той ступенью (первой, а в отдельных случаях — второй) защит линий, с которой производится согласование по сопротивлению срабатывания, а выдержка времени второй ступени защиты, как правило, — по условию согласования с третьей ступенью защит линий. При этом согласование производится с названной ступенью, имеющей наибольшую выдержку времени из защит смежных линий того напряжения, в сторону которого направлена рассматриваемая ступень защиты автотрансформатора.

Каждая ступень действует последовательно:

на разделение систем (секций) шин с минимальной выдержкой времени, учитывающей минимальное $\Delta t=0{,}3\div0{,}4$ с;

на отключение выключателей той стороны автотрансформатора, куда направлена рассматриваемая ступень;

на выходные реле защит автотрансформатора с выдержкой времени, на ступень большей, чем на отключение выключателя автотрансформатора.

8.1.12. Чувствительность второй ступени защиты проверяется так же, как и третьих ступеней защит линий, — по КЗ в конце зоны резервирования, т. е. при каскадном отключении металлического КЗ в конце смежных линий, защита которых резервируется.

В общем случае при проверке чувствительности должен учитываться угол сопротивления в месте установки защиты в расчетном режиме, определяемый расхождением по фазе ЭДС питающих источников.

Требуемый коэффициент чувствительности в соответствии с ПУЭ $k_{ч}=1{,}2$.

Кроме того, при таком смещении характеристики срабатывания второй ступени в первый квадрант комплексной плоскости, при котором не охватывается начало смежных линий (защита которых резервируется), в соответствии с п. 8.1.4 должно быть обеспечено надежное «зацепление» рассматриваемой характеристики второй ступени с характеристикой первой ступени дистанционной защиты [см. (8.9) и (8.10)] или чувствительность токовой защиты обратной последовательности и максимальной токовой защиты с пуском напряжения автотрансформатора в начале зоны срабатывания рассматриваемой второй ступени дистанционной защиты.

8.1.13. Сопротивление срабатывания реле $Z_{с,р,ат}$ определяется на основании первичного сопротивления срабатывания защиты $Z_{с,з,ат}$, которое предполагается приведенным к стороне, где установлены трансформаторы тока рассматриваемой ступени защиты:

при подключении защиты к трансформаторам тока, установленным на стороне среднего напряжения, и к трансформаторам напряжения, установленным на стороне низшего напряжения автотрансформатора,

$$Z_{с,\,р,\,ат}=\frac{K_{IСН}}{\sqrt{3}\,K_{UНН}\,n_{ат,\,СН\text{-}НН}}Z_{с,\,з,\,ат}; \qquad (8.11)$$

при подключении защиты к трансформаторам тока, установленным на стороне высшего напряжения, и к трансформаторам напряжения, установленным на стороне низшего напряжения автотрансформатора,

$$Z_{с,\,р,\,ат}=\frac{K_{IВН}}{\sqrt{3}\,K_{UНН}\,n_{ат,\,ВН\text{-}НН}}Z_{с,\,з,\,ат}; \qquad (8.12)$$

при подключении защиты к трансформаторам тока и напряжения, установленным на стороне высшего (среднего) напряжения автотрансформатора,

$$Z_{\text{с. р. ат}} = \frac{K_{I\text{ВН (СН)}}}{K_{U\text{ВН (СН)}}} Z_{\text{с. з. ат}}, \qquad (8.13)$$

где $K_{I\text{ вн}}$, $K_{I\text{ сн}}$ — коэффициенты трансформации трансформаторов тока соответственно на стороне высшего и среднего напряжений автотрансформатора; $K_{U\text{ вн}}$, $K_{U\text{ нн}}$ — коэффициенты трансформации трансформаторов напряжения соответственно на стороне высшего и низшего напряжений автотрансформатора; $n_{\text{ат, вн-нн}}$, $n_{\text{ат, сн-нн}}$ — коэффициенты трансформации рассматриваемого автотрансформатора соответственно между сторонами высшего — низшего и среднего — низшего напряжений, в последнем случае принимается с учетом РПН автотрансформатора.

Коэффициент $\sqrt{3}$ в знаменателе (8.11) и (8.12) определяется включением защиты на фазные вторичные напряжения.

Уставка на реле сопротивления второй ступени $Z^{\text{II}}_{\text{уст}}$ при отсутствии смещения характеристики срабатывания ($a=0$) и смещении ее в третий квадрант ($a<0$)

$$Z^{\text{II}}_{\text{уст}} = Z^{\text{II}}_{\text{с. р}}; \qquad (8.14)$$

при смещении характеристики срабатывания в первый квадрант ($a>0$)

$$Z^{\text{II}}_{\text{уст}} = \frac{Z^{\text{II}}_{\text{с. р}}}{1+a}, \qquad (8.15)$$

где a — то же, что в (8.5).

8.1.14. Чувствительность обеих ступеней защиты по току точной работы определяется коэффициентом чувствительности $k_{\text{ч,т}}$ при КЗ между тремя фазами в расчетной точке

$$k_{\text{ч. т}} = \frac{I_{\text{к}min}}{I_{\text{з. т}}}, \qquad (8.16)$$

где $I_{\text{к }min}$ — первичный ток в месте установки защиты при КЗ между тремя фазами в расчетной точке в расчетном минимальном режиме; $I_{\text{з,т}}$ — ток точной работы (первичный) при данном виде повреждения.

Минимальное значение коэффициента чувствительности допускается примерно 1,3 для первой ступени защиты и 1,1 для второй ступени защиты.

Ток $I_{\text{к }min}$ рассчитывается для первой ступени защиты при КЗ в конце охватываемой ею зоны; для второй ступени защиты — при КЗ в конце зоны резервирования.

Для обеих ступеней защиты должно рассматриваться каскадное отключение КЗ, при этом расчетным для второй ступени защиты является режим, соответствующий наименьшему значению коэффициента токораспределения $k_{\text{ток,ат}}$, равного отношению тока в месте установки защиты к току в точке КЗ.

Для первой ступени расчетный ток не зависит от режима работы системы, в которой рассматривается повреждение, что следует из приведенных ниже выражений для тока в месте установки защиты при КЗ между тремя фазами в конце зоны, охватываемой ее первой ступенью.

При подключении защиты к трансформаторам напряжения, установленным на стороне низшего напряжения автотрансформатора, и направлении защиты в сторону среднего (высшего) напряжения

$$I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{ном}} k_{\text{ток, ат}}}{\sqrt{3}\,[\underline{Z}_{\Sigma} + (\underline{Z}_{\text{ат, ВН (СН)}} + \underline{Z}^{\text{I}}_{\text{с. з. ат}}) k_{\text{ток, ат}}]} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\left(\frac{\underline{Z}_{\Sigma}}{k_{\text{ток, ат}}} + \underline{Z}_{\text{ат, ВН (СН)}} + \underline{Z}^{\text{I}}_{\text{с. з. ат}}\right)}. \qquad (8.17)$$

При подключении защиты к трансформаторам напряжения, установленным на той стороне автотрансформатора, в которую направлена защита,

$$I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{ном}}(k_{\text{ток, ат}})}{\sqrt{3}\,[\underline{Z}_{\Sigma} + (\underline{Z}_{\text{ат, ВН-СН}} + \underline{Z}^{\text{I}}_{\text{с. з. ат}}) k_{\text{ток, ат}}]} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\left(\frac{\underline{Z}_{\Sigma}}{k_{\text{ток, ат}}} + \underline{Z}_{\text{ат, ВН-СН}} + \underline{Z}^{\text{I}}_{\text{с. з. ат}}\right)}. \qquad (8.18)$$

При подключении защиты к трансформаторам напряжения, установленным на стороне высшего (среднего) напряжения автотрансформатора, и направлении защиты в сторону среднего (высшего) напряжения, т. е. в сторону автотрансформатора,

$$I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{ном}} k_{\text{ток, ат}}}{\sqrt{3}\,(\underline{Z}_{\Sigma} + \underline{Z}^{\text{I}}_{\text{с. з. ат}} k_{\text{ток, ат}})} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\left(\frac{\underline{Z}_{\Sigma}}{k_{\text{ток, ат}}} + \underline{Z}^{\text{I}}_{\text{с. з. ат}}\right)}. \qquad (8.19)$$

В выражениях (8.17)—(8.19) $\underline{Z}_{\Sigma}$ — эквивалентное сопротивление питающей неповрежденной системы; $\underline{Z}_{\text{ат,вн(сн)}}$ — сопротивление луча высшего (среднего) напряжения в схеме замещения автотрансформатора; $\underline{Z}_{\text{ат,вн-сн}}$ — сопротивление автотрансформатора между сторонами высшего и среднего напряжений; $\underline{Z}^{\text{I}}_{\text{с,з,ат}}$ — сопротивление срабатывания рассматриваемой первой ступени защиты; $k_{\text{ток,ат}}$ — коэффициент токораспределения, равный отношению тока в рассматриваемой защите к току, подтекающему от питающей неповрежденной системы; при двух автотрансформаторах на подстанции $k_{\text{ток,ат}}=0{,}5$, при одном $k_{\text{ток,ат}}=1{,}0$.

Значение тока $I_{\text{к}}$ по (8.17)—(8.19) зависит от режима работы только питающей неповрежденной системы и не зависит от режима работы системы, в которой рассматривается повреждение.

8.1.15. Расчет устройства блокировки при качаниях (типов КРБ-125 и КРБ-126), предусмотренного на панели типа ПЗ-5 (ПЭ2105), производится принципиально аналогично расчету, приведенному в «Руководящих указаниях по релейной защите. Выпуск 7», гл. 5, разд. Ж и З.

8.2. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТА

В соответствии с приведенными выше общими указаниями расчет дистанционной защиты автотрансформатора от многофазных КЗ производится в следующем порядке.

8.2.1. Определяется необходимость применения дистанционной защиты автотрансформатора от многофазных КЗ.

Для автотрансформаторов с высшим напряжением 220 кВ определяется требуемое число и назначение ступеней защиты для каждой из сторон и на этой основе требуемое число панелей (одна или две); для автотрансформаторов с высшим напряжением 330 кВ и выше, как правило, устанавливаются две панели.

Выбирается схема подключения цепей тока и напряжения защиты.

8.2.2. Определяются первичные сопротивления срабатывания первых ступеней защиты $Z^{\text{I}}_{\text{с,з,ат}}$ по условию согласования с первыми ступенями дистанционных защит смежных линий сети, в сторону которой направлена рассматриваемая первая ступень.

Расчет производится по (8.3), (8.4), (8.3а) или (8.4а) в зависимости от того, в сторону какой сети направлена и от какого трансформатора напряжения питается рассматриваемая первая ступень. Входящие в эти выражения коэффициенты токораспределения $k_{\text{ток,ат,сн}}$ и $k_{\text{ток,ат,вн}}$ должны рассчитываться в таких реально возможных режимах работы, которым соответствуют наименьшие сопротивления в месте установки рассматриваемой защиты, т. е. наибольшие значения этих коэффициентов.

8.2.3. Определяется пригодность выбранных в соответствии с п. 8.2.2 сопротивлений срабатывания первых ступеней защиты.

Для этого проверяется чувствительность согласованных с ними вторых ступеней дистанционных защит линий, из-за недостаточной чувствительности которых потребовалась установка рассматриваемых первых ступеней дистанционной защиты автотрансформатора.

Выбирается смещение характеристики срабатывания реле в третий квадрант и проверяется отстройка от КЗ на элементах стороны низшего напряжения, не имеющих быстродействующей защиты, например на шинах 6—10 кВ данной подстанции.

8.2.4. Выбираются выдержки времени первых ступеней защиты в соответствии с п. 8.1.11.

8.2.5. Определяются первичные сопротивления срабатывания вторых ступеней защиты $Z^{\text{II}}_{\text{с, з, ат}}$ по условию обеспечения требуемой чувствительности (см. п. 8.1.12).

8.2.6. Принимаются расчетные значения смещения a характеристик срабатывания вторых ступеней защиты при выбранных в п. 8.2.5 сопротивлениях срабатывания.

В случаях, когда панель используется для выполнения первой и второй ступеней защиты, направленных в одну сторону, смещение характеристики в первый квадрант следует принимать по условию обеспечения надежного «зацепления» характеристик первой и второй ступеней защиты. Расчет производится по (8.9).

Когда не удается обеспечить надежное «зацепление» или когда панель используется для выполнения двух вторых ступеней защиты, рассматриваемое смещение в первый квадрант можно принимать по условию обеспечения второй ступенью требуемой чувствительности в конце зоны, охватываемой резервными защитами автотрансформатора (токовой защитой обратной последовательности и максимальной токовой защитой с пуском напряжения) при внешних многофазных КЗ в сети, куда направлена рассматриваемая вторая ступень (см. п. 8.1.4). Расчет может производиться по (8.9), в котором под сопротивлением $Z^{\text{I}}_{\text{с,з,ат}}$ понимается первичное сопротивление в месте установки рассматриваемой второй ступени при КЗ в конце зоны, охватываемой указанными резервными защитами автотрансформатора. При этом должны рассматриваться режимы, в которых это сопротивление $Z^{\text{I}}_{\text{с,з,ат}}$ наименьшее.

При выборе смещения характеристики срабатывания в первый квадрант для автотрансформаторов с высшим напряжением 330 кВ и выше следует также учитывать возможность емкостного характера $Z_{\text{нагр}}$, связанного, например, с внешней емкостной проводимостью линий электропередачи.

8.2.7. При принятых в п. 8.2.6 смещениях a характеристик срабатывания, исходя из табл. 8.3, выбирается метод отстройки от нагрузочного режима и по (8.5), (8.6) или (8.7) производится расчет первичных сопротивлений срабатывания вторых ступеней защиты $Z^{\text{II}}_{\text{с, з, ат}}$.

8.2.8. Проверяется чувствительность вторых ступеней защиты при полученных в п. 8.2.7 сопротивлениях срабатывания $Z^{\text{II}}_{\text{с, з, ат}}$ путем сравнения последних с сопротивлениями срабатывания, удовлетворяющими условию чувствительности, которые были получены выше в расчете по п. 8.2.5.

8.2.9. Если чувствительность по п.8.2.8 оказывается недостаточной, то увеличивается смещение a характеристики срабатывания и повторяется расчет по пп. 8.2.7 и 8.2.8.

8.2.10. Выбираются выдержки времени вторых ступеней защиты в соответствии с п. 8.1.11.

8.2.11. Определяются сопротивления срабатывания реле первых и вторых ступеней защит, а также уставка на реле второй ступени защиты в соответствии с п. 8.1.13.

Расчет производится по (8.11)—(8.13) в зависимости от выбранной схемы подключения цепей тока и напряжения защиты в п. 8.2.1 и по выражению (8.15).

8.2.12. Проверяется чувствительность обеих ступеней по току точной работы.

Расчет производится в соответствии с п. 8.1.14.

8.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА

8.3.1. В настоящем примере дан расчет дистанционной защиты автотрансформатора АТДЦТН-125000/220/110, имеющего встроенное регулирование напряжения под нагрузкой на стороне среднего напряжения в пределах ±12% номинального.

Исходная схема для примера расчета, а также схемы замещения прямой (обратной) последовательности приведены на рис. 8.1,*а* и *б*.

Пример рассчитан в именованных единицах, приведенных к ступени высшего напряжения (230 кВ) как к базовой.

8.3.2. Определяется необходимость применения дистанционной защиты автотрансформатора (а именно ее первой ступени) по условию обеспечения требуемой чувствительности вторых ступеней дистанционных защит, установленных на противоположных концах смежных линий в соответствии с пп. 8.1.2.1, 8.1.3 и 8.2.1, исходя из (8.2). При этом должны рассматриваться защиты наиболее длинных линий и с бо́льшими коэффициентами токораспределения.

Для линий *Л2* 220 кВ длиной 200 км

$$z_{\text{Л2}} = 80 > 2{,}3\,\frac{37{,}4 - 8{,}7}{2} = 33{,}0 \text{ Ом}.$$

Расчетный (наибольший) коэффициент токораспределения в рассматриваемом случае соответствует отключению линии *Л1* 220 кВ (длиной 150 км) и параллельной работе автотрансформаторов на стороне среднего напряжения

$$k_{\text{ток,л}} = 2.$$

Для линии *Л3* 110 кВ длиной 100 км

$$Z_{\text{Л3}} = 115 < 2{,}3\,\frac{37{,}4 - 8{,}7}{0{,}374} = 176 \text{ Ом}.$$

Расчетный (наибольший) коэффициент токораспределения в рассматриваемом случае соответствует отключению наиболее короткой линии *Л4* 110 кВ (длиной 50 км). Расчеты производятся, исходя из схемы замещения прямой (обратной) последовательности по рис. 8.1,*б* для случая максимального регулируемого напряжения (минимального сопротивления автотрансформатора) и параллельной работы автотрансформаторов в минимальном режиме работы систем *С5* и *С6*

$$k_{\text{ток, л}} = \frac{2\,\dfrac{58{,}5 \cdot 1{,}5}{2}}{\dfrac{58{,}5 \cdot 1{,}5}{2} + (115 + 76{,}1)} = 0{,}374.$$

Из приведенного расчета можно сделать следующие выводы.

8.3.2.1. Для обеспечения согласования вторых ступеней защиты линий 220 кВ с защитой автотрансформатора необходима установка на автотрансформаторах дистанционной защиты с первой ступенью, направленной в сторону системы среднего напряжения; этот же вывод может быть сделан на основании табл. 8.2.

Рассматриваемая ступень особенно целесообразна при отсутствии на линиях 110 кВ полноценного ближнего резервирования (см. «Руководящие указания по релейной защите. Выпуск. 13А»).

8.3.2.2. Чувствительность вторых ступеней дистанционных защит линий 110 кВ обеспечивается при отстройке их от КЗ за автотрансформаторами и, следовательно, не требуется установки соответствующей ступени дистанционной защиты на автотрансформаторах.

8.3.3. Определяется необходимость применения дистанционной защиты автотрансформатора (а именно ее второй ступени) по условию обеспечения резервирования в сетях высшего и среднего напряжений в соответствии с пп. 8.1.2.2 и 8.2.1. При этом учитывается чувствительность в зоне резервирования других резервных защит автотрансформатора от многофазных КЗ (токовой защиты обратной последовательности и максимальной токовой защиты с пуском напряжения), чувствительность третьих ступеней дистанционных защит, установленных на противоположных концах смежных линий высшего и среднего напряжений, наличие или отсутствие на них полноценного ближнего резервирования и возможность повышения эффективности дальнего резервирования при применении рассматриваемой второй ступени дистанционной защиты автотрансформатора.

Сопротивления срабатывания третьих ступеней дистанционных защит, установленных на противоположных концах смежных линий, обычно заимствуются из расчета защит линий. В настоящем примере они рассчитаны исходя из токов послеаварийного режима, уже учитывающих ток самозапуска двигателей нагрузки и приведенных на исходной схеме по рис. 8.1,*а* (см. «Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 7»).

Для линии *Л1* 220 кВ длиной 150 км

$$Z^{III}_{с,\,з1} = \frac{0{,}9 \cdot 230}{\sqrt{3} \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}75 \cos(80° - 35°)} = 170 \text{ Ом}.$$

Используя максимальную уставку реле типа КРС-1 $Z_{с,р\ max}$=30 Ом, можно получить

$$Z^{III}_{с,\,зmax} = \frac{Z_{с,\,рmax} K_U}{K_I} = \frac{30 \dfrac{220\,000}{100}}{1000/5} = 330 \text{ Ом}.$$

Это значение в рассматриваемом случае может быть использовано при эллиптической характеристике реле.

Для линий *Л4* 110 кВ длиной 50 км

$$Z^{III}_{с,\,з4} = \frac{0{,}9 \cdot 115}{\sqrt{3} \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}3 \cos(65° - 35°)} = 173 \text{ Ом}.$$

Используя эллиптическую характеристику на максимальной уставке реле типа КРС-1 $Z_{с,р\ max}$=30 Ом, для линии *Л4* можно получить

$$Z^{III}_{с,\,зmax} = \frac{30 \dfrac{110\,000}{100}}{600/5} = 275 \text{ Ом}.$$

Определяется чувствительность рассматриваемых третьих ступеней дистанционных защит линий при каскадном отключении КЗ в конце предыдущих линий (в точках K_1 и K_2 на рис. 8,1,*а*) при включенных и отключенных автотрансформаторах. При этом должны рассматриваться КЗ в конце наиболее длинных линий с меньшими коэффициентами токораспределения, т. е. расчетные условия для обеспечения дальнего резервирования (*С5* и *С6* — эквивалентные схемы участков сети, на линиях которых КЗ не рассматривается в предположении, что как для данного условия, так и для определения параметров дистанционной защиты они не являются расчетными).

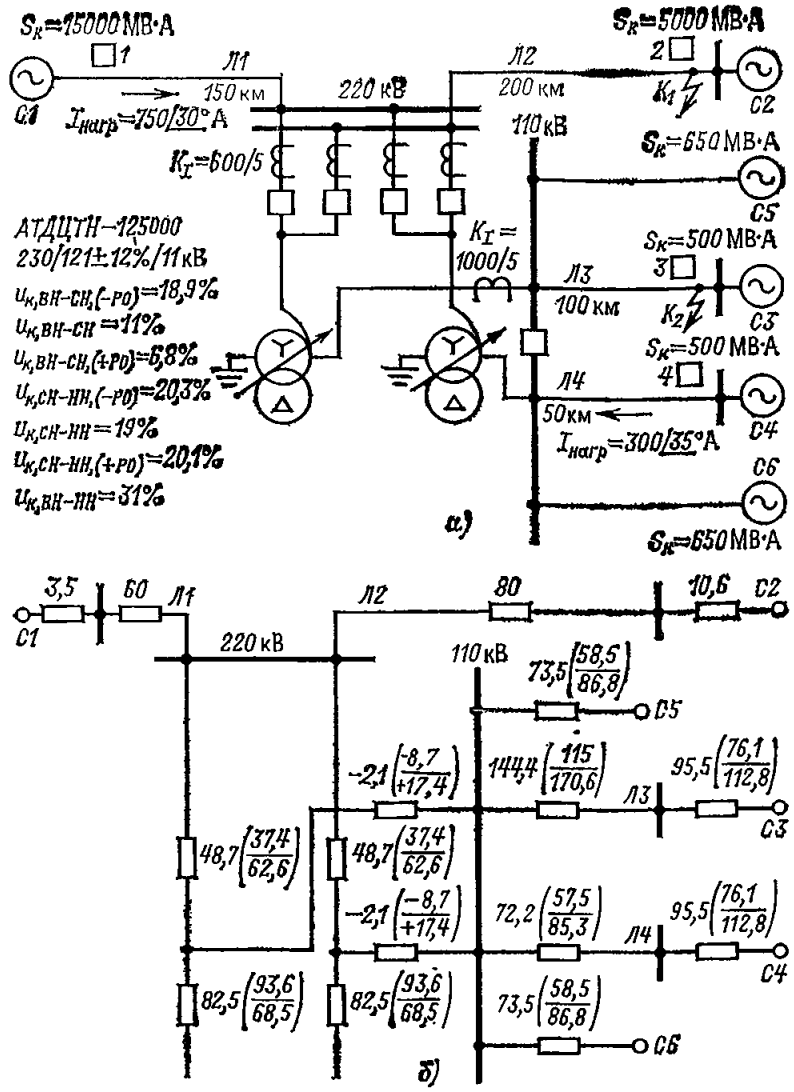


Рис. 8.1. Пример расчета дистанционной защиты автотрансформатора:

а — исходная схема; *б* — схема замещения прямой (обратной) последовательности.

Примечания: 1. На рис. 8.1,*а* приведены: $S_к$ — максимальные мощности КЗ между тремя фазами на шинах систем 220 и 110 кВ (в минимальном режиме мощности всех систем снижаются в 1,5 раза); $I_{нагр}$ — максимально возможные токи нагрузки в послеаварийном расчетном нагрузочном режиме при отключении параллельно работающего автотрансформатора.

2. Удельное сопротивление линий $x_{1л}$=0,4 Ом/км; $\varphi_л$=75° для линий 220 кВ; $\varphi_л$=65° для линий 110 кВ.

3. В схеме замещения на рис. 8.1,*б* значения сопротивлений приведены к напряжению 230 кВ. Сопротивления автотрансформатора даны для среднего и крайних положений регулятора; сопротивления элементов сети 110 кВ — для среднего и крайнего, соответствующего максимальному регулируемому напряжению (121+12%) положений регулятора и положения, соответствующего минимальному, реально возможному регулируемому напряжению (принято 121—8%). Значения сопротивлений, соответствующих максимальному и рассматриваемому минимальному значениям регулируемого напряжения приведены в скобках в виде дроби, первое — в числителе, второе — в знаменателе

Чувствительность третьей ступени дистанционной защиты *1* линии *Л1* 220 кВ при КЗ в K_1 и включенных автотрансформаторах

$$k_ч = \frac{Z^{III}_{с,\,зmax1}}{Z_{Л1} + \dfrac{Z_{Л2}}{k_{ток}}} = \frac{330}{60 + \dfrac{80}{0{,}354}} = 1{,}15.$$

Расчетный (наименьший) коэффициент токораспределения в рассматриваемом случае соответствует работе автотрансформаторов при максимальном регулируемом напряжении, максимальному режиму работы сети 110 кВ и минимальному режиму работы сети 220 кВ

$$Z_{\Sigma 110} = (115 + 76{,}1) \| (57{,}5 + 76{,}1) \| \frac{58{,}5}{2} + \frac{37{,}4 - 8{,}7}{2} = 35{,}7 \text{ Ом};$$

$$k_{\text{ток}} = \frac{35{,}7}{35{,}7 + (3{,}5 \cdot 1{,}5 + 60)} = 0{,}354.$$

Чувствительность третьей ступени дистанционной защиты *4* линии *Л4* 110 кВ при КЗ в точке K_2 и включенных автотрансформаторах

$$k_{\text{ч}} = \frac{Z^{\text{III}}_{\text{с, }\textit{max4}}}{Z_{\text{Л4}} + \dfrac{Z_{\text{Л3}}}{k_{\text{ток}}}} = \frac{275}{20 + \dfrac{40}{0{,}097}} = 0{,}64.$$

Расчетный (наименьший) коэффициент токораспределения в рассматриваемом случае соответствует работе автотрансформаторов при максимальном регулируемом напряжении, максимальному режиму работы систем *С1*, *С2*, *С5*, *С6* и минимальному режиму работы системы *С4*

$$Z_{\Sigma 220} = (3{,}5 + 60) \| (10{,}6 + 80) + \frac{37{,}4 - 8{,}7}{2} = 51{,}65 \text{ Ом};$$

$$Z_{\Sigma 220-110} = 51{,}65 \| \frac{58{,}5}{2} = 18{,}6 \text{ Ом};$$

$$k_{\text{ток}} = \frac{18{,}6}{18{,}6 + (57{,}5 + 76{,}1 \cdot 1{,}5)} = 0{,}097.$$

Из приведенного расчета следует, что в сети 220 кВ в рассмотренных выше расчетных условиях действие третьей ступени дистанционной защиты *1* обеспечивается при КЗ на 95% длины линии *Л2* и без действия дистанционной защиты автотрансформатора. Кроме того, последняя не повысила бы и эффективность дальнего резервирования, поскольку мероприятия по делению подстанции, работающей по схеме четырехугольника, для сохранения части ее в работе не предусматриваются. Предполагается, что отключение автотрансформатора в рассматриваемом случае внешнего КЗ производится его резервными защитами (защитой обратной последовательности и максимальной токовой защитой с пуском напряжения, т. е. что чувствительность их достаточна. Следует также учитывать, что вероятность действия резервных защит автотрансформатора при КЗ на линиях 220 кВ весьма мала. Это определяется наличием УРОВ на подстанции и полноценного ближнего резервирования защит на линиях 220 кВ.

В сети 110 кВ дальнее резервирование не обеспечивается. Полноценное ближнее резервирование защит на линиях 110 кВ имеется не всегда. Дистанционная защита автотрансформатора, действующая с первой выдержкой времени на разделение секций шин 110 кВ, значительно повышает эффективность дальнего резервирования.

8.3.4. В соответствии с произведенными выше расчетами (пп. 8.3.2 и 8.3.3) на рассматриваемом автотрансформаторе устанавливается дистанционная защита, выполненная одной панелью с первой и второй ступенями, направленными в сторону среднего напряжения.

В соответствии с п. 8.1.6 цепи тока обеих ступеней защиты подключаются к трансформаторам тока стороны среднего напряжения в предположении, что при подключении к трансформаторам тока стороны высшего напряжения первая ступень окажется не отстроенной от КЗ на шинах низшего напряжения, а вторая ступень — недостаточно чувствительной из-за РПН автотрансформатора.

Цепи напряжения панели в соответствии с п. 8.1.7 включаются на междуфазные напряжения трансформатора напряжения, установленного на шинах среднего напряжения.

8.3.5. Определяется первичное сопротивление срабатывания первой ступени защиты $Z^{\text{I}}_{\text{с, з, ат}}$ по условию согласования с первыми ступенями защит линий среднего напряжения.

Расчетной в сети по рис. 8.1,*а* является линия *Л4* длиной 50 км. Расчет производится по (8.3а) для случая максимального регулируемого напряжения (минимального сопротивления автотрансформатора и минимального приведенного сопротивления линий среднего напряжения) с учетом того обстоятельства, что для рассматриваемых линий среднего напряжения, являющихся линиями с двусторонним питанием, зона, охватываемая первой ступенью дистанционной защиты линии, с которой производится согласование, составляет 87% длины линий

$$Z^{\text{I}}_{\text{с, з, ат}} = 0{,}78 \frac{0{,}87 \cdot 57{,}5}{0{,}571} = 68{,}5 \text{ Ом}.$$

Расчетный (наибольший) коэффициент токораспределения в рассматриваемом случае соответствует раздельной работе автотрансформаторов на стороне среднего напряжения в минимальном режиме работы системы *С6*. Расчеты производятся, исходя из схемы замещения прямой (обратной) последовательности по рис. 8.1,*б* для случая максимального регулируемого напряжения

$$Z_{\Sigma 220} = (3{,}5 + 60) \| (10{,}6 + 80) + 28{,}7 = 66 \text{ Ом};$$

$$k_{\text{ток, ат}} = \frac{58{,}5 \cdot 1{,}5}{58{,}5 \cdot 1{,}5 + 66} = 0{,}571.$$

Кроме того, должна быть проверена отстройка характеристики срабатывания по смещению в третий квадрант от КЗ на шинах низшего напряжения подстанции.

8.3.6. В соответствии с п. 8.1.10 предварительно оценивается пригодность выбранного сопротивления срабатывания первой ступени защиты.

Для этого определяется сопротивление срабатывания второй ступени дистанционной защиты *2* линии *Л2* 220 кВ длиной 200 км (для которой потребовалась установка дистанционной защиты автотрансформатора) по условию согласования с рассмотренной первой ступенью защиты автотрансформатора. Согласование производится в режиме параллельной работы автотрансформаторов на стороне среднего напряжения для случая максимального регулируемого напряжения

$$Z^{\text{II}}_{\text{с, з2}} = 0{,}87 \left(Z_{\text{Л2}} + \frac{Z_{\text{ат, ВН-СН}} + (1 - \alpha) Z^{\text{I}}_{\text{с, з, ат}}}{k_{\text{ток, л}}} \right) = 0{,}87 \left(80 + \frac{37{,}4 - 8{,}7 + 0{,}9 \cdot 68{,}5}{2} \right) = 109 \text{ Ом}.$$

Расчетный (наибольший) коэффициент токораспределения в рассматриваемом случае соответствует отключению линии *Л1* 220 кВ (длиной 150 км) $k_{\text{ток, л}} = 2$.

Определяется чувствительность рассматриваемой второй ступени дистанционной защиты *2* линии *Л2*

$$k^{\text{II}}_{\text{ч, л}} = \frac{109}{80} = 1{,}36 > 1{,}25.$$

Таким образом, выбранная первая ступень дистанционной защиты автотрансформатора соответствует своему назначению, т. е. позволяет обеспечить требуемую чувствительность вторых ступеней дистанционных защит смежных линий 220 кВ.

8.3.7. Выдержка времени первой ступени защиты автотрансформатора в соответствии с п. 8.1.11 принимается по условию согласования с первой ступенью защиты линии, действующей без выдержки времени, на:

разделение систем (секций) шин

$$t_1^{\text{I}} = t_{\text{з, л}}^{\text{I}} + \Delta t' = 0 + 0{,}3 = 0{,}3\ \text{с};$$

отключение выключателя автотрансформатора на стороне СН

$$t_2^{\text{I}} = t_1^{\text{I}} + \Delta t = 0{,}3 + (0{,}4 \div 0{,}5) = 0{,}7 \div 0{,}8\ \text{с}.$$

($\Delta t'$ принята пониженной, поскольку защита, с которой производится согласование, действует без выдержки времени).

8.3.8. Определяется первичное сопротивление срабатывания второй ступени защиты $Z_{\text{с, з, ат}}^{\text{II}}$ по условию обеспечения требуемой чувствительности (п. 8.1.12).

Расчетным является каскадное отключение КЗ в конце линии *Л3* 110 кВ длиной 100 км (в точке K_2) при наименьшем коэффициенте токораспределения. Сопротивление линии *Л3* ($Z_{Л3}$) принимается по схеме замещения прямой (обратной) последовательности (см. рис. 8.1,*б*) при максимальном регулируемом напряжении. Указанное не имеет принципиального значения в случае подключения защиты к трансформаторам тока и напряжения, установленным на стороне среднего напряжения, однако это удобно для дальнейшего расчета, так как при максимальном регулируемом напряжении рассчитывалось сопротивление срабатывания первой ступени защиты $Z_{\text{с, з, ат}}^{\text{I}}$ (п. 8.3.5)

$$Z_{\text{с, з, ат}}^{\text{II}} = \frac{Z_{Л3} k_{\text{ч}}}{k_{\text{гок, ат}}} = \frac{115 \cdot 1{,}2}{0{,}155} = 890\ \text{Ом}.$$

Расчетный (наименьший) коэффициент токораспределения в рассматриваемом случае соответствует минимальному режиму работы систем 220 кВ *С1* и *С2* и максимальному режиму работы систем 110 кВ *С4*, *С5* и *С6* при параллельной работе автотрансформаторов. Расчет производится по схеме замещения рис. 8.1,*б* при максимальном регулируемом напряжении. Однако при других соотношениях сопротивлений элементов схемы замещения расчетным может оказаться и случай работы автотрансформаторов при минимальном реально возможном регулируемом напряжении

$$Z_{\Sigma 110} = \frac{58{,}5}{2} \| (76{,}1 + 57{,}5) = 24{,}0\ \text{Ом};$$

$$k_{\text{гок, ат}} = \frac{24{,}0}{2\left[(3{,}5 \cdot 1{,}5 + 60) \| (10{,}6 \cdot 1{,}5 + 80) + \frac{37{,}4 - 8{,}7}{2} + 24{,}0\right]} = 0{,}155.$$

8.3.9. В соответствии с п. 8.2.6 определяется допустимое смещение характеристики срабатывания второй ступени защиты в первый квадрант, обеспечивающее надежное «зацепление» характеристик первой и второй ступеней защиты. Расчет производится по выражению (8.9)

$$a \leqslant \frac{0{,}9 \cdot 68{,}5 - 0{,}1 \cdot 890}{1{,}1 \cdot 890 - 0{,}9 \cdot 68{,}5} = -0{,}03.$$

Таким образом, при смещении характеристики срабатывания второй ступени в первый квадрант надежное «зацепление» характеристик не обеспечивается, поэтому в качестве расчетных можно принять значения смещения $a = -0{,}1$ и $a = 0$; для дальнейшего расчета принимаем $a = 0$.

8.3.10. При принятом в п. 8.3.9 смещении характеристики срабатывания $a = 0$ выбор сопротивления срабатывания второй ступени защиты $Z_{\text{с, з, ат}}^{\text{II}}$ производится по условию отстройки от вектора расчетного сопротивления нагрузки в месте установки защиты по выражению (8.6)

$$Z_{\text{с, з, ат}}^{\text{II}} \leqslant \frac{273}{1{,}25 \cos(73° - 35°)} = 278\ \text{Ом},$$

где расчетное сопротивление нагрузки за неимением других данных определялось по мощности автотрансформатора с учетом его допустимой перегрузки

$$I_{\text{нагр, расч}} = \frac{P_{\text{ат}} k_{\text{пер}}}{\sqrt{3}\, U_{\text{ном}}} = \frac{125 \cdot 1{,}4}{\sqrt{3}\, 230} = 0{,}439\ \text{кА};$$

$$Z_{\text{нагр, расч}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\, I_{\text{нагр, расч}}} = \frac{230 \cdot 0{,}9}{\sqrt{3} \cdot 0{,}439} = 273\ \text{Ом},$$

а угол вектора нагрузки принимался таким же, как на линиях 110 кВ.

8.3.11. Полученное в п. 8.3.10 сопротивление срабатывания второй ступени защиты $Z_{\text{с, з, ат}}^{\text{II}} = 278$ Ом значительно меньше требуемого $Z_{\text{с, з, ат}}^{\text{II}} = 890$ Ом (см. п. 8.2.5), т. е. чувствительность недостаточна.

8.3.12. В соответствии с п. 8.2.9 требуется принять большее, чем в п. 8.3.9, смещение характеристики срабатывания второй ступени защиты, т. е. смещение ее в первый квадрант.

Исходя из (8.8), определяется смещение a, которое может быть принято при отстройке сопротивления срабатывания от вектора сопротивления нагрузки по выражению (8.5)

$$a \leqslant \frac{1 - \sin(73° - 35°)}{2\sin(73° - 35°)} = 0{,}311.$$

Принимая $a = 0{,}3$, по (8.5) определяем сопротивление срабатывания второй ступени защиты

$$Z_{\text{с, з, ат}}^{\text{II}} \leqslant \frac{273}{1{,}25} \cdot \frac{(1 + 2 \cdot 0{,}3)\cos(73° - 35°) - \sqrt{(1 + 2 \cdot 0{,}3)^2 \cos^2(73° - 35°) - 4 \cdot 0{,}3(1 + 0{,}3)}}{2 \cdot 0{,}3} = 408\ \text{Ом}.$$

Полученное сопротивление срабатывания также не удовлетворяет требованию чувствительности (меньше 890 Ом).

Принимая $a = 0{,}4$, определяем, какой запас ($\Delta\varphi$) будет иметь место при отстройке сопротивления срабатывания второй ступени защиты от вектора сопротивления нагрузки по углу.

Исходя из (8.7), получаем:

$$\Delta\varphi \leqslant \varphi_{max\text{ч}} - \varphi_{\text{нагр}} - \arcsin\frac{1}{2a + 1} =$$

$$= 73° - 35° - \arcsin\frac{1}{2 \cdot 0{,}4 + 1} = 73° - 35° - 33°40' = 4°20',$$

что недостаточно.

Принимаем $a = 0{,}45$, тогда

$$\Delta\varphi = 73° - 35° - \arcsin\frac{1}{2 \cdot 0{,}45 + 1} = 73° - 35° - 31°40' = 6°20',$$

что обеспечивает надежную отстройку от вектора сопротивления по углу.

Таким образом, окончательно принимается: сопротивление срабатывания второй ступени защиты $Z^{II}_{с,\,з,\,ат}=$ $=890$ Ом и смещение ее характеристики срабатывания в первый квадрант $a=0{,}45$.

Следует отметить, что поскольку не удалось обеспечить надежное «зацепление» (см. пп. 8.3.9—8.3.11) характеристик срабатывания первой и второй ступеней защиты, то при многофазных КЗ в области смещения характеристики срабатывания второй ступени должны надежно действовать другие резервные защиты автотрансформатора от многофазных КЗ (токовая защита обратной последовательности и максимальная токовая защита с пуском по напряжению).

Дополнительные расчеты показали, что третья ступень дистанционной защиты *4*, установленной на противоположном конце линии *Л4*, с сопротивлением срабатывания $Z^{II}_{с,з max4}=275$ Ом (см. п. 8.3.3) при включенных автотрансформаторах, наименьшем коэффициенте токораспределения $k_{ток}=0{,}097$ (см. п. 8.3.3) и учете 10% погрешности реле в сопротивлении срабатывания охватывает при каскадном отключении КЗ 55% длины линии *Л3*.

По аналогии с выражением (8.9) можно получить

$$a \leqslant \frac{\dfrac{0{,}55Z_{Л3}}{k_{ток}} - 0{,}1Z^{II}_{с,\,з,\,ат}}{1{,}1Z^{II}_{с,\,з,\,ат} - \dfrac{0{,}55Z_{Л3}}{k_{ток}}} = \frac{\dfrac{0{,}55\cdot 115}{0{,}155} - 0{,}1\cdot 890}{1{,}1\cdot 890 - \dfrac{0{,}55\cdot 115}{0{,}155}} = 0{,}56.$$

Таким образом, при принятом смещении в первый квадрант ($a=0{,}45$) характеристики срабатывания второй ступени защиты автотрансформатора будет надежно обеспечиваться ее «зацепление» с характеристикой срабатывания третьей ступени дистанционной защиты *4*, установленной на противоположном конце линии *Л4*, т. е. третьи ступени защит, установленных на противоположных концах линий 110 кВ, будут действовать при КЗ в области смещения характеристики срабатывания второй ступени защиты автотрансформатора независимо от действия резервных защит от многофазных КЗ автотрансформатора.

8.3.13. Выдержка времени второй ступени защиты автотрансформатора в соответствии с п. 8.1.11 принимается по условию согласования с третьей ступенью защит линий 110 кВ, имеющей бо́льшую выдержку времени:

на разделение систем (секций) шин

$$t^{II}_1 = t^{III}_{з,\,л} + \Delta t' = t^{III}_{з,\,л} + 0{,}4\text{ с};$$

на отключение выключателя автотрансформатора на стороне СН

$$t^{II}_2 = t^{II}_1 + \Delta t = t^{II}_1 + (0{,}4 \div 0{,}5)\text{с}$$

[Δt принято исходя из того, что разница во времени действия на разделение систем (секций) шин и на отключение выключателя автотрансформатора определяется уставкой реле времени, общего для первой и второй ступеней защиты] (см. «Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 13А», рис. 2.1—2.3).

8.3.14. Определяются сопротивления срабатывания реле обеих ступеней защиты. Поскольку обе ступени подключены к трансформаторам тока и напряжения, установленным на стороне среднего напряжения (п. 8.3.4), сопротивления срабатывания реле обе́их ступеней определяются по (8.13) с учетом того обстоятельства, что полученные в расчете первичные сопротивления срабатывания $Z^{I}_{с,\,з,\,ат}$ и $Z^{II}_{с,\,з,\,ат}$ приведены к стороне высшего напряжения автотрансформатора при максимальном регулируемом напряжении

$$Z^{I}_{с,\,р,\,ат} = \frac{1000/5}{110\,000/100}\cdot 68{,}5\left(\frac{121\cdot 1{,}12}{230}\right)^2 = 4{,}34\text{ Ом};$$

$$Z^{II}_{с,\,р,\,ат} = \frac{1000/5}{110\,000/100}\cdot 890\left(\frac{121\cdot 1{,}12}{230}\right)^2 = 56{,}3\text{ Ом}.$$

8.3.15. Проверяется чувствительность по току точной работы обеих ступеней защиты в соответствии с п. 8.1.14.

Определяется первичный минимальный ток в месте установки защиты при замыкании между тремя фазами в конце зоны, охватываемой первой ступенью, по (8.18). Расчетным является минимальный режим работы системы 220 кВ, максимальный режим работы системы 110 кВ и параллельная работа автотрансформаторов при минимальном реально возможном регулируемом напряжении

$$I^{(3)}_{кmin} = \frac{230\,000}{\sqrt{3}\left[\dfrac{(3{,}5\cdot 1{,}5+60)\|(10{,}6\cdot 1{,}5+80)}{0{,}5} + (62{,}6+17{,}4)+101{,}3\right]} = 514\text{ А}.$$

Первичное сопротивление срабатывания первой ступени защиты, приведенное к стороне высшего напряжения при минимальном реально возможном регулируемом напряжении,

$$Z^{I}_{с,\,з,\,ат} = 68{,}5\left(\frac{121\cdot 1{,}12}{230}\right)^2\left(\frac{230}{121\cdot 0{,}92}\right)^2 = 101{,}3\text{ Ом}.$$

Чувствительность первой ступени по току точной работы по (8.16)

$$k_{ч,\,т} = \frac{514\dfrac{230}{121\cdot 0{,}92}}{\dfrac{1000}{5}1{,}8} = 2{,}94 > 1{,}3.$$

Определяется первичный минимальный ток в месте установки защиты в тех же условиях, но при замыкании между тремя фазами на линии 110 кВ длиной 100 км в конце зоны, охватываемой второй ступенью защиты. Расчет производится также по (8.18)

$$I^{(3)}_{кmin} = \frac{230000}{\sqrt{3}\left[\dfrac{(3{,}5\cdot 1{,}5+60)\|(10{,}6\cdot 1{,}5+80)}{0{,}5} + (62{,}6+17{,}4)+1317\right]} = 90\text{ А}.$$

Первичное сопротивление срабатывания второй ступени защиты, приведенное к стороне высшего напряжения при минимальном реально возможном регулируемом напряжении,

$$Z^{II}_{с,\,з,\,ат} = 890\left(\frac{121\cdot 1{,}12}{230}\right)^2\left(\frac{230}{121\cdot 0{,}92}\right)^2 = 1317\text{ А}.$$

Чувствительность второй ступени по току точной работы по (8.16)

$$k_{ч,\,т} = \frac{90\dfrac{230}{121\cdot 0{,}92}}{\dfrac{1000}{5}0{,}35} = 2{,}66 > 1{,}1.$$

Таким образом, чувствительность по току точной работы удовлетворяется для обеих ступеней защиты.

9. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

9.1. Ниже даны указания по расчету токовой защиты обратной последовательности автотрансформаторов при выполнении ее направленной с фильтром-реле тока и мощности обратной последовательности типа РМОП-2 либо ненаправленной с фильтром-реле тока обратной последовательности типа РТФ-1М (см. «Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 13А», рис. 2.1—2.3).

9.2. Первичный ток срабатывания защиты выбирается по условию отстройки от тока на выходе фильтра обратной последовательности при максимально возможной в условиях эксплуатации перегрузке автотрансформатора по выражению

$$I_{2\text{с, з}} \geqslant \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} (I_{2\text{нб}} + I_{2\text{нес}}), \qquad (9.1)$$

где $I_{2\text{нб}}$ — ток небаланса на выходе фильтра обратной последовательности, приведенный к первичной стороне трансформаторов тока защиты, в рассматриваемом режиме максимально возможной в условиях эксплуатации перегрузки автотрансформатора; обусловлен погрешностью трансформаторов тока защиты и погрешностью фильтра, связанной с неточностью настройки и возможным отклонением частоты; $I_{2\text{ нес}}$ — первичный ток обратной последовательности в рассматриваемом режиме перегрузки, обусловленный несимметрией в системе (наличие несимметричной, например, железнодорожной нагрузки, работа одной из линий в длительном неполнофазном режиме и т. д.); $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,2; $k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата реле, для фильтра — реле типа РТФ-1М может быть принят равным 0,75; для фильтра-реле типа РМОП-2—0,8.

Первичный ток небаланса $I_{2\text{ нб}}$ ориентировочно может быть определен по выражению

$$I_{2\text{ нб}} = k_{\text{нб}} I_{\text{нагр } max}, \qquad (9.2)$$

где $I_{\text{нагр } max}$ — максимально возможный в условиях эксплуатации ток нагрузки автотрансформатора (например, в условиях послеаварийного «наброса» нагрузки); $k_{\text{нб}}$ — коэффициент небаланса; при выполнении защиты с фильтрами-реле типа РТФ-1М или РМОП-2 может быть принят равным 0,02—0,03.

Условие отстройки от тока, возникающего в выходных цепях фильтра при разрыве соединительных проводов трансформаторов тока, питающих устройство фильтр-реле, при выборе тока срабатывания защиты не учитывается во избежание неоправданного загрубления защиты, поскольку при надежном выполнении монтажа вторичных цепей такие повреждения редки.

При выборе тока срабатывания защиты $I_{2\text{ с,з}}$ по (9.1) последняя, как правило, не согласуется с резервными ступенями защит смежных линий (см. п. 9.3), поэтому в целях снижения возможности неселективных действий защиты следует принимать ее ток срабатывания

$$I_{2\text{ с,з}} \geqslant (0{,}1 \div 0{,}2) I_{\text{ном}}, \qquad (9.3)$$

а также ограничить чувствительность защиты в зоне резервирования ($k_{\text{ч}}$ должен быть не более 1,5).

9.3. В условиях эксплуатации рекомендуется также производить согласование по чувствительности рассматриваемой защиты обратной последовательности с защитами, установленными на смежных линиях и на автотрансформаторе на стороне низшего напряжения:

9.3.1. С токовой защитой нулевой последовательности в сетях с глухозаземленными нейтралями.

9.3.2. С защитой от многофазных КЗ (дистанционная, максимальная токовая).

9.3.3. С токовой защитой обратной последовательности, если имеются смежные линии, на которых предусмотрена такая защита; при этом согласование по пп. 9.3.1 и 9.3.2 с защитами этих линий не производится.

Указанное согласование производится в случаях, когда это признано целесообразным для обеспечения надежного электроснабжения потребителей (например, для защиты мощных автотрансформаторов, осуществляющих ответственную связь между системами, когда при отключении этих автотрансформаторов теряет питание большой район с ответственными потребителями) и при этом обеспечивается требуемая чувствительность рассматриваемой защиты. При выборе тока срабатывания по условию согласования по чувствительности условие по п. 9.2, как правило, не является расчетным. Расчет параметров срабатывания защиты по условию согласования по чувствительности рассматривается ниже и производится в соответствии с указаниями, приведенными в приложении П8.

9.4. Согласование по чувствительности с защитами смежных линий (см. п. 9.3) должно производиться с наиболее чувствительными ступенями этих защит.

Для смежных линий, на которых предусматривается возможность длительной работы двумя фазами, кроме обычного согласования с защитами, действующими при КЗ в режиме работы тремя фазами, дополнительно должно производиться согласование с защитами, действующими при КЗ в режиме работы двумя фазами.

Выбор $I_{2\text{ с,з}}$ по условию согласования требуется производить так, чтобы при отказе по чувствительности одной из отмеченных защит рассматриваемая защита обратной последовательности не приходила в действие, т. е. должно удовлетворяться условие

$$I_{2\text{с,з}} \geqslant k_{\text{отс}} I_{2\text{расч}}, \qquad (9.4)$$

где $I_{2\text{расч}}$ — ток обратной последовательности в месте установки рассматриваемой токовой защиты обратной последовательности в условиях, когда защита, с которой производится согласование, находится на грани срабатывания, для режимов работы и вида КЗ, обусловливающих наибольшее значение тока в рассматриваемой защите; $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,1.

9.4.1. При выборе $I_{2\text{с,з}}$ по условию п. 9.3.3 ток $I_{2\text{расч}}$, входящий в выражение (9.4), вычисляется по выражению

$$I_{2\text{расч}} = k_{2\text{ток}} I_{2\text{с,з,пред}}, \qquad (9.5)$$

где $I_{2\text{с,з,пред}}$ — ток срабатывания защиты обратной последовательности смежной линии, с которой производится согласование; $k_{2\text{ток}}$ — максимальный коэффициент токораспределения в схеме замещения обратной последовательности, равный отношению тока в месте установки рассматриваемой защиты к току в смежной линии, с защитой которой производится согласование; определяется при каскадном отключении КЗ в зоне резервирования последней.

9.4.2. При выборе $I_{2\text{с,з}}$ по условиям пп. 9.3.1 и 9.3.2 в целях упрощения расчета допускается:

согласование защит по чувствительности производить только с защитами от замыканий на землю в сетях с глухозаземленными нейтралями (см. п. 9.3.1) и с защитами от многофазных КЗ в сетях с изолированными нейтралями (см. п. 9.3.2); при этом допускается не учитывать неосновные режимы работы, а поврежденную линию следует считать отключенной основной защитой на противоположном конце;

не производить согласование с защитами, чувствительность которых с запасом превосходит требуемую для резервных защит по ПУЭ.

9.4.3. При выборе $I_{2с,з}$ по условию п. 9.3.1 ток $I_{2расч}$, входящий в (9.4), определяется по выражениям:

для замыкания одной фазы на землю

$$I^{(1)}_{2расч} = \frac{k_{2ток}}{k_{0ток}} \frac{I_{0с,з}}{3}; \qquad (9.6)$$

для замыкания двух фаз на землю

$$I^{(1,1)}_{2расч} = k_{п} \frac{k_{2ток}}{k_{0ток}} \frac{I_{0с,з}}{3} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}}, \qquad (9.7)$$

где $I_{0с,з}$ — ток срабатывания токовой защиты нулевой последовательности, с которой производится согласование; $Z_{0\Sigma}$ и $Z_{2\Sigma}$ — результирующие сопротивления схем замещения соответственно нулевой и обратной последовательностей относительно места расчетного КЗ; определяются для металлического КЗ; $k_{2ток}$ — максимальный коэффициент токораспределения в схеме замещения обратной последовательности, равный отношению тока в месте установки рассматриваемой защиты к току в месте КЗ; $k_{0ток}$ — по возможности минимальный (рассматривается тот же режим работы сети, что и при определении $k_{2ток}$) коэффициент токораспределения в схеме замещения нулевой последовательности, равный отношению тока в смежной линии, с защитой которой производится согласование, к току в месте КЗ; $k_{п}$ — коэффициент, учитывающий влияние переходных сопротивлений в месте КЗ, может быть принят равным 1,2.

Расчетный вид КЗ определяется в соответствии с приложением П8

при $k_{п} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}} > 1{,}0$ расчетным для согласования является замыкание двух фаз на землю;

при $k_{п} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}} < 1{,}0$ — замыкание на землю одной фазы.

Значение $Z_{0\Sigma}/Z_{2\Sigma}$ определяется по (П8.13) и (П8.11).

Вывод выражений (9.6) и (9.7) приведен в приложении П8.

9.4.4. При согласовании с защитами, действующими при КЗ в режиме длительной работы двумя фазами (которое производится дополнительно к п. 9.4.3, если на рассматриваемой смежной линии предусматривается указанный режим работы), ток $I_{2расч}$, входящий в (9.4), определяется по (П8.15)

$$I_{2расч} = k_{2ток} \frac{I_{0с,з}}{3} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}}, \qquad (9.8)$$

где $I_{0с,з}$ — то же, что в (9.6); $k_{2ток}$ — то же, что в (9.5); $Z_{0\Sigma}$ и $Z_{2\Sigma}$ — то же, что в (9.7), но относительно места разрыва в схеме с одновременным металлическим КЗ между тремя фазами в конце линии, работающей двумя фазами.

Ток срабатывания защиты по рассмотренному условию может быть ориентировочно (с запасом) принят по (П8.16)

$$I_{2с,з} \geqslant I_{0с,з}, \qquad (9.9)$$

где $I_{0с,з}$ — ток срабатывания токовой защиты нулевой последовательности, действующей в длительном режиме работы двумя фазами, на линии, для которой предусматривается такой режим работы.

9.4.5. При выборе $I_{2с,з}$ по условию п. 9.3.2 ток $I_{2расч}$, входящий в выражение (9.4), для согласования с дистанционной защитой смежных линий в сетях с изолированными нейтралями в целях упрощения целесообразно определять без учета сдвига углов сопротивлений элементов системы, принимая сопротивления элементов, входящих в схемы прямой и обратной последовательностей, одинаковыми. При этом ток $I_{2расч}$ определяется по выражению

$$I_{2расч} = k_{2ток} \frac{E_{ф}}{2Z_{\Sigma}}, \qquad (9.10)$$

где Z_{Σ} — результирующее сопротивление схемы прямой (обратной) последовательности по отношению к месту КЗ; определяется по (П8.19); $k_{2ток}$ — то же, что в (9.6) и (9.7).

9.4.6. При выборе $I_{2с,з}$ по условию п. 9.3.2 ток $I_{2расч}$, входящий в (9.4), для согласования с максимальной токовой защитой смежных линий в сетях с изолированными нейтралями определяется по выражению

$$I_{2расч} = k_{2ток} \frac{I_{с,з}}{\sqrt{3}}, \qquad (9.11)$$

где $I_{с,з}$ — ток срабатывания максимальной токовой защиты, с которой производится согласование; $k_{2ток}$ — то же, что в (9.5).

9.5. В тех случаях, когда последние ступени защит от замыканий на землю, установленных на сторонах высшего и среднего напряжений автотрансформатора, согласованы с защитами смежных линий, согласование с защитами линий в сетях с глухозаземленными нейтралями по пп. 9.3.1 и 9.3.2 ориентировочно может быть выполнено по (П8.14)

$$I_{2с,з} \geqslant (1{,}5—2{,}0) I_{0с,з}, \qquad (9.12)$$

где $I_{0с,з}$ — ток срабатывания последней, наиболее чувствительной ступени защиты от замыканий на землю автотрансформатора.

9.6. Выдержка времени защиты выбирается по условию согласования с теми защитами, с которыми она согласовывалась по чувствительности, т. е. с последними, наиболее чувствительными ступенями защит смежных линий от многофазных КЗ (дистанционная, максимальная токовая) и токовой защиты нулевой последовательности (последнее — в сетях с глухозаземленными нейтралями) или с токовой защитой обратной последовательности.

Защита действует последовательно: на разделение систем (секций) шин, на отключение выключателей той стороны автотрансформатора, куда направлена защита, на выходные реле защиты автотрансформатора аналогично тому, как дистанционная защита автотрансформаторов (см. п. 8.1.11).

Выдержка времени действия защиты по цепи автоматического ускорения должна приниматься больше максимального времени разновременности включения фаз выключателя автотрансформатора.

9.7. Чувствительность защиты по току проверяется по выражению

$$k_{ч,т} = \frac{I_{2к}}{I_{2с,з}}, \qquad (9.13)$$

где $I_{2к}$ — ток обратной последовательности в месте установки защиты при металлическом КЗ между двумя фазами в конце зоны резервирования в режиме, обусловливающем наименьший ток в защите.

Следует отметить, что одна из резервных защит автотрансформатора — данная или токовая защита нулевой последовательности (гл. 12) — должна удовлетворять требованию чувствительности в конце зоны резервирования при замыкании двух фаз на землю.

В соответствии с ПУЭ (п. 3.2.21) требуется обеспечить наименьший коэффициент чувствительности — порядка 1,2. Если на автотрансформаторе используется дистанционная защита второй ступени с характеристикой срабатывания, смещенной в первый квадрант комплексной плоскости и не охватывающей начало смеж-

ных линий и если в этой зоне не обеспечивается надежное действие первой ступени рассматриваемой дистанционной защиты (т. е. не обеспечивается надежное «зацепление» характеристик первой и второй ступеней дистанционной защиты автотрансформатора), чувствительность рассматриваемой защиты обратной последовательности должна проверяться при КЗ в начале зоны срабатывания указанной второй ступени дистанционной защиты (см. п. 8.1.12). При этом требуется обеспечить наименьший коэффициент чувствительности порядка 1,3, учитывая возможную погрешность дистанционной защиты.

Чувствительность защиты по мощности проверяется по выражению

$$k_{ч,\,м} = \frac{(I_{2з}U_{2з})_{min}}{K_I K_U S_{с,\,р}}, \qquad (9.14)$$

где $(I_{2з}U_{2з})_{min}$ — мощность обратной последовательности в месте установки защиты при металлическом КЗ между двумя фазами в конце зоны резервирования, в которой защита обратной последовательности работает как направленная, в режиме, обусловливающем наименьшее значение рассматриваемой мощности обратной последовательности; K_I и K_U — коэффициенты трансформации соответственно трансформаторов тока и трансформаторов напряжения; $S_{с,р}$ — мощность срабатывания реле направления мощности.

В соответствии с ПУЭ (п. 3.2.25) требуется обеспечить наименьший коэффициент чувствительности — примерно 1,4, а в рассмотренном выше случае использования на автотрансформаторе дистанционной защиты с характеристикой срабатывания, не охватывающей начало смежных линий, — повышенный коэффициент чувствительности — примерно 1,6.

10. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА С ПУСКОМ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

10.1. Ниже даны основные указания по расчету.

10.1.1. Максимальной токовой защиты с комбинированным пуском напряжения, выполненной с помощью реле тока типа РТ-40, фильтра-реле напряжения обратной последовательности типа РНФ-1М и минимального реле напряжения типа РН-54.

10.1.2. Максимальной токовой защиты с минимальным пуском напряжения в однофазном исполнении, устанавливаемой на стороне ВН автотрансформатора, (дополнение к токовой защите обратной последовательности для действия при КЗ между тремя фазами), выполненной с помощью реле тока типа РТ-40 и реле минимального напряжения типа РН-54.

10.2. Первичный ток срабатывания защиты определяется по условию отстройки от номинального тока $I_{ном}$ трансформатора (автотрансформатора) на стороне, где установлена рассматриваемая защита, по выражению

$$I_{с,\,з} = \frac{k_{отс}}{k_в} I_{ном}, \qquad (10.1)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, учитывающий ошибку реле и необходимый запас, может быть принят равным 1,2; $k_в$ — коэффициент возврата реле, может быть принят равным 0,8.

При установке защиты на стороне, где предусмотрено регулирование напряжения, в (10.1) следует учитывать возможность увеличения номинального тока, который в соответствии с ГОСТ 11677—75 * (пп. 4.1 и 4.7) не должен превышать номинальный ток для среднего ответвления более чем на 5 %. В тех случаях, когда максимальный рабочий ток $I_{рабmax}$ стороны трансформаторов (автотрансформаторов), на которой установлена рассматриваемая защита, меньше номинального $I_{ном}$, вместо последнего ($I_{ном}$) в (10.1) следует использовать $I_{рабmax}$.

10.3. В условиях эксплуатации рекомендуется также производить согласование по чувствительности рассматриваемой защиты с последними, наиболее чувствительными ступенями защит от многофазных КЗ предыдущих элементов или с максимальными токовыми защитами с пуском напряжения, установленными на сторонах более низкого напряжения защищаемого трансформатора (автотрансформатора).

10.3.1. Максимальной токовой защитой с пуском или без пуска напряжения по выражению

$$I_{с,з} = k_{отс} k_{ток} I_{с,з,пред}. \qquad (10.2)$$

10.3.2. Дистанционной защитой по выражению

$$I_{с,\,з} \geqslant \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}\left(\frac{Z_{\Sigma з}}{k'_{ток}} + \frac{Z_{с,\,з,\,пред}}{k_{ток}} + \Delta Z\right)}, \qquad (10.3)$$

где $I_{с,з,пред}$ — ток срабатывания максимальной токовой защиты предыдущего элемента, с которой производится согласование; $Z_{\Sigma з}$ — результирующее сопротивление до места установки рассматриваемой токовой защиты со стороны питания при КЗ на предыдущем элементе; $Z_{с,з,пред}$ — сопротивление срабатывания защиты предыдущего элемента, с которой производится согласование; ΔZ — сопротивление от места установки рассматриваемой токовой защиты до места установки защиты предыдущего элемента, с которой производится согласование; $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,1; $k_{ток}$, $k'_{ток}$ — коэффициенты токораспределения, равные отношению тока в месте установки рассматриваемой защиты к току в смежном элементе, с защитой которого производится согласование ($k_{ток}$), и к току в сопротивлении $Z_{\Sigma з}$ ($k''_{ток}$);

10.4. Первичные напряжения срабатывания защиты определяются по следующим условиям.

10.4.1. Для минимального реле напряжения, включенного на междуфазное напряжение (типа РН-54), как комбинированного, так и минимального пуска напряжения — исходя из:

10.4.1.1. Обеспечения возврата реле после отключения внешнего КЗ по выражению

$$U_{с,\,з} \leqslant \frac{U_{min}}{k_{отс} k_в}. \qquad (10.4)$$

10.4.1.2. Отстройки от напряжения самозапуска при включении от АПВ или АВР заторможенных двигателей нагрузки

$$U_{с,\,з} \leqslant \frac{U_{зап}}{k_{отс}}, \qquad (10.5)$$

где U_{min} — междуфазное напряжение в месте установки защиты в условиях самозапуска после отключения внешнего КЗ (определяется расчетом); в ориентировочных расчетах может быть принято равным $(0{,}9 \div 0{,}85) \times U_{ном}$; $U_{зап}$ — междуфазное напряжение в месте установки защиты в условиях самозапуска заторможенных двигателей нагрузки при включении их от АПВ или

АВР (определяется расчетом); в ориентировочных расчетах может быть принято равным примерно $0{,}7U_{ном}$; $k_{отс}$ — коэффициент отстройки; может быть принят равным 1,2; $k_в$ — коэффициент возврата реле; может быть принят равным 1,2.

10.4.2. Для фильтра-реле напряжений обратной последовательности (типа РНФ-1М) комбинированного пуска напряжения — исходя из минимальной уставки устройства (6 В междуфазных)

$$U_{2с,з}=0{,}06U_{ном}. \qquad (10.6)$$

По данным экспериментов и опыта эксплуатации при таком напряжении срабатывания обеспечивается отстройка от напряжения небаланса в расчетном (нагрузочном) режиме.

10.5. Согласование по чувствительности по п. 10.3 производится только в случаях, когда это признано целесообразным для обеспечения надежного электроснабжения потребителей (по аналогии с п. 9.1.3) и при этом обеспечивается требуемая чувствительность рассматриваемой защиты. Согласование защиты по п. 10.1.2 следует производить лишь в случаях, когда оно обеспечено для токовой защиты обратной последовательности (см. п. 9.3). Однако в этих случаях согласование защиты по п. 10.1.2 часто обеспечивается автоматически.

Расчетным для согласования по (10.2) и (10.3) является режим, когда коэффициент токораспределения $k_{ток}$ имеет максимальное значение.

10.6. Вторичный ток срабатывания реле определяется по выражению

$$I_{с,р}=I_{с,з}\frac{k_{сх}}{K_I}, \qquad (10.7)$$

где $k_{сх}$ — коэффициент, зависящий от схемы соединения трансформаторов тока защиты; при соединении последних в звезду $k_{сх}=1{,}0$, при соединении трансформаторов тока в треугольник $k_{сх}=\sqrt{3}$; K_I — коэффициент трансформации трансформаторов тока защиты.

10.7. Выдержка времени защиты выбирается по условию согласования с последними, наиболее чувствительными ступенями защит от многофазных КЗ предыдущих элементов (максимальной токовой с пуском напряжения или без пуска, дистанционной защитой), в частности с максимальными токовыми защитами с пуском напряжения, установленными на сторонах того же или более низкого напряжения защищаемого трансформатора (автотрансформатора).

10.8. Чувствительность защиты определяется по выражениям:

для реле тока

$$k_{чI}=\frac{I_{зmin}}{I_{с,з}}; \qquad (10.8)$$

для минимального реле напряжения, включенного на междуфазное напряжение (типа РН-54), комбинированного пуска напряжения

$$k_{чU}=\frac{U_{с.з}k_в}{U_{зmax}}; \qquad (10.9)$$

для минимального реле напряжения, включенного на междуфазное напряжение (типа РН-54), минимального пуска напряжения

$$k_{чU}=\frac{U_{с.з}}{U_{зmax}}; \qquad (10.10)$$

для фильтра-реле напряжения обратной последовательности (типа РНФ-1М) комбинированного пуска напряжения

$$k_{ч2U}=\frac{U_{2зmin}}{U_{2с,з}}, \qquad (10.11)$$

где $I_{з\,min}$ — первичное значение тока в месте установки защиты при металлическом КЗ расчетного вида в расчетной точке в режиме, обусловливающем наименьшее значение этого тока; $U_{зmax}$ — первичное значение междуфазного напряжения в месте установки защиты при металлическом КЗ между фазами в расчетной точке в режиме, обусловливающем наибольшее значение этого напряжения; $U_{2зmin}$ — первичное значение междуфазного напряжения обратной последовательности в месте установки защиты при металлическом КЗ между двумя фазами в расчетной точке в режиме, обусловливающем наименьшее значение этого напряжения; $k_в$ — то же, что в (10.4).

Для защиты с комбинированным пуском напряжения (см. п. 10.1.1) чувствительность по току по выражению (10.8) определяется при замыкании между двумя фазами, для защиты с минимальным пуском напряжения (п. 10.1.2) — при замыкании между тремя фазами.

При определении чувствительности минимального реле напряжения, включенного на междуфазные напряжения, комбинированного пуска напряжения (10.9) учитывается коэффициент возврата $k_в$, поскольку в случае симметричного КЗ, как правило, кратковременно появляется напряжение обратной последовательности.

В соответствии с ПУЭ (п. 3.2.21) как для реле тока, так и для реле напряжения требуется обеспечить наименьший коэффициент чувствительности:

при выполнении защитой функций основной защиты шин — примерно 1,5 (при КЗ на шинах);

при выполнении защитой функций резервирования — примерно 1,2 (при КЗ в конце зоны резервирования).

В случае использования на автотрансформаторе второй ступени дистанционной защиты с характеристикой срабатывания, смещенной в первый квадрант комплексной плоскости, не охватывающей начало смежной линии и не имеющей «зацепление» с первой ступенью указанной дистанционной защиты, чувствительность реле тока и минимального реле напряжения рассматриваемой максимальной токовой защиты с минимальным пуском напряжения должна проверяться при КЗ в начале зоны срабатывания указанной второй ступени дистанционной защиты (см. п. 8.1.12). При этом необходимо обеспечить наименьший коэффициент чувствительности — примерно 1,3, учитывая возможную погрешность дистанционной защиты.

11. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

Рассматриваемая защита может применяться в случае, когда по условиям чувствительности возможно неиспользование пуска по напряжению защиты по гл. 10.

11.1. Первичный ток срабатывания защиты, выполненной с помощью реле тока типа РТ-40, определяется по условию отстройки от тока в месте ее установки при самозапуске двигателей нагрузки по выражению

$$I_{с,з}=\frac{k_{отс}k_{зап}}{k_в}I_{раб\,max}, \qquad (11.1)$$

где $I_{раб\,max}$ — первичное значение максимального рабочего тока в месте установки защиты; $k_{зап}$ — коэффициент, учитывающий увеличение тока в условиях самозапуска заторможенных двигателей нагрузки; зависит от удаленности, процентного содержания в нагрузке и порядка отключения двигателей (определяется расчетом); $k_{отс}$, $k_в$ — то же, что в (10.1).

В случаях, когда режим самозапуска возникает не непосредственно после возникновения КЗ (например, в результате действия АВР), коэффициент возврата $k_в$ в (11.1) не учитывается.

11.2. Вторичный ток срабатывания реле определяется по (10.7).

11.3. Выдержка времени защиты выбирается по условию согласования с последними, наиболее чувствительными ступенями защит от многофазных КЗ предыдущих элементов аналогично тому, как выдержка времени максимальной токовой защиты с пуском напряжения (см. п. 10.7).

11.4. Чувствительность определяется по (10.8) при металлическом КЗ между двумя фазами в расчетной точке в режиме, обусловливающем наименьшее значение тока в месте установки защиты. При этом в соответствии с ПУЭ (п. 3.2.21) требуется обеспечить наименьший коэффициент чувствительности такой же, как и для реле тока максимальной токовой защиты с пуском напряжения (см. п. 10.8).

12. СТУПЕНЧАТАЯ ТОКОВАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННЫМИ НЕЙТРАЛЯМИ

12.1. Ниже даны основные указания по расчету ступенчатой токовой направленной защиты нулевой последовательности от замыканий на землю, выполненной с помощью реле тока типа РТ-40 и серии РНТ-560.

Приведенные ниже указания даны в предположении, что защита выполняется направленной. Однако для повышения надежности, а также в ряде случаев и чувствительности защиты следует стремиться выполнять направленными только те ее ступени, селективность которых при выполнении их ненаправленными не обеспечивается.

12.2. Первичный ток срабатывания первой и второй ступеней защиты выбирается по следующим условиям.

12.2.1. Согласования по чувствительности соответственно с первой и второй ступенями защит от замыканий на землю смежных линий по выражению, аналогичному (10.2),

$$I^{\mathrm{I\,(II)}}_{0\mathrm{c,\,з}} \geqslant k_{\mathrm{отс}} k_{\mathrm{ток}} I^{\mathrm{I\,(II)}}_{0\mathrm{c,\,з,\,пред}}, \qquad (12.1)$$

где $I^{\mathrm{I\,(II)}}_{0\mathrm{c,\,з,\,пред}}$ — ток срабатывания ступени защиты от замыканий на землю смежной линии, с которой производится согласование; $k_{\mathrm{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,1; $k_{\mathrm{ток}}$ — коэффициент токораспределения для токов нулевой последовательности, равный отношению тока в месте установки рассматриваемой защиты к току в смежной линии, с защитой которой производится согласование.

Расчетным для согласования по (12.1) является режим работы сети, подстанции и защищаемого автотрансформатора (положение регулятора напряжения), при котором коэффициент токораспределения $k_{\mathrm{ток}}$ имеет наибольшее значение.

В целях повышения чувствительности защит от замыканий на землю линий последующих участков сети может оказаться целесообразным согласовать первую и вторую ступени рассматриваемой защиты не с первой и второй, а соответственно со второй и третьей ступенями защит предыдущих линий.

12.2.2. Отстройки от утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты в неполнофазном режиме, возникающем в цикле ОАПВ на смежных линиях, а также в длительном неполнофазном режиме на предыдущих линиях (если для них предусмотрен такой режим работы).

Расчет производится по выражению

$$I^{\mathrm{I\,(II)}}_{0\mathrm{c,\,з}} \geqslant k_{\mathrm{отс}} 3I_{0\mathrm{нб.р}}, \qquad (12.2)$$

где $3I_{0\mathrm{нб.р}}$ — максимальное значение утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки рассматриваемой защиты в неполнофазном режиме, возникающем в цикле ОАПВ либо в длительном неполнофазном режиме; $k_{\mathrm{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,4—1,5 для защиты, установленной на стороне 330—500 кВ, при использовании реле типа РТ-40; 1,3 — для всех остальных случаев.

Отстройка от утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки рассматриваемой защиты в неполнофазном режиме в цикле ОАПВ, не требуется, если соответствующая ступень отстроена от цикла ОАПВ по времени.

12.3. Выбранный по рассмотренным выше условиям ток срабатывания второй ступени проверяется в соответствии с указаниями, приведенными в п. 12.4, по условию отстройки от тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока [см. (12.3)]:

12.3.1. При КЗ между тремя фазами на стороне низшего напряжения рассматриваемого автотрансформатора и за трансформаторами и автотрансформаторами данной и противоположных подстанций, если рассматриваемая вторая ступень не согласована по времени с защитами от многофазных КЗ, установленными на сторонах низшего напряжения указанных трансформаторов и автотрансформаторов.

12.3.2. При качаниях или асинхронном ходе, если выдержка времени рассматриваемой ступени не превышает длительности периода качаний (в ориентировочных расчетах период качаний может быть принят 1,5 с).

12.4. Первичный ток срабатывания третьей ступени выбирается по условию отстройки от тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока:

12.4.1. При КЗ между тремя фазами на стороне низшего напряжения рассматриваемого автотрансформатора и за трансформаторами и автотрансформаторами данной и противоположных подстанций по выражению

$$I^{\mathrm{III}}_{0\mathrm{c,\,з}} \geqslant k_{\mathrm{отс}} I_{0\mathrm{нб}}, \qquad (12.3)$$

где $I_{0\mathrm{нб}}$ — ток небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока в установившемся режиме при рассматриваемых внешних КЗ между тремя фазами; $k_{\mathrm{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,25.

12.4.2. В послеаварийном нагрузочном режиме по выражению

$$I^{\mathrm{III}}_{0\mathrm{c,\,з}} = \frac{k_{\mathrm{отс}}}{k_{\mathrm{в}}} (I_{0\mathrm{нб}} + 3I_{0\mathrm{н.р}}), \qquad (12.4)$$

где $I_{0\mathrm{нб}}$ — ток небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока в послеаварийном нагрузочном режиме; $3I_{0\mathrm{н.р}}$ — утроенный ток нулевой последовательности, обусловленный несимметрией в системе, возникающей, например, при работе смежной линии с односторонним питанием в неполнофазном режиме; $k_{\mathrm{отс}}$ — то же, что в (12.3); $k_{\mathrm{в}}$ — коэффициент возврата, для рассматриваемых реле может быть принят равным 0,8 для реле типа РТ-40, 0,6 для реле серии РНТ-560.

Отстройка от тока небаланса по п. 12.4.1 не требуется, если рассматриваемая третья ступень согласована по времени с защитами от многофазных КЗ, установленными на сторонах низшего напряжения указанных трансформаторов и автотрансформаторов.

В (12.4) должны рассматриваться значения токов небаланса, учитывающие возможность качаний и асин-

хронного хода в послеаварийном нагрузочном режиме, если выдержка времени третьей ступени соответствует указанной в п. 12.3.2.

12.5. В условиях эксплуатации рекомендуется также производить согласование по чувствительности третьей ступени защиты с последними, наиболее чувствительными ступенями защит от замыканий на землю смежных линий по (12.1). Однако указанное согласование производится только в случаях, когда это признано целесообразным для обеспеченяи надежного электроснабжения потребителей (по аналогии с п. 9.3) и при этом обеспечивается требуемая чувствительность рассматриваемой защиты.

12.6. Ток небаланса в (12.3) и (12.4) приближенно может быть определен по выражению

$$I_{\text{онб}} \approx k_{\text{нб}} I_{\text{расч}}, \qquad (12.5)$$

где $I_{\text{расч}}$ — ток в месте установки защиты при рассматриваемом внешнем КЗ между тремя фазами [см. (12.3)], при качаниях или асинхронном ходе [см. (12.4)] в послеаварийном нагрузочном режиме; $k_{\text{нб}}$ — коэффициент небаланса.

Значение коэффициента небаланса $k_{\text{нб}}$ принимается в зависимости от кратности тока $I_{\text{расч}}$:

при кратности не более 2—3 по отношению к первичному току трансформаторов тока равным 0,05;

при бо́льших кратностях, но не превосходящих 0,7—0,8 по отношению к предельной кратности первичного тока трансформаторов тока равным 0,05—0,1.

С бо́льшей точностью, а также при бо́льших кратностях тока $I_{\text{расч}}$ по отношению к первичному номинальному току трансформаторов тока ток небаланса $I_{\text{онб}}$ может быть определен в соответствии с приложением VII «Руководящих указаний по релейной защите. Выпуск 12».

Необходимо отметить, что расчет тока небаланса $I_{\text{онб}}$ при внешних удаленных КЗ между тремя фазами следует производить с учетом тока нагрузки.

12.7. Ток срабатывания автоматически ускоряемой ступени защиты дополнительно к указанным выше условиям следует также отстраивать от броска намагничивающего тока при включении под напряжение защищаемого автотрансформатора (по аналогии с «Руководящими указаниями по релейной защите. Выпуск 12», разд. Г, п. 1,а и приложение V), если время действия защиты по цепи автоматического ускорения не представляется возможным выполнить большим максимального времени разновременности включения фаз выключателя автотрансформатора.

12.8. Выдержка времени первой, второй и третьей ступеней защиты выбирается по условию согласования соответственно с первой, второй (или второй, третьей — см. п. 12.2.1) и последней ступенями защит от замыканий на землю смежных линий.

Защита действует последовательно: на разделение систем (секций) шин, на отключение выключателя той стороны автотрансформатора, где установлена защита, на отключение всего автотрансформатора аналогично дистанционной защите автотрансформатора (см. п. 8.1.11).

12.9. Чувствительность реле тока защиты определяется по выражению

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\text{з}}}{I_{\text{ос, з}}}, \qquad (12.6)$$

где $3I_{0\text{з}}$ — утроенный ток нулевой последовательности в месте установки защиты при металлическом КЗ на землю одной фазы в расчетной точке в режиме, обусловливающем наименьшее значение этого тока; $I_{\text{ос,з}}$ — ток срабатывания рассматриваемой ступени защиты.

Чувствительность первой и второй ступеней защиты проверяется при замыкании на землю на шинах рассматриваемой подстанции. При этом желательно обеспечение чувствительности первой ступени в целях уменьшения времени действия защиты на разделение систем (секций) шин. Однако окончательно пригодность выбранного тока срабатывания первой и второй ступеней защиты оценивается по чувствительности согласуемых с ними соответственно второй и третьей ступеней защит от замыканий на землю смежных линий смежного напряжения.

Чувствительность третьей ступени защиты проверяется при замыканиях на землю в конце смежных линий, защита которых резервируется.

В соответствии с ПУЭ (п. 3.2.21) требуется обеспечить наименьший коэффициент чувствительности — порядка 1,2.

Чувствительность реле направления мощности рассмотренной защиты определяется по аналогии с указаниями, приведенными в «Руководящих указаниях по релейной защите. Выпуск 12», разд. Ж.

13. ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НА СТОРОНЕ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Защита выполняется с помощью максимального реле напряжения типа РН-53/60Д, имеющего достаточную термическую стойкость (110 В). Первичное напряжение срабатывания защиты принимается минимально возможным для данного реле, т. е. соответствующим $U_{\text{с,р}min} = 15$ В. Выдержка времени принимается примерно 9 с (защита действует на сигнал).

14. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

14.1. Защита устанавливается на трехобмоточных трансформаторах, имеющих питание со стороны среднего напряжения.

14.2. Первичный ток срабатывания защиты выбирается по тем же условиям, что и ток третьей ступени токовой направленной защиты нулевой последовательности автотрансформатора (см. п. 12.4, 12.5).

15. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Ток срабатывания реле тока защиты от перегрузки (действующей на сигнал) определяется по (10.1), в котором: $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток обмотки трансформатора (автотрансформатора) с учетом регулирования напряжения (см. п. 10.2), на стороне которой установлена рассматриваемое реле; $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимается равным 1,05.

16. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ВВОДОВ ОБМОТКИ ВЫСШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

16.1. Ниже даны основные указания по расчету устройства контроля изоляции высоковольтных вводов 500 кВ автотрансформаторов, выполненного с помощью блок-реле типа КИВ-500Р и согласующего трансформатора типа ТПС-0,66.

16.2. Блок-реле типа КИВ-500Р включает сигнальный (реле типа РН-53/60Д), отключающий (реле типа РТ-40/Ф) и измерительный (миллиамперметр) элементы.

16.2.1. Основным элементом является сигнальный. Его срабатывание указывает на начавшееся прогрессирующее повреждение изоляции высоковольтного ввода. Срабатывание сигнального элемента должно происходить при токе в первичной обмотке согласующего трансформатора, равном 5—7 % номинального емкостного тока ввода $I_{\text{ном,емк,ввода}}$, т. е. ток срабатывания сигнального элемента должен определяться по выражению

$$I_{\text{с,сигн}} = (0{,}05—0{,}07) I_{\text{ном,емк,ввода}}. \qquad (16.1)$$

Выдержка времени сигнального элемента определяется из условия отстройки от максимальной выдержки времени резервных защит элементов сети высшего напряжения (500 кВ), примыкающей к автотрансформатору.

16.2.2. Отключающий элемент должен вводиться в работу только после срабатывания реле времени сигнального элемента. Ток срабатывания отключающего элемента определяется по выражению

$$I_{\text{с,откл}} = (0{,}2—0{,}25) I_{\text{ном,емк,ввода}}. \qquad (16.2)$$

Выдержка времени отключающего элемента определяется из условия отстройки от быстродействующих защит и рекомендуется в пределах 1,2—1,3 с.

Для исключения ложных срабатываний при повреждениях в цепях соединения согласующего трансформатора и вводов 500 кВ отключающий элемент должен иметь дополнительную блокировку. Срабатывание блокирующего реле должно происходить при резком изменении тока в первичной обмотке согласующего трансформатора от нуля до $(0{,}6 \div 0{,}7) I_{\text{ном,емк,ввода}}$.

16.2.3. Ток небаланса $I_{\text{нб}}$ в блок-реле КИВ должен быть отрегулирован минимальным. Рекомендуемое значение $I_{\text{нб}} = (0{,}005 \div 0{,}015) I_{\text{ном,емк,ввода}}$. Это значение $I_{\text{нб}}$ может быть достигнуто подбором соответствующих ответвлений первичной обмотки согласующего трансформатора.

17. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ОБМОТОК ГРУППЫ ОДНОФАЗНЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

17.1. Ниже даны основные указания по расчету токовой защиты вынесенных на отдельный (боковой) стержень магнитопровода регулировочных обмоток группы однофазных автотрансформаторов (АОДЦТН-167000/500/220, АОДЦТН-167000/500/330 и АОДЦТН-267000/500/220 — рис. 17.1). Защита включена на ток нулевой последовательности в компенсационных обмотках группы и имеет торможение от геометрической разности токов нулевой последовательности на сторонах среднего и высшего напряжений; в целях обеспечения требуемого торможения на стороне среднего напряжения может использоваться промежуточный повышающий трансформатор тока.

17.2. Ток срабатывания реле защиты выбирается по условию отстройки от максимального тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока в цепи компенсационной обмотки при внешних КЗ между тремя фазами на сторонах среднего и высшего напряжений автотрансформатора по выражению

$$I_{\text{ос. р}} = k_{\text{отс}} k_{\text{пер}} \frac{I_{0\text{нб}}}{K_{I\text{комп}}}, \qquad (17.1)$$

где $I_{0\text{нб}}$ — первичный ток небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока компенсационной обмотки в установившемся режиме при рассматриваемых внешних КЗ между тремя фазами; $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас; принимается равным 1,25; $k_{\text{пер}}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим; принимается равным 1,5—2,0, поскольку защита работает без выдержки времени; $K_{I\text{комп}}$ — коэффициент трансформации трансформатора тока, установленного в цепи компенсационной обмотки автотрансформатора.

Первичный ток небаланса $I_{0\text{нб}}$, входящий в выражение (17.1), приближенно может быть определен по выражению

$$I_{0\text{нб}} \approx k_{\text{нб}} I_{\text{комп,расч}}, \qquad (17.2)$$

где $I_{\text{комп,расч}}$ — наибольший ток в компенсационной обмотке автотрансформатора при рассматриваемых внешних КЗ между тремя фазами; $k_{\text{нб}}$ — коэффициент небаланса.

Ток $I_{\text{комп,расч}}$, входящий в (17.2), определяется для случая работы автотрансформатора на нижнем ответвлении по (П9.6)

$$I_{\text{комп. расч}} = I_{\text{ВН}} \frac{U_{\text{рег}}}{U_{\text{НН}}}, \qquad (17.3)$$

где $I_{\text{ВН}}$ — ток в обмотке высшего напряжения автотрансформатора при внешних металлических КЗ между тремя фазами на сторонах среднего и высшего напряжений автотрансформатора в максимальном режиме работы систем; $U_{\text{рег}}$ — напряжение на регулировочной обмотке; $U_{\text{НН}}$ — номинальное напряжение обмотки низшего напряжения автотрансформатора.

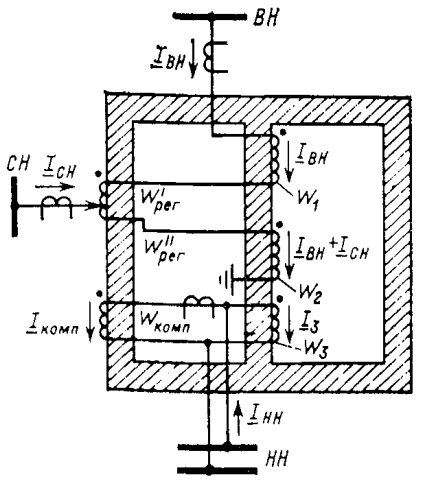


Рис. 17.1. Схема размещения обмоток и распределение токов в автотрансформаторе с вынесенной на боковой стержень магнитопровода регулировочной обмоткой.

Примечание. На схеме показаны трансформаторы тока, используемые для защиты регулировочной обмотки

Коэффициент небаланса, входящий в выражение (17.2), принимается в зависимости от кратности тока $I_{\text{комп,расч}}$ по отношению к первичному номинальному току трансформатора тока в компенсационной обмотке:

при небольших кратностях — до $(2\div3)I_{\text{ном,т,т}}$ $k_{\text{нб}}=0{,}05$;

при бо́льших кратностях, но не превосходящих $(0{,}7\div0{,}8)I_{\text{к10}}$ ($I_{\text{к10}}$ — предельная кратность первичного тока трансформаторов тока при 10 %-ной погрешности), $k_{\text{нб}}=0{,}05\div0{,}1$.

С бо́льшей точностью, а также при бо́льших кратностях тока $I_{\text{комп,расч}}$ по отношению к первичному номинальному току трансформатора тока в компенсационной обмотке первичный ток небаланса $I_{0\text{нб}}$ может быть определен в соответствии с приложением VII «Руководящих указаний по релейной защите. Выпуск 12».

17.3. Число витков рабочей обмотки НТТ реле, соответствующее току срабатывания реле защиты $I_{\text{ос,р}}$, определяется по выражению

$$w_{\text{раб}}=\frac{F_{\text{с,р}}}{I_{\text{ос,р}}}, \qquad (17.4)$$

где $F_{\text{с,р}}$ — МДС срабатывания реле; для реле серии ДЗТ-11 по данным завода $F_{\text{с,р}}=100$ А; $I_{\text{ос,р}}$ — ток срабатывания реле защиты, определяемый по выражению (17.1).

17.4. Число витков тормозной обмотки НТТ реле, обеспечивающих недействие защиты при внешних замыканиях на землю, определяется по выражению

$$w_{\text{торм}}\geqslant k_{\text{отс}}\frac{3I_{0\text{раб,р}}w_{\text{раб}}}{3I_{0\text{торм,р}}\operatorname{tg}\alpha}, \qquad (17.5)$$

где $3I_{0\text{раб,р}}$ и $3I_{0\text{торм,р}}$ — токи, проходящие соответственно в рабочей и тормозной обмотках реле при расчетном внешнем замыкании на землю; $w_{\text{раб}}$ — используемое число витков рабочей обмотки НТТ реле, определяемое по (17.4); $\operatorname{tg}\alpha$ — тангенс угла между касательной к характеристике реле, соответствующей минимальному торможению, и осью абсцисс; определяется в соответствии с рекомендациями п. 3.1.6; $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки; может быть принят равным 1,5.

Ток в рабочей обмотке реле $3I_{0\text{раб,р}}$, входящий в (17.5), определяется при внешних замыканиях на землю на стороне среднего и высшего напряжений автотрансформатора в соответствии с приложением П9 по выражениям:

при верхнем положении переключателя РПН, исходя из (П9.10), с учетом направления токов при внешних КЗ

$$3I_{0\text{раб,р}}=\frac{3(I_{0\text{СН}}-I_{0\text{ВН}})}{K_{I\text{комп}}}\frac{U_{\text{рег}}}{U_{\text{НН}}}; \qquad (17.6)$$

при нижнем положении переключателя РПН, исходя из (П9.11),

$$3I_{0\text{раб,р}}=\frac{3I_{0\text{ВН}}}{K_{I\text{комп}}}\frac{U_{\text{рег}}}{U_{\text{НН}}}, \qquad (17.7)$$

где $I_{0\text{СН}}$ и $I_{0\text{ВН}}$ — действительные значения тока нулевой последовательности, проходящего при расчетном внешнем замыкании на землю соответственно на сторонах среднего и высшего напряжений автотрансформатора; $U_{\text{рег}}$ — напряжение на регулировочной обмотке автотрансформатора; $U_{\text{НН}}$ — номинальное напряжение обмотки низшего напряжения автотрансформатора; $K_{I\text{комп}}$ — то же, что и в выражении (17.1).

Ток в тормозной обмотке реле $3I_{0\text{торм,р}}$, входящий в (17.5), рассматривается при внешних замыканиях на землю на сторонах среднего и высшего напряжений автотрансформатора соответственно в тех же точках и режимах работы, что и ток в рабочей обмотке реле [см. (17.6) и (17.7)], и определяется по выражению

$$3I_{0\text{торм,р}}=\frac{3I_{0\text{СН}}}{K_{I\text{СН}}K_{I\text{пром}}}-\frac{3I_{0\text{ВН}}}{K_{I\text{ВН}}}, \qquad (17.8)$$

где $I_{0\text{СН}}$ и $I_{0\text{ВН}}$ — то же, что и в (17.6) и (17.7); $K_{I\text{СН}}$ и $K_{I\text{ВН}}$ — коэффициенты трансформации трансформаторов тока, используемых для защиты и установленных соответственно на сторонах среднего и высшего напряжений автотрансформатора; $K_{I\text{пром}}$ — коэффициент трансформации промежуточного трансформатора, установленного во вторичной цепи трансформатора тока стороны среднего напряжения.

Расчетным для определения необходимого числа витков тормозной обмотки по (17.5) является минимальное торможение при наибольшем токе в рабочей обмотке реле. Этому, как правило, соответствует один из следующих случаев внешнего замыкания на землю:

повреждение на стороне высшего напряжения при нижнем положении переключателя РПН (когда все витки регулировочной обмотки обтекаются током стороны высшего напряжения) и минимальном режиме работы системы среднего напряжения;

повреждение на стороне среднего напряжения при верхнем положении переключателя РПН (когда все витки регулировочной обмотки обтекаются разностью токов сторон среднего и высшего напряжений) и минимальном режиме работы системы высшего напряжения.

Рассчитанное рассмотренным способом число витков тормозной обмотки $w_{\text{торм}}$ при неиспользовании промежуточного трансформатора [в (17.8) $K_{I\text{пром}}=1$], как правило, превышает количество витков тормозных обмоток НТТ реле, выпускаемых в настоящее время промышленностью, что и привело к необходимости использования в схеме промежуточного трансформатора с $K_{I\text{пром}}<1$ для увеличения тормозного тока в реле.

17.5. Первичный ток срабатывания блокирующего реле защиты, включенного на ток нулевой последовательности стороны высшего напряжения и вводимого в действие в режиме длительной работы автотрансформатора с отключенным выключателем на стороне среднего напряжения, принимается

$$I_{\text{ос,з,блок}}=1{,}5I_{\text{ном}}, \qquad (17.9)$$

где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток защищаемого автотрансформатора.

В целях проверки эффективности использования блокирующего реле должно быть проверено недействие рассматриваемой токовой защиты регулировочной обмотки при внешнем замыкании на землю на стороне высшего напряжения с током

$$3I_{0\text{ВН}}=1{,}2I_{\text{ос,з,блок}} \qquad (17.10)$$

в режиме отключенного выключателя на стороне среднего напряжения. Указанная проверка производится исходя из тормозной характеристики реле, соответствующей минимальному торможению. При этом ток в рабочей обмотке реле определяется по (17.7), а ток в тормозной обмотке реле — по (17.8) при $I_{0\text{СН}}=0$.

17.6. Чувствительность защиты может не проверяться, так как расчет токов КЗ, разработанный только для замыкания витков половины и всей регулировочной обмотки[1], связан со сложными расчетами, а при повреждениях такого количества витков практически всегда обеспечивается хорошая чувствительность защиты.

[1] **Петров С. Я., Бергер П. А.** Инженерный метод расчета токов при повреждении регулировочной обмотки автотрансформаторов 500—750 кВ. В сб. Автоматическое управление энергосистемами в аварийном режиме. Труды ЭСП. М.: Энергия, 1981.

18. ЗАЩИТА СИНХРОННОГО КОМПЕНСАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО В БЛОКЕ С АВТОТРАНСФОРМАТОРОМ

18.1. ПРОДОЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

18.1.1. Ниже даны основные указания по расчету дифференциальной токовой защиты синхронного компенсатора, работающего в блоке с автотрансформатором, выполненной с реле типа ДЗТ-11/5.

18.1.2. Первичный ток срабатывания защиты $I_{с,з}$ выбирается по условию обеспечения максимально возможной при используемом реле чувствительности защиты. При этом практически возможны два случая:

18.1.2.1. Для защиты синхронного компенсатора используются трансформаторы тока с одинаковыми коэффициентами трансформации.

18.1.2.2. Для защиты синхронного компенсатора используются трансформаторы тока с коэффициентами трансформации, отличающимися в 2 раза.

18.1.3. В случае по п. 18.1.2.1 в дифференциальной цепи защиты используется максимально возможное число витков рабочей обмотки НТТ реле ($w_{раб}$=144 витка), что соответствует первичному току срабатывания защиты

$$I_{с.з}=\frac{F_{с.р}}{w_{раб}}K_I=\frac{100}{144}K_I=0{,}695K_I, \quad (18.1)$$

где $F_{с,р}$ — МДС срабатывания реле; для реле серии ДЗТ-11 $F_{с,р}$=100 А; K_I — коэффициент трансформации трансформаторов тока, используемых для защиты.

В случае по п. 18.1.2.2 к трансформаторам тока с меньшим коэффициентом трансформации подключаются 72 витка, а к трансформаторам тока с бóльшим коэффициентом трансформации — 144 витка рабочей обмотки НТТ реле. При этом ток срабатывания защиты $I_{с,з}$ определяется для основной стороны (сторона с меньшим вторичным током) по (18.1).

18.1.4. Тормозная обмотка НТТ реле присоединяется к трансформаторам тока, установленным со стороны нейтрали, что обеспечивает отсутствие торможения при КЗ в синхронном компенсаторе в период пуска.

18.1.5. Выбор используемого числа витков тормозной обмотки НТТ реле, обеспечивающих недействие защиты при внешних КЗ между тремя фазами и асинхронном ходе синхронного компенсатора, т. е. отстройка от тока небаланса $I'_{нб.расч}$ в указанных случаях, производится по выражению, полученному из (2.4) и (3.4),

$$w_{торм}\geqslant\frac{(k_{отс}k_{пер}k_{одн}\varepsilon+I_{кmax}w_{раб}}{I_{торм}\operatorname{tg}\alpha}, \quad (18.2)$$

где все обозначения те же, что в (2.4) и (3.4).

Значения коэффициентов в (18.2) могут быть приняты:

$$k_{отс}=1{,}5;\ k_{пер}=1{,}0;\ k_{одн}=1{,}0;\ \varepsilon=0{,}1;$$

($k_{одн}$ принимается равным единице, поскольку со стороны нейтрали и фазных выводов устанавливаются трансформаторы тока разных типов). Учитывая также, что для реле серии ДЗТ-11 можно принять $\operatorname{tg}\alpha\approx$ $\approx$0,75 (при $F_{раб\,max}\geqslant$200 А) и что при внешнем КЗ $I_{торм}=I_{к\,max}$, из (18.2) можно получить необходимое число используемых витков тормозной обмотки:

$$w_{торм.\,расч}\geqslant\frac{1{,}5\cdot1\cdot1\cdot0{,}1I_{кmax}w_{раб}}{I_{кmax}\cdot0{,}75}=$$
$$=0{,}2w_{раб}=0{,}2\cdot144=28{,}8\text{ витка},$$

т. е. на реле должно быть установлено $w_{торм}$= =29 витков.

18.2. ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

18.2.1. Ниже даны основные указания по расчету защиты от однофазных замыканий на землю в обмотке статора синхронного компенсатора, выполненной с помощью устройства типа ЗЗГ-2.

Устройство типа ЗЗГ-2 рассмотрено в приложении П10, принципиальная схема устройства приведена на рис. П10.1.

18.2.2. Устройство содержит два основных блока:

18.2.2.1. Блок основной гармоники — максимальное реле напряжения, реагирующее на повышение напряжения нулевой последовательности первой гармоники и предназначенное для защиты части обмотки статора синхронного компенсатора, примыкающей к его линейным выводам.

18.2.2.2. Блок третьей гармоники — реле производной, реагирующее на значения амплитуды и ее производной по времени напряжения третьей гармоники и предназначенное для защиты нейтрали и примыкающей к ней части обмотки статора синхронного компенсатора.

18.2.3. Напряжение срабатывания максимального реле напряжения выбирается в пределах

$$U_{0\,с.р}=5\div15\text{ В}.$$

Напряжение срабатывания реле производной составляет

$$\frac{U_{зк}}{U_{знагр}}=1{,}3\pm10\%,$$

где $U_{з\,к}$ — напряжение третьей гармоники при возникновении замыкания на землю (возрастает скачкообразно); $U_{з\,нагр}$ — напряжение третьей гармоники в нагрузочном режиме.

Реле производной возвращается в исходное положение при

$$\frac{U_{зк}}{U_{знагр}}=0{,}85\pm10\%.$$

Время срабатывания реле производной принимается

$$t_{с,р}\approx0{,}3\text{ с}.$$

18.3. ЗАЩИТА ОТ ПОТЕРИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Защита предназначена для отключения синхронного компенсатора с контролем напряжения на его выводах, который позволяет предотвратить отключение в режиме работы синхронного компенсатора без возбуждения, когда напряжение в системе находится на допустимом уровне.

Напряжение срабатывания рассматриваемой защиты принимается в пределах

$$U_{с,з}=(0{,}6\div0{,}8)U_{ном}.$$

Время срабатывания защиты определяется отстройкой от кратковременных переходных режимов и принимается в зависимости от конкретных условий работы системы в пределах

$$t_{с,з}=0{,}5\div3\text{ с}.$$

18.4. ЗАЩИТА ОТ ИСЧЕЗНОВЕНИЯ ИЛИ СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Защита предназначена для предотвращения пуска синхронного компенсатора с отключенным пусковым реактором при появлении напряжения после его длительного исчезновения или значительного снижения.

Напряжение срабатывания рассматриваемой защиты принимается в пределах

$$U_{с,з}=(0{,}15\div 0{,}2)\,U_{ном}.$$

Время срабатывания защиты принимается

$$t_{с,з}\approx 9 \text{ с}.$$

18.5. ЧАСТОТНАЯ ЗАЩИТА

Защита предназначена для того, чтобы в режиме, когда подстанция с синхронным компенсатором работает как тупиковая, отключать синхронный компенсатор после отключения питающей линии со стороны системы. В противном случае за счет инерционного выбега синхронного компенсатора будут поддерживаться напряжение на шинах и дуга в месте повреждения.

Частота срабатывания реагирующего органа (реле понижения частоты типа РЧ-1) рассматриваемой защиты принимается

$$f_{с,р}=45 \text{ Гц},$$

что определяется минимальной частотой срабатывания реле типа РЧ-1.

18.6. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

Защита предназначена для сигнализации перегрузки синхронного компенсатора. Ток срабатывания рассматриваемой защиты определяется по (10.1), в котором: $I_{ном}$ — номинальный ток синхронного компенсатора при работе его с водородным охлаждением; $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается равным 1,05.

Для сигнализации перегрузок в режиме работы без водородного охлаждения, когда синхронный компенсатор может нести только половину своей номинальной нагрузки, предусмотрено реле, имеющее ток срабатывания, в два раза меньший, и включаемое в работу в указанном режиме.

Время срабатывания защиты принимается

$$t_{с,з}=6\div 7 \text{ с}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ П1

УТОЧНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ОТСТРОЙКИ k ОТ БРОСКА НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ, ВЫПОЛНЕННОЙ С РЕЛЕ СЕРИИ РНТ-560 ИЛИ ДЗТ-11*

1. Применяемые в настоящее время в дифференциальной токовой защите реле серии РНТ-560 и ДЗТ-11 обладают повышенной отстройкой от бросков намагничивающего тока и токов небаланса, содержащих апериодическую слагающую. Поэтому при определении токов срабатывания дифференциальной токовой защиты трансформаторов и автотрансформаторов по условию отстройки от броска намагничивающего тока [см. (2.2)] расчетными являются броски без апериодической слагающей, имеющие отрицательные полуволны. Протекание в реле дифференциальной токовой защиты бросков намагничивающего тока без апериодической слагающей возможно в следующих случаях:

1.1. При определенных сочетаниях условий, характеризующих процессы в первичных цепях трансформаторов тока защиты — остаточных индукциях в стержнях магнитопроводов силовых трансформаторов (автотрансформаторов), фазе напряжения источника питания в момент включения, схеме соединения трансформаторов тока защиты [1].

1.2. При поглощении апериодической слагающей броска намагничивающего тока трансформаторами тока защиты из-за насыщения их магнитопроводов.

2. Ток срабатывания дифференциальной токовой защиты трансформаторов и автотрансформаторов, выполненной с реле серии РНТ-560 или ДЗТ-11, по условию отстройки от броска намагничивающего тока определяется по (2.2).

При грубых расчетах для коэффициента k в выражении (2.2) принимаются наибольшие значения, подтвержденные длительным опытом эксплуатации (см. пп. 2.1.2.2 и 3.1.2): $k=1{,}2\div 1{,}5$ для реле серии ДЗТ-11; $k=1{,}0\div 1{,}3$ для реле серии РНТ-560, имеющего более высокую отстройку от броска намагничивающего тока с отрицательными полуволнами в условиях по п. 1.2 настоящего приложения за счет наличия короткозамкнутых витков, запоминающих апериодическую слагающую.

3. В уточненном расчете ток срабатывания может быть снижен (по сравнению с полученным в грубом расчете) за счет уточнения значения коэффициента k.

Проведенные исследования показали, что уточнение значения коэффициента k целесообразно производить за счет учета действительных значений следующих параметров, определяющих процессы в первичных и вторичных цепях трансформаторов тока:

$X_к^*$ — относительное индуктивное сопротивление контура включения трансформатора (автотрансформатора) на холостой ход, определяемое по отношению к базовому сопротивлению [см. (П1.5)];

Z_2^* — относительное действительное сопротивление вторичной цепи трансформаторов тока защиты, определяемое по отношению к допустимому ее сопротивлению по условию обеспечения 10%-ной полной погрешности при синусоидальном токе, амплитуда которого равна амплитуде броска намагничивающего тока.

Чем больше относительное индуктивное сопротивление $X_к^*$, тем меньше при прочих равных условиях бросок намагничивающего тока, в том числе и без апериодической слагающей (см. пп. 1.1 и 1.2 настоящего приложения). Значение $X_к^*$ зависит от индуктивного сопротивления системы, конструктивных и электрических параметров включаемого трансформатора (автотрансформатора) [см. (П1.5)] и изменяется в широких пределах.

Значение относительного сопротивления Z_2^* определяет действующее значение и другие характеристики вторичного тока трансформаторов тока после поглощения апериодической слагающей броска намагничивающего тока. Наиболее значительно сопротивления Z_2^* отличаются для трансформаторов тока с номинальным вторичным током 5 и 1 А.

Как показали проведенные в Южном отделении ЭСП исследования, различным оказывается и время поглощения апериодической слагающей броска намагничивающего тока и соответственно степень его затухания за это время.

Для трансформаторов тока с номинальным вторичным током 1 А сопротивление Z_2^* значительно

---

* Настоящее приложение составлено на основании материалов южного отделения ЭСП, представленных канд. техн. наук Г. В. Бердовым и ст. научным сотрудником М. М. Серединым.

[1] Дроздов А. Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. М.: Энергия, 1965.

Таблица П1.1

Тип трансформатора (автотрансформатора)	Номинальные напряжения обмоток			Напряжения $u_к$ между обмотками (в зависимости от положения переключателя РПН) для минимального, среднего и максимального значений регулируемого напряжения, %									Значения $X^{(1)}_{*в}$ обмоток	
				ВН—НН			СН—НН			ВН—СН				
	ВН	СН	НН	min	ср	max	min	ср	max	min	ср	max	ВН	СН
ТДТН-10 000/110/35	115	38,5	6,6; 11,0	16,63	17,0	19,50	—	6,0	—	9,99	10,5	12,69	0,198	0,139
ТДТН-16 000/110/35	115	38,5	6,6; 11,0	16,4	17,0	18,5	—	6,0	—	9,5	10,5	11,69	0,216	0,141
ТДТН-16 000/110/35*	115	38,5	6,6; 11,0	9,58	10,5	11,79	—	6,0	—	16,48	17,0	18,58	0,214	0,078
ТДТН-25 000/110/10	115	11,0	6,6	17,47	17,5	19,5	—	6,5	—	9,99	10,5	11,86	0,219	0,141
ТДТН-25 000/110/35	115	38,5	6,6; 11,0	17,47	17,5	19,5	—	6,5	—	9,99	10,5	11,86	0,236	0,159
ТДТН-40 000/110/10	115	11,0	6,6	17,04	17,5	19,29	—	6,5	—	9,52	10,5	11,56	0,245	0,171
ТДТН-40 000/110/35	115	38,5	6,6; 11,0	17,04	17,5	19,29	—	6,5	—	9,52	10,5	11,56	0,245	0,171
ТДТН-40 000/110/10*	115	11,0	6,6	9,5	10,5	11,6	—	6,5	—	17,03	17,5	19,30	0,246	0,115
ТДТН-40 000/110/35*	115	38,5	6,6; 11,0	9,5	10,5	11,6	—	6,5	—	17,03	17,5	19,30	0,246	0,115
ТДТН-63 000/110/10	115	11,0	6,6	17,14	17,5	19,20	—	7,0	—	10,1	10,5	10,9	0,258	0,159
ТДТН-63 000/110/35	115	38,5	6,6; 11,0	17,14	17,5	19,20	—	7,0	—	10,1	10,5	10,9	0,258	0,159
ТДТН-63 000/110/10*	115	11,0	6,6	10,1	10,5	11,9	—	7,0	—	17,2	17,5	19,3	0,241	0,110
ТДТН-63 000/100/35*	115	38,5	6,6; 11,0	10,1	10,5	11,9	—	7,0	—	17,2	17,5	19,3	0,241	0,110
ТДТН-80/000/110/10	115	11,0	6,6	18,25	18,5	20,47	—	7,0	—	10,28	11,0	12,33	0,295	0,151
ТДТН-80 000/110/35	115	38,5	6,6; 11,0	18,25	18,5	20,47	—	7,0	—	10,28	11,0	12,33	0,295	0,151
ТДТН-80 000/110/10*	115	11,0	6,6	10,22	11,0	12,13	—	7,0	—	18,15	18,5	20,27	0,295	0,107
ТДТН-80 000/110/35*	115	38,5	6,6; 11,0	10,22	11,0	12,13	—	7,0	—	18,15	18,5	20,27	0,295	0,107
ТДТН-16 000/150/35	158	38,5	6,6; 11,0	18,27	18,0	17,23	—	6,0	—	11,41	10,5	10,38	0,227	0,144
ТДТН-25 000/150/35	158	38,5	6,6; 11,0	18,50	18,0	17,42	—	6,0	—	11,42	10,5	10,4	0,227	0,144
ТДТН-40 000/150/35	158	38,5	6,6; 11,0	18,57	18,0	17,77	—	6,0	—	11,12	10,5	10,25	0,227	0,144
ТДТН-63 000/150/35	158	38,5	6,6; 11,6	18,3	18,0	17,3	—	6,0	—	10,99	10,5	10,13	0,227	0,144
ТДТН-25 000/220/35	230	22; 38,5	6,6; 11,0	19,5	20,0	20,4	—	6,5	—	12,4	12,5	13,4	0,242	0,147
ТДТН-40 000/220/35	230	22; 38,5	6,6; 11,0	29,3	22,0	19,0	—	9,5	—	16,8	12,5	9,8	0,257	0,169
ТДТН-40 000/220/35**	230	22; 38,5	6,6; 11,0	18,6	12,5	9,9	—	9,5	—	28,2	22	19,2	0,257	0,132
ТДЦТН-63 000/220/35	230	22; 38,5	6,6; 11,0	30,4	24	19,7	—	10,5	—	17,9	12,5	10,5	0,271	0,176
ТДЦТН-63 000/220/35**	230	22; 38,5	6,6; 11,0	17,7	12,5	10,4	—	10,5	—	29,6	24,0	20,0	0,271	0,142
АТДТН-32 000/220/110	230	121	6,6; 11,0; 38,5	—	34,0	—	22,5	21,0	23,0	20,0	11,0	7,0	0,346	0,252
АТДЦТН-63 000/220/110	230	121	6,6; 11,0; 38,5	—	35,0	—	24,5	22,0	25,0	21,0	11,0	7,0	0,353	0,260
АТДЦТН-125 000/220/110	230	121	6,6; 11,0; 13,8; 38,5	—	31,0	—	29,3	19,0	20,1	18,9	11,0	6,8	0,559	0,476
АТДЦТН-200 000/220/110	230	121	6,6; 11,0; 13,8; 15,75; 38,5	—	32,0	—	21,5	20,0	21,2	19,4	11,0	6,7	0,548	0,472
АТДЦТН-250 000/220/110	230	121	11,0; 13,8; 15,75; 38,5	—	32,0	—	23,0	20,0	21,8	20,9	11,0	7,1	0,544	0,485
АТДЦТН-125 000/330/110	330	115	6,6; 11,0; 15,75; 38,5	—	35,0	—	29,6	22,0	22,1	10,3	10,0	10,8	0,462	0,260
АТДЦТН-200 000/330/110	330	115	6,6; 11,0; 15,75; 38,5	—	34,0	—	27,2	22,5	20,3	10,6	10,0	11,0	0,471	0,38
АТДЦТН-125 000/500/110	500	121	6,6; 11,0; 38,5	26,0	24,0	23,0	16,0	13,0	11,0	—	10,5	—	—	—
АТДЦТН-250 000/500/110	500	121	11,0; 38,5	26,0	24,0	23,0	16,0	13,0	11,0	—	10,5	—	—	—
АОДЦТН-167 000/500/220	$500/\sqrt{3}$	$230/\sqrt{3}$	11,0; 13,8; 15,75; 20,0; 38,5	—	35,0	—	25,0	21,5	20,0	12,0	11,0	12,0	—	—
АОДЦТН-267 000/500/220	$500/\sqrt{3}$	$230/\sqrt{3}$	11,0; 13,8; 15,75; 20,0; 38,5	—	23,0	—	13,0	12,5	12,5	9,0	8,5	9,5	0,483	—
АОДЦТН-167 000/500/330	$500/\sqrt{3}$	$330/\sqrt{3}$	11,0; 38,5	—	67,0	—	77,0	61,0	52,0	13,5	9,5	10,0	—	—
АОДЦТН-333 000/750/330	$750/\sqrt{3}$	$330/\sqrt{3}$	15,75	—	28,0	—	27,0	17,0	17,0	12,0	10,0	11,0	0,412	—
АОДЦТН-417 000/750/500	$750/\sqrt{3}$	$500/\sqrt{3}$	15,75	92,0	81,0	75,0	70	68,0	69,0	13,0	11,5	10,8	1,307	—

Примечания. 1. Таблица составлена по данным ГОСТ и ТУ, действительным на 1 июня 1978 г., и материалам Южного отделения ЭСП.

2. Звездочкой (*) обозначены трансформаторы, выполненные по варианту п. 4 примечания к табл. 5 ГОСТ 12965—74.

3. Двумя звездочками (**) обозначены трансформаторы, выполненные по варианту п. 2 примечания к табл. 7 ГОСТ 15957—70.

4. Трансформаторы (автотрансформаторы) с высшим напряжением 110 кВ выполнены по ГОСТ 12965—74, 150 кВ—по ГОСТ 17546—72; 220 кВ—по ГОСТ 15957—70; 330 кВ—по ГОСТ 17545—72; 500 кВ—по ГОСТ 17544—72; 750 кВ—по ТУ (ТУ 16-517.755-73 для автотрансформатора со средним напряжением 330 кВ ТУ 16-517.883-75 для автотрансформатора со средним напряжением 500 кВ).

меньше, а время поглощения апериодической слагающей и затухания броска больше, чем для трансформаторов тока с номинальным вторичным током 5 А. Поэтому при прочих равных условиях для первых могут приниматься меньшие значения коэффициента k. При этом должны учитываться номинальные вторичные токи трансформаторов тока защиты, установленной со стороны включаемой обмотки, а также со стороны обмоток, соединенных в треугольник и обтекаемых броском намагничивающего тока после довключения всех фаз, если трансформаторы тока включены на фазные токи этих обмоток.

4. Уточнение значения коэффициента k производится по выражениям:

4.1. При трансформаторах тока с номинальным вторичным током 5 А:

для реле серии РНТ-560

$$k=1{,}7-2{,}8X_{*к}; \qquad (П1.1)$$

для реле серии ДЗТ-11

$$k=2{,}1-3{,}7X_{*к}. \qquad (П1.2)$$

4.2. При трансформаторах тока с номинальным вторичным током 1 А:

для реле серии РНТ-560

$$k=1{,}3-1{,}25X_{*к}; \qquad (П1.3)$$

для реле серии ДЗТ-11

$$k=1{,}45-1{,}6X_{*к}. \qquad (П1.4)$$

Выражения (П1.1) и (П1.2) справедливы при значениях коэффициента k, находящихся в пределах: $k=1{,}3\div0{,}9$ для реле серии РНТ-560, $k=1{,}5\div1{,}0$ для реле серии ДЗТ-11; выражения (П1.3) и (П1.4) — при значениях коэффициента k, находящихся в пределах:

Таблица П1.2

Тип трансформатора	Номинальные напряжения обмоток, кВ		Напряжения $u_к$ между обмотками (в зависимости от положения переключателя РПН) для минимального, среднего и максимального значений регулируемого напряжения, %			Значения $X_{*в}^{(1)}$ обмоток высшего напряжения
	ВН	НН	min	ср	max	
ТДН-10000/110	115	6,6; 11,0	8,70	10,5	12,36	0,176
ТДН-16000/110	115	6,6; 11,0	9,80	10,5	11,71	0,182
ТРДН-25000/110	115	6,3—6,3; 10,5—10,5; 6,3—10,5	9,84	10,5	11,72	0,171
ТРДН-32000/110	115	6,3—6,3; 10,5—10,5; 6,3—10,5	9,77	10,5	11,58	0,171
ТРДН-40000/110	115	6,3—6,3; 10,5—10,5; 6,3—10,5	9,59	10,5	11,46	0,171
ТРДЦН-63000/110	115	6,3—6,3; 10,5—10,5; 6,3—10,5	10,84	10,5	11,90	0,171
ТРДЦН-80000/110	115	6,3—6,3; 10,5—10,5; 6,3—10,5	9,76	10,5	11,60	0,236
ТДЦН-80 000/110	115	38,5	9,76	10,5	11,60	0,236
ТРДЦН-125000/110	115	10,5—10,5	10,5	10,5	11,9	0,236
ТДН-16000/150	158	6,6; 11,0	11,5	11,0	11,8	0,175
ТРДН-32000/150	158	6,3—6,3; 10,5—10,5; 10,5—6,3	10,86	10,5	10,14	0,171
ТРДН-63000/150	158	6,3—6,3; 10,5—10.5; 10,5—6,3	10,66	10,5	10,0	0,171
ТРДН-32000/220	230	6,6—6,6; 11—11; 6,6—11	11,6	12,0	12,7	0,182
ТРДН-32000/220	230	38,5	11,6	12,0	12,7	0,182
ТРДЦН-63000/220	230	6,6—6,6; 11—11; 6,6 — 11	11,6	12,0	12,7	0,182
ТРДЦН-63000/220	230	38,5	11,6	12,0	12,7	0,182
ТРДЦН-100000/220	230	11—11	11,6	12,0	12,7	0,247
ТРДЦН-100000/220	230	38,5	11,6	12,0	12,7	0,247
ТРДЦН-160000/220	230	11—11	11,3	12,0	13,2	0,247
ТРДЦН-160000/220	230	38,5	11,3	12,0	13,2	0,247
ТРДН-63000/330	330	6,3—6,3; 6,3—10,5; 10,5—10,5	14,3	11,0	8,8	0,175
ТДН-63000/330	330	38,5	14,3	11,0	8,8	0,175

Примечания: 1. Таблица составлена по данным ГОСТ и ТУ, действительным на 1 июня 1978 г., и материалам Южного отделения ЭСП.

2. Трансформаторы с высшим напряжением 110 кВ выполнены по ГОСТ 12965—74, 150 кВ—по ГОСТ 17546—72, 220 кВ—по ГОСТ 15957—70, 330 кВ—по ГОСТ 17545—72.

k=1,3÷0,8 для реле серии РНТ-560, k=1,5÷0,8 для реле серии ДЗТ-11.

Если в конкретном расчете при трансформаторах тока с номинальным вторичным током 5 А окажется, что $X_{*к}^{} \geqslant 0{,}3$, то значение коэффициента k должно приниматься равным предельным минимальным значениям: 1,0 для реле серии ДЗТ-11, 0,9 для реле серии РНТ-560. Соответственно при трансформаторах тока с номинальным вторичным током 1 А при $X_{*к}^{} \geqslant 0{,}4$ значение коэффициента k для реле серий РНТ-560 и ДЗТ-11 должно приниматься равным 0,8.

5. Относительное индуктивное сопротивление контура включения $X_{*к}^{}$ определяется по выражению

$$X_{*к}^{} = X_{*с}^{} + k_1 X_{*в}^{(1)}, \qquad (П1.5)$$

где $X_{*с}^{}$ — относительное индуктивное сопротивление прямой последовательности системы (сопротивление до вводов включаемой обмотки), определяемое по отношению к базовому сопротивлению, которое соответствует номинальным параметрам трансформатора (автотрансформатора)

$$X_б = \frac{U^2_{ном}}{S_{ном}}, \qquad (П1.6)$$

$S_{ном}$ — номинальная мощность трансформатора (автотрансформатора; $U_{ном}$ — номинальное междуфазное напряжение включаемой обмотки; $X_{*в}^{(1)}$ — относительное индуктивное сопротивление включаемой обмотки трансформатора (автотрансформатора) при включении одной фазы и полном насыщении стержней и ярм магнитопровода трансформатора (автотрансформатора), определяемое по отношению к базовому сопротивлению $X_б$; k_1 — коэффициент, учитывающий увеличение индуктивного сопротивления включаемой обмотки трансформатора (автотрансформатора) за счет неполного насыщения ярм его магнитопровода.

Значения относительных индуктивных сопротивлений $X_{*в}^{(1)}$ для ряда выпускающихся отечественными заводами трансформаторов (автотрансформаторов), полученные расчетным путем, приведены в табл. П1.1 (для трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов) и П1.2 (для двухобмоточных трансформаторов). Для трансформаторов и автотрансформаторов других типов (последние с высшим напряжением до 330 кВ включительно) значение $X_{*в}^{(1)}$ при насыщенных магнитопроводах может быть подсчитано по упрощенным выражениям, приведенным в табл. П1.3 через напряжения КЗ $u_к$%. При этом значения $u_к$% могут приниматься соответствующими среднему значению регулируемого напряжения.

Если понижающий трансформатор (автотрансформатор) может включаться со стороны высшего и среднего напряжений, то при расчете принимается меньшее из двух значений $X_{*в}^{(1)}$, соответствующих обмоткам указанных напряжений.

Значения $X_{*в}^{(1)}$ могут с достаточной точностью определяться с использованием табл. П1.1—П1.3 также для находящихся в эксплуатации или новых типов трансформаторов и автотрансформаторов, если их электрические параметры — мощность, номинальные напряжения обмоток, напряжения КЗ обмоток — близки к значениям этих же параметров трансформаторов (автотрансформаторов) конкретных типов, приведенных в табл. П1.1—П1.3.

При определении значения $X_{*в}^{(1)}$ по табл. П1.1—П1.3 значение коэффициента k_1 в (П1.5) может приниматься равным 1,1—1,15.

6. Для автотрансформаторов с высшим напряжением 500 кВ, для которых отсутствуют значения $X_{*в}^{(1)}$

Таблица П1.3

Мощность трансформатора (автотрансформатора)	Расчетное выражение для $X_{*в}^{(1)}$	Примечание
Включение трансформаторов со стороны ВН		
6,3 — 63 МВ·А (включительно)	$0{,}094 + 0{,}74\frac{u_к\%}{100}$	$u_к\%$ — напряжение короткого замыкания между включаемой обмоткой и внутренней обмоткой, нанесенной на стержень[1]
75 — 125 МВ·А (включительно)	$0{,}158 + 0{,}74\frac{u_к\%}{100}$	
Трансформаторы с конструкцией, аналогичной трансформатору типа ТДЦГ-125000/220	$0{,}54 + 0{,}77\frac{u_к\%}{100}$	
Включение автотрансформаторов со стороны ВН[2]		
120 — 180 МВ·А (включительно)	$0{,}195 + 0{,}76\frac{u_к\%}{100}$	$u_к\%$ — напряжение короткого замыкания между включаемой обмоткой и внутренней обмоткой, нанесенной непосредственно на стержень, отнесенное к проходной мощности автотрансформатора
120 — 250 МВ·А (включительно)	$0{,}272 + 0{,}78\frac{u_к\%}{100}$	
180 МВ·А (обмотка СН внутренняя)	$0{,}35 + \frac{u_к\%}{100}$	
Включение трансформаторов со стороны СН		
Для всех мощностей трансформаторов при $u_{к\ ВН-СН} > u_{к\ ВН-НН}$ (обмотка СН внутренняя)	$0{,}037 + \frac{u_к\%}{100}$	$u_к\%$ — напряжение короткого замыкания между обмотками СН и НН
Для всех мощностей трансформаторов при $u_{к\ ВН-СН} < u_{к\ ВН-НН}$ (обмотка СН расположена между обмотками ВН и НН)	$0{,}1 + 0{,}724\frac{u_к\%}{100}$	

[1] Признаком внутренней обмотки является наибольшее значение $u_к$ % между этой обмоткой и обмоткой высшего напряжения.

[2] Расчетные выражения справедливы для автотрансформаторов с высшим напряжением до 330 кВ включительно.

Примечание. Таблица составлена Южным отделением ЭСП.

в табл. П1.1 и упрощенные расчетные выражения для определения $X_{*в}^{(1)}$ в табл. П1.3, можно использовать методику расчета индуктивности обмоток при не полностью насыщенных магнитных ярмах[1]. Исходя из значений этой индуктивности $L_{нас}$, определяется

$$k_1 X_{*в}^{(1)} = \frac{\omega L_{нас}}{X_б}, \qquad (П1.7)$$

где ω — угловая скорость; $X_б$ — базовое сопротивление по (П1.6).

Кроме того, можно определить относительную индуктивность $\left(\frac{L_{нас.\ оп}}{L_б}\right)^*$ или индуктивное сопротивление $(X_{в.\ оп}^{(1)})^{**}$ обмоток включаемого под напряжение трансформатора или автотрансформатора с учетом неполного насыщения его магнитопровода, используя опытные данные.

Далее расчет производится по (П1.5) с учетом

$$\frac{L_{нас.\ оп}}{L_б} = k_1 X_{*в}^{(1)} \text{ и } \frac{X_{в.\ оп}}{X_б} = k_1 X_{*в}^{(1)}. \qquad (П1.8)$$

7. Для усиления отстройки дифференциальной защиты от значительных бросков намагничивающего тока без апериодической слагающей, которые могут протекать в реле в случае неодновременного включения фаз группы однофазных трансформаторов (автотрансформаторов) при соединении трансформаторов тока со стороны включаемой обмотки в треугольник, необходимо вторичные обмотки реле соединить также в треугольник, если принятое в результате уточняющего расчета значение k меньше его предельных значений (соответственно 1,3 для реле серии РНТ-560 и 1,5 для реле серии ДЗТ-11). В этом случае реле, в котором отсутствует апериодическая слагающая, будет загрубляться за счет шунтирования его исполнительного органа вторичными обмотками реле других фаз, по ра-

[1] **Засыпкин А. С.** Индуктивности обмоток насыщенных автотрансформаторов 110—500 кВ. — Изв. вузов. Электромеханика, 1976, № 11.

* **Зихерман М. Х.** Характеристики намагничивания мощных трансформаторов 500—750 кВ. — Электричество, 1972, № 3.

** **Засыпкин А. С., Бердов Г. В., Середин М. М.** Определение параметров силового трансформатора с насыщенным магнитопроводом. — Электричество, 1975, № 12.

бочим обмоткам которых протекают апериодические слагающие, а также за счет замыкания в контуре вторичных обмоток реле высших гармоник [1]. Однако такие схемы включения трансформаторов тока на указанных трансформаторах (автотрансформаторах) встречаются весьма редко.

8. Пример уточненного расчета значения коэффициента k для отстройки дифференциальной защиты от броска намагничивающего тока по (2.2).

В примере рассматривается дифференциальная защита автотрансформатора АТДЦТН-125000/220, выполненная с реле типа ДЗТ-11. Автотрансформатор включается под напряжение со стороны обмотки 220 кВ. Номинальный вторичный ток трансформаторов тока защиты, установленных на стороне 220 кВ, составляет 5 А, они соединены в треугольник. Сопротивление системы 220 кВ в схеме прямой последовательности $X_с = 10$ Ом (приведено к напряжению 220 кВ).

Расчет производится в следующем порядке.

8.1. Определяется относительное индуктивное сопротивление включаемой обмотки автотрансформатора $\underset{*}{X}_в^{(1)}$.

Из табл. П1.1 находим $\underset{*}{X}_в^{(1)}=0{,}559$.

8.2. Определяется базовое сопротивление, соответствующее номинальным параметрам автотрансформатора, по (П1.6)

$$X_б = \frac{220^2}{125} = 387 \text{ Ом}.$$

8.3. Определяется относительное индуктивное сопротивление системы в схеме прямой последовательности

$$\underset{*}{X}_с = \frac{10}{387} = 0{,}026.$$

8.4. Определяется значение относительного индуктивного сопротивления контура включения по (П1.5)

$$\underset{*}{X}_в^{(1)} = 0{,}026 + 1{,}15 \cdot 0{,}559 = 0{,}668.$$

8.5. Определяется уточненное значение коэффициента k для отстройки защиты от броска намагничивающего тока по (2.2).

Поскольку полученное значение $\underset{*}{X}_в^{(1)} > 0{,}3$, то в соответствии с рекомендациями принимается $k=1{,}0$.

[1] **Дроздов А. Д.** Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. — М.: Энергия, 1965.

ПРИЛОЖЕНИЕ П2

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ОТСУТСТВИИ ТОРМОЖЕНИЯ [1]

1. Ниже рассматривается определение точного значения коэффициента чувствительности по первичным токам повреждения для дифференциальной защиты трансформатора, выполненной с реле типа РНТ-565. Однако полученные выводы могут быть распространены также на дифференциальную защиту, выполненную с реле с тормозными обмотками в случаях таких КЗ в защищаемой зоне, при которых торможение отсутствует.

2. Коэффициент чувствительности защиты $k_ч^{(m)}$ при металлических КЗ расчетного вида (m) в защищаемой зоне определяется как отношение рабочей МДС реле, равной сумме МДС обмоток НТТ в условиях повреждения, к МДС срабатывания реле:

$$k_ч^{(m)} = \frac{\Sigma F_{раб}^{(m)}}{F_{с,р}} = \frac{\sum_{n=1}^{p} I_{pn}^{(m)} w_n}{F_{с,р}} = k_{ч1}^{(m)} + \ldots + k_{чp}^{(m)}, \qquad \text{(П2.1)}$$

где $F_{раб}^{(m)}$ — рабочая МДС НТТ реле при рассматриваемом металлическом КЗ расчетного вида (m); $I_{pn}^{(m)}$ — ток, подводимый со стороны n к обмотке НТТ реле с числом витков w_n, с учетом его знака при рассматриваемом металлическом КЗ расчетного вида (m); w_n — число витков обмотки НТТ реле, используемых на n-й стороне; $F_{с,р}$ — МДС срабатывания реле; для реле типа РНТ-565 и ДЗТ-11 (при отсутствии торможения) составляет 100 А; $k_{ч1}^{(m)} \ldots k_{чp}^{(m)}$ — слагающие коэффициента чувствительности защиты, определяемые долей тока КЗ и током срабатывания защиты на соответствующей стороне.

Выражение (П2.1) используется для определения точного коэффициента чувствительности n-обмоточного трансформатора с n-сторонним питанием при всех видах КЗ.

2.3. Ниже рассматривается чувствительность дифференциальной защиты (в трехрелейном исполнении) трехобмоточного трансформатора с трехсторонним питанием со схемой электрических соединений У/У/Д.

Используя выражение (П2.1), можно получить выражения для $k_ч$ защиты при различных видах КЗ.

2.3.1. Короткое замыкание между тремя фазами на стороне высшего напряжения трансформатора.

Токораспределение для этого случая приведено на рис. П2.1, на котором приняты следующие обозначения:

система I — система высшего напряжения;

система II — система среднего напряжения;

система III — система низшего напряжения;

$I_к^{(3)}$ — периодическая слагающая переходного (при $t=0$) первичного тока в месте КЗ между тремя фазами в точке $К$; $k_{ток\,I}$, $k_{ток\,II}$, $k_{ток\,III}$ — коэффициенты токораспределения соответственно для сторон систем *I*, *II* и *III* в схеме прямой последовательности при КЗ в точке $К$.

На основании (П2.1) и токораспределения в защите, приведенного на рис. П2.1, коэффициент чувствительности защиты при КЗ между тремя фазами на стороне высшего напряжения равен

$$k_ч^{(3)} = \frac{I_{pI} w_I + I_{pII} w_{II} + I_{pIII} w_{III}}{F_{с,р}} =$$

$$= \frac{1}{100}\left(\frac{\sqrt{3}\, k_{ток\,I} I_к^{(3)}}{K_{II}} w_I + \frac{\sqrt{3}\, k_{ток\,III} I_к^{(3)} n_{т,\,В\text{-}С}}{K_{III}} \times \right.$$

[1] Настоящее приложение составлено с использованием рацпредложения инж. Я. М. Каневского (Киевское отделение Энергопрома) и его статьи: «Определение чувствительности дифференциальной защиты трансформатора». Электричество, 1976, № 9, с. 59—61.

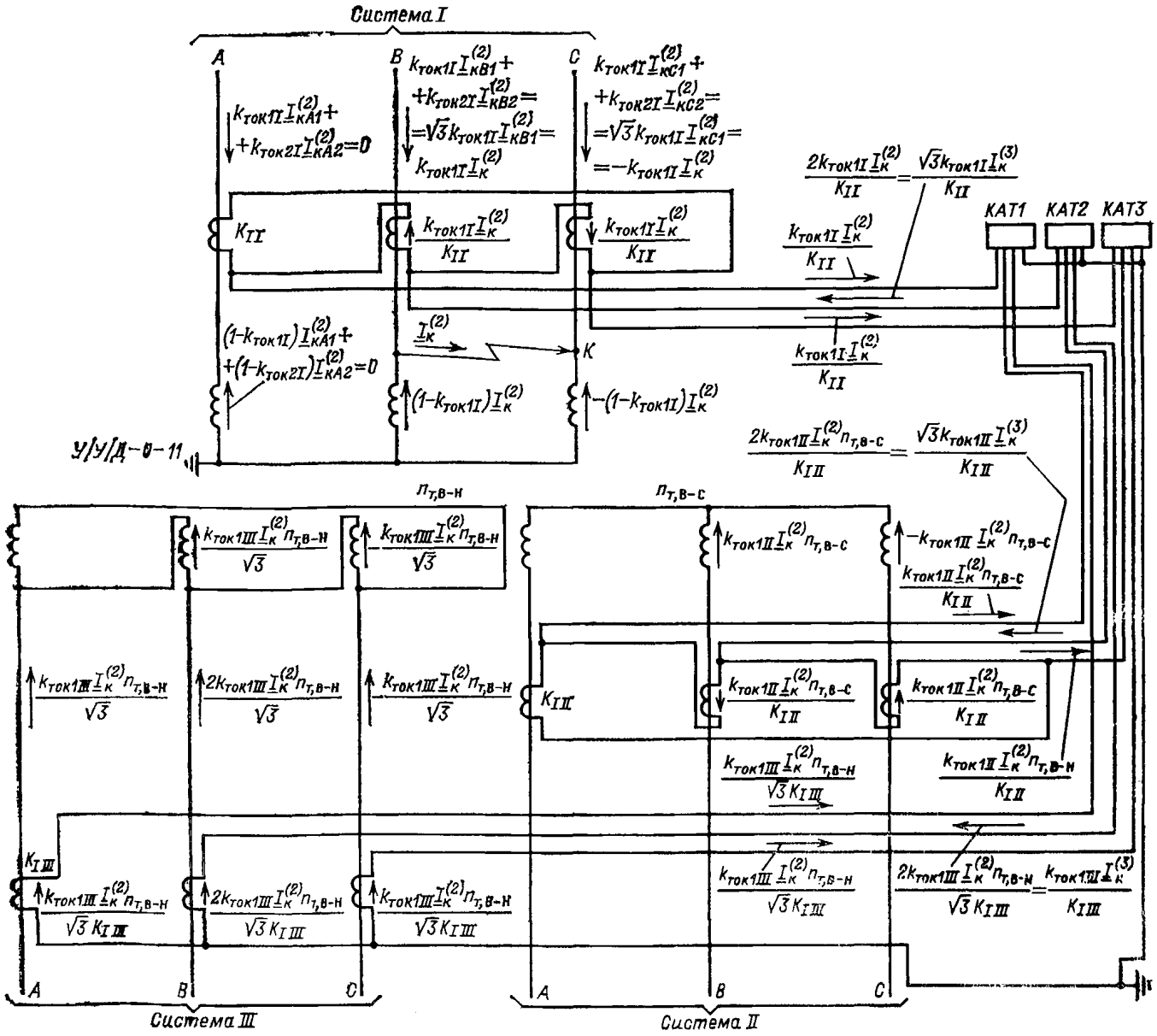


Рис. П2.1. Токораспределение в цепях дифференциальной защиты при КЗ между тремя фазами на стороне ВН трехобмоточного трансформатора с трехсторонним питанием

$$\times w_{II} + \frac{k_{ток1III} I_к^{(3)} n_{т,\,в\text{-}н}}{K_{III}} w_{III}\Bigg) =$$

$$= 0{,}01 I_к^{(3)} \left(\frac{\sqrt{3}\, k_{ток1I}}{K_{I}} w_{I} + \frac{\sqrt{3}\, k_{ток1III} n_{т,\,в\text{-}с}}{K_{III}} w_{II} + \right.$$

$$\left. + \frac{k_{ток1III} n_{т,\,в\text{-}н}}{K_{III}} w_{III} \right), \qquad (П2.2)$$

где w_I, w_{II}, w_{III} — принятые (целые) числа витков обмоток НТТ реле соответственно на сторонах систем *I*, *II* и *III* защищаемого трансформатора; $K_{I\,I}$, $K_{I\,II}$, $K_{I\,III}$ — коэффициенты трансформации трансформаторов тока на сторонах, где используются соответственно числа витков w_I, w_{II} и w_{III}; $n_{т,в-с}$, $n_{т,в-н}$ — коэффициенты трансформации защищаемого трансформатора.

2.3.2. Выражение (П2.2) может быть использовано для определения коэффициента чувствительности защиты при КЗ между двумя фазами, если защита имеет трехрелейное исполнение. Токораспределение для этого случая приведено на рис. П2.2.

Выражение (П2.2) может быть использовано также для определения коэффициента чувствительности защиты при КЗ между тремя или двумя фазами на стороне среднего напряжения и при КЗ между тремя фазами на стороне низшего напряжения, если под $I_к^{(3)}$ понимать ток, приведенный к ступени высшего напряжения.

2.3.3. Короткое замыкание между двумя фазами на стороне низшего напряжения (треугольника) защищаемого трансформатора.

Токораспределение для этого случая приведено на рис. П2.3 в предположении, что сопротивления всех элементов схем замещения прямой и обратной последовательностей одинаковы.

На основании (П2.1) и токораспределения в защите коэффициент чувствительности защиты при КЗ

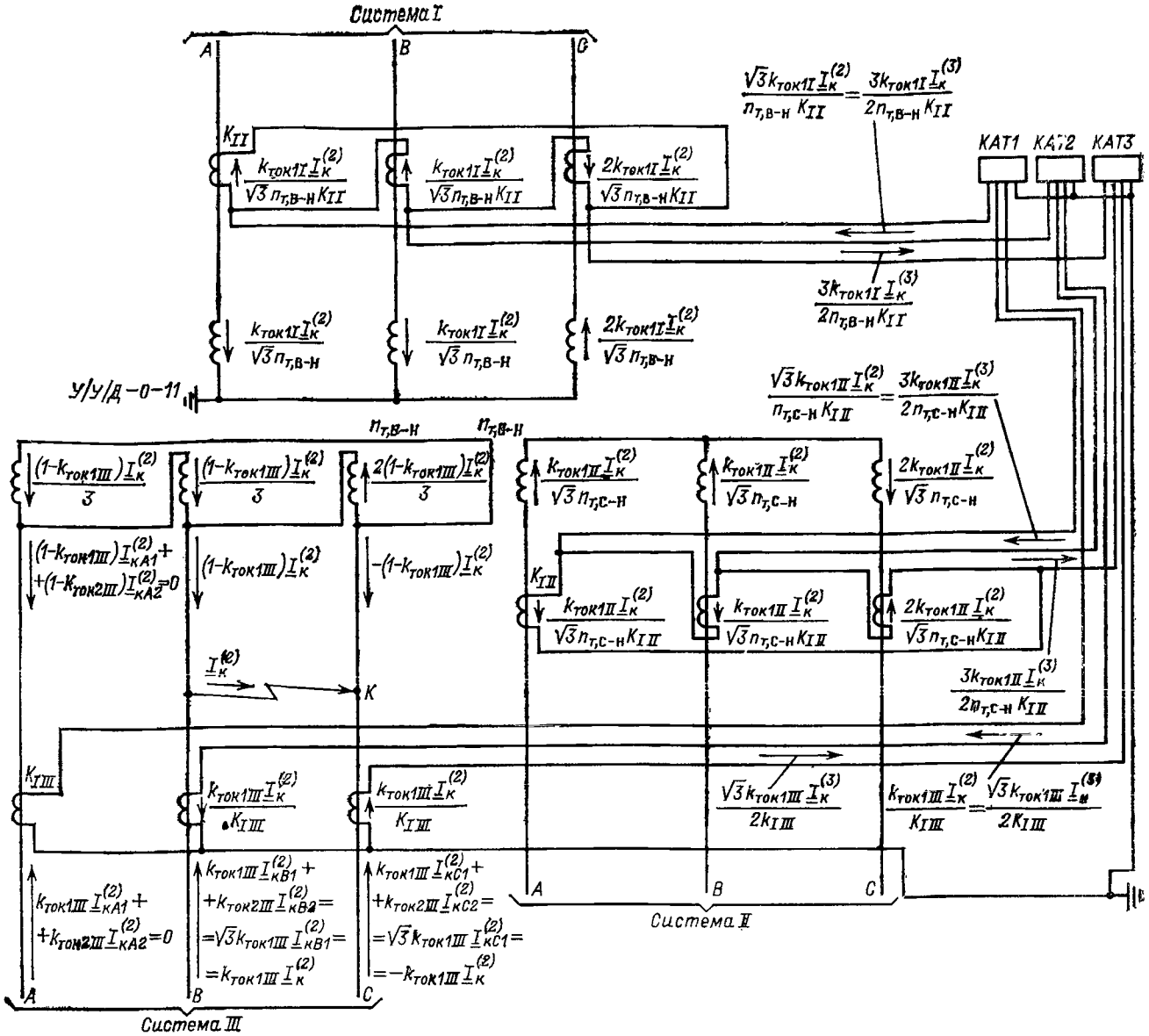


Рис. П2.2. Токораспределение в цепях дифференциальной защиты при КЗ между двумя фазами на стороне ВН трехобмоточного трансформатора с трехсторонним питанием

между двумя фазами на стороне низшего напряжения равен

$$k_{\text{ч}}^{(2)}=\frac{1}{100}\left(\frac{3k_{\text{ток I}}I_{\text{к}}^{(3)}}{2n_{\text{т, в-н}}K_{II}}w_{\text{I}}+\frac{3k_{\text{ток III}}I_{\text{к}}^{(3)}}{2n_{\text{т, с-н}}K_{III}}w_{\text{II}}+\right.$$
$$\left.+\frac{\sqrt{3}\,k_{\text{ток III}}I_{\text{к}}^{(3)}}{2K_{III}}w_{\text{III}}\right)=$$
$$=0{,}01\cdot 0{,}87I_{\text{к}}^{(3)}\left(\frac{\sqrt{3}\,k_{\text{ток I}}}{n_{\text{т, в-н}}K_{II}}w_{\text{I}}+\right.$$
$$\left.+\frac{\sqrt{3}\,k_{\text{ток III}}}{n_{\text{т, с-н}}K_{III}}w_{\text{II}}+\frac{k_{\text{ток III}}}{K_{III}}w_{\text{III}}\right), \quad (\text{П2.3})$$

где обозначения те же, что в выражении (П2.2).

2.3.4. Замыкание на землю одной фазы на стороне высшего напряжения трансформатора. Токораспределение для этого случая приведено на рис. П2.4.

На рис. П2.4 приняты следующие обозначения:

$k_{\text{ток 2 I}}$ — коэффициент токораспределения со стороны системы *I* в схеме обратной последовательности; в соответствии с принятым в п. 2.3.3 допущением $k_{\text{ток 2 I}}=k_{\text{ток 1 I}}$;

$k_{\text{ток 0 I}}$ — коэффициент токораспределения со стороны системы *I* в схеме нулевой последовательности;

$I_{\text{к}}^{(1)}$ — периодическая слагающая переходного (при $t=0$) полного первичного тока в месте замыкания на землю одной фазы — в точке *K*; $I_{\text{к1}}^{(1)}$, $I_{\text{к2}}^{(1)}$, $I_{\text{к0}}^{(1)}$ — слагающие тока $I_{\text{к}}^{(1)}$ соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей; $I_{\text{кA1}}^{(1)}$, $I_{\text{кB1}}^{(1)}$, $I_{\text{кC1}}^{(1)}$; $I_{\text{кA2}}^{(1)}$, $I_{\text{кB2}}^{(1)}$, $I_{\text{кC2}}^{(1)}$ симметричные составляющие соответственно

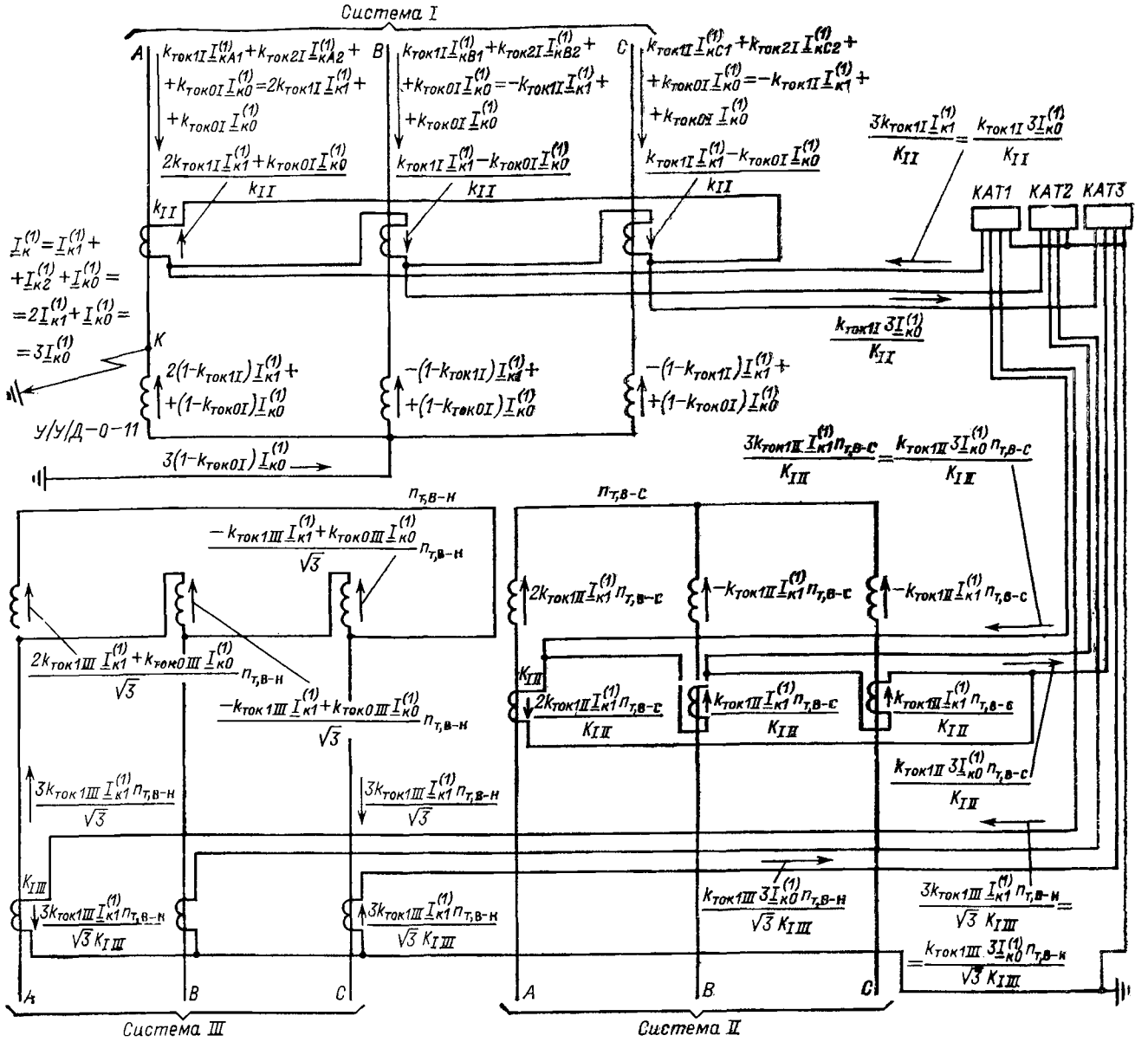


Рис. П2.3. **Токораспределение в цепях дифференциальной защиты при КЗ между двумя фазами на стороне НН трехобмоточного трансформатора с трехсторонним питанием**

токов $I_{к1}^{(1)}$ и $I_{к2}^{(1)}$.

На основании (П2.1) и токораспределения в защите, приведенного на рис. П2.4, коэффициент чувствительности защиты при замыкании на землю одной фазы равен

$$k_{ч}^{(1)} = \frac{1}{100}\left(\frac{k_{ток II}\cdot 3I_{к0}^{(1)}}{K_{II}}w_I + \frac{k_{ток III}\cdot 3I_{к0}^{(1)} n_{т,\,в\text{-}с}}{K_{III}}w_{II} + \frac{k_{ток III}\cdot 3I_{к0}^{(1)} n_{т,\,в\text{-}н}}{\sqrt{3}\,K_{III}}w_{III}\right) =$$

$$= 0{,}01\cdot 3I_{к0}^{(1)}\left(\frac{k_{ток II}}{K_{II}}w_I + \frac{k_{ток III}\, n_{т,\,в\text{-}с}}{K_{III}}w_{II} + \frac{k_{ток III}\, n_{т,\,в\text{-}н}}{\sqrt{3}\,K_{III}}w_{III}\right), \qquad (П2.4)$$

где обозначения те же, что в (П2.2) и на рис. П2.4.

Из (П2.4) видно, что коэффициент чувствительности дифференциальной защиты трансформатора при замыкании на землю одной фазы на стороне высшего напряжения может быть получен через токи в месте КЗ только нулевой последовательности и коэффициенты токораспределения в схеме прямой последовательности, что представляет известные удобства при расчете.

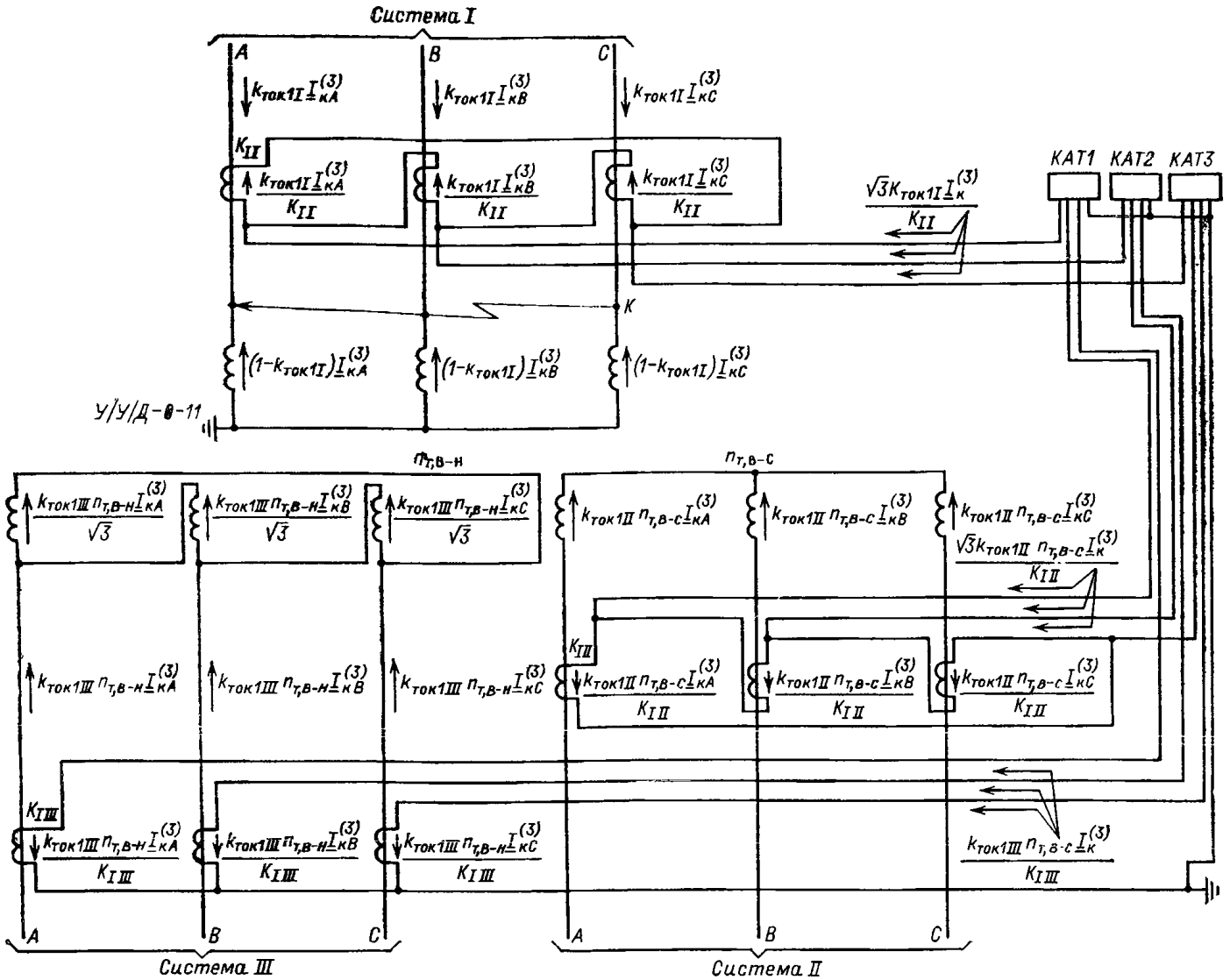


Рис. П2.4. Токораспределение в цепях дифференциальной защиты при замыкании на землю одной фазы на стороне ВН трехобмоточного трансформатора с трехсторонним питанием

ПРИЛОЖЕНИЕ П3

ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ, ИМЕЮЩЕЙ ЗОНЫ РАЗНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ [1]

1. Токи, проходящие через реле дифференциальной защиты при КЗ в защищаемой зоне, в значительной мере зависят от места КЗ. Например, при КЗ на выводах высшего напряжения понижающего трансформатора токи КЗ при прочих равных условиях больше, чем при КЗ на выводах низшего напряжения. С другой стороны, при замене одной общей защиты элемента несколькими, охватывающими различные зоны, эти последние могут быть выполнены с разными токами срабатывания. При этом, как правило, более грубыми получаются защиты, охватывающие зоны с бо́льшими токами внутренних КЗ, что облегчает обеспечение условий чувствительности.

В связи с этим в практике проектирования релейной защиты часто принимаются решения, нашедшие отражение и в типовых схемах, когда вместо одной дифференциальной защиты устанавливается несколько с разными защищаемыми зонами и токами срабатывания, но действующих на одни и те же выключатели, например отдельные дифференциальные защиты соединений высшего, среднего или низшего напряжения.

2. Вместо нескольких отдельных дифференциальных защит может быть использована одна с зонами разной чувствительности. Для выполнения такой защиты требуется дополнительно использовать трансформаторы тока, установленные на границе зон разной чувствительности, например трансформаторы тока, встроенные во втулки трансформаторов и автотрансформаторов, трансформаторы тока, специально устанавливаемые между выводами низшего напряжения трансфор-

[1] Настоящее приложение составлено с использованием рацпредложения инж. Н. Г. Шверина (Горьковское отделение ЭСП) и его статьи: Трех- и четырехзонная дифференциальная защита автотрансформаторов. — Электрические станции, 1969, № 5, с. 62—65.

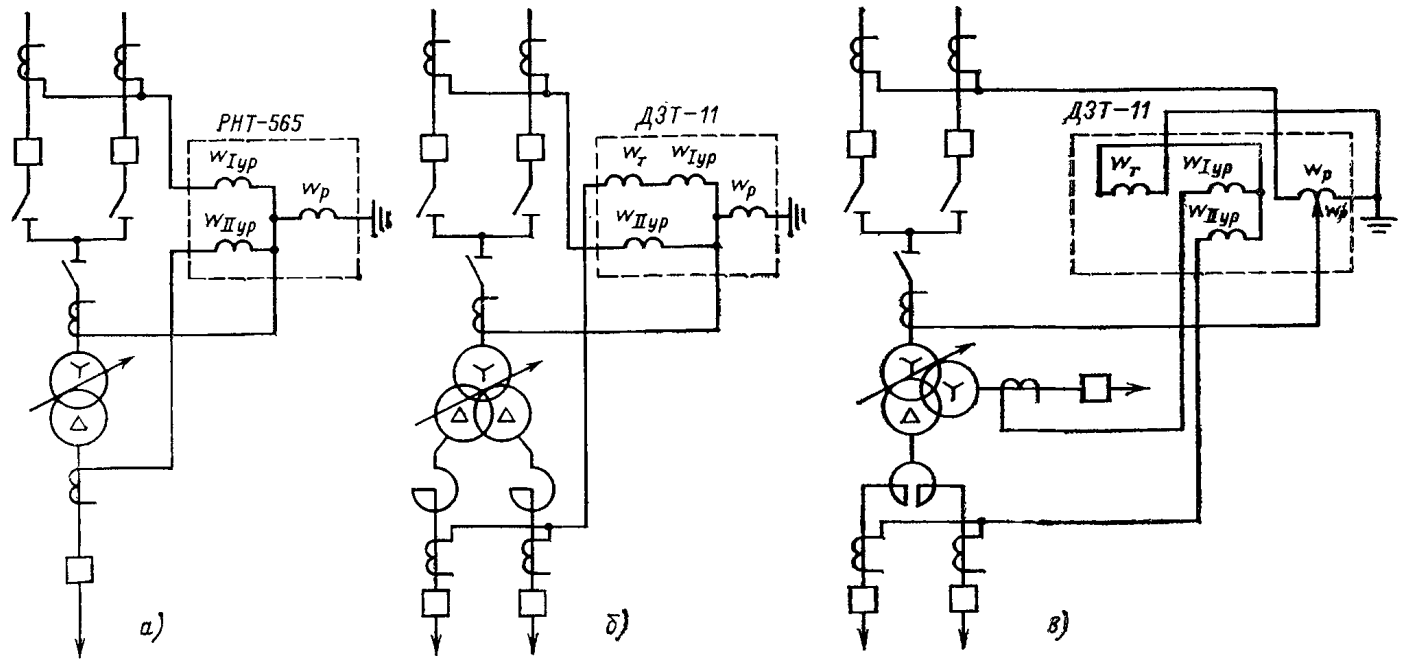


Рис. П3.1. Принципиальные схемы дифференциальной токовой защиты трансформатора с зоной пониженной чувствительности на стороне ВН:

а — для двухобмоточного трансформатора с реле типа РНТ-565; *б* — то же, с реле типа ДЗТ-11; *в* — для трехобмоточного трансформатора

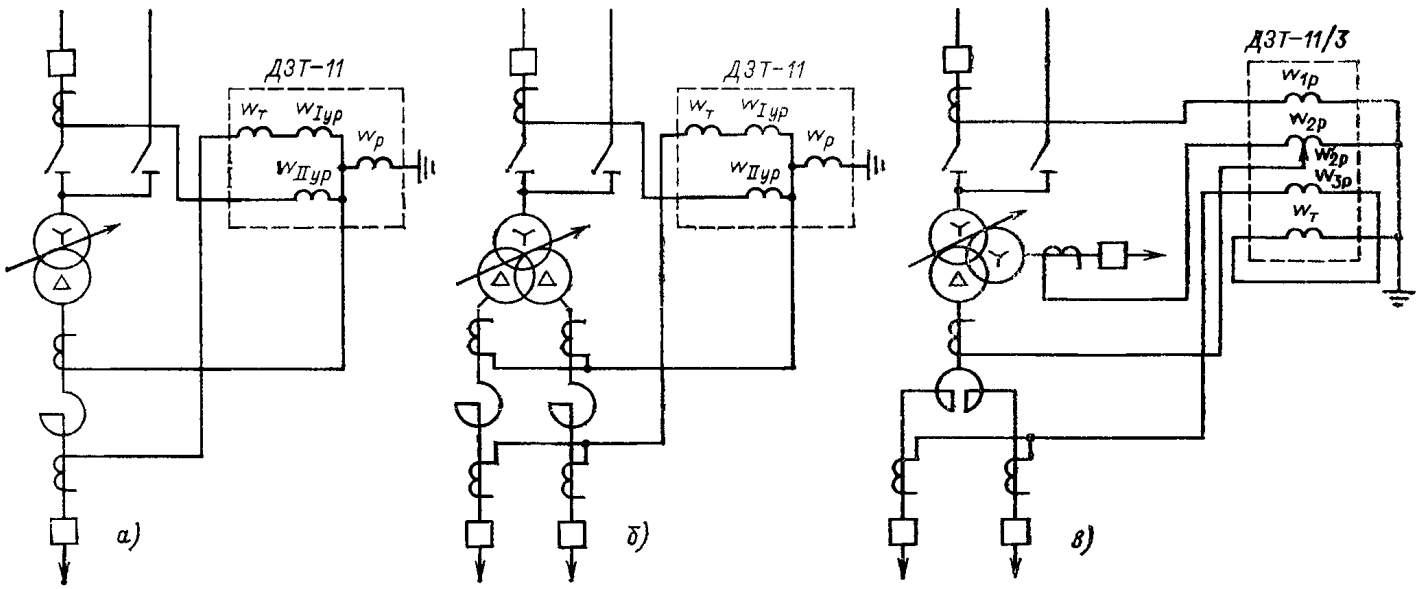


Рис. П3.2. Принципиальные схемы дифференциальной токовой защиты трансформатора с зоной повышенной чувствительности на стороне НН:

а — для двухобмоточного нерасщепленного трансформатора; *б* — то же расщепленного; *в* — для трехобмоточного трансформатора

матора и токоограничивающим реактором. Такое выполнение дает возможность упростить дифференциальную защиту при сохранении, как правило, той же чувствительности. Кроме того, по сравнению с несколькими дифференциальными защитами, имеющими различные защищаемые зоны, одна дифференциальная защита с зонами разной чувствительности является более надежной, так как при той же надежности срабатывания повышается надежность несрабатывания.

Следует, однако, отметить, что применение одной защиты с зонами разной чувствительности вместо нескольких отдельных защит возможно только в тех случаях, когда не требуется обеспечивать избирательность действия (т. е. когда не требуется различать КЗ на ошиновке и в трансформаторе или автотрансформаторе), например, для пуска устройства пожаротушения или осуществления АПВ при КЗ на ошиновке и не требуется оставлять в работе защиту одних зон при отключении других, например оставлять в действии ошиновку высшего напряжения и ее защиту при отключении защищаемого трансформатора или автотрансформатора.

Принципиальные схемы различных вариантов дифференциальной защиты с зонами разной чувствительности для двухобмоточного и трехобмоточного трансформаторов приведены на рис. П3.1 и П3.2.

3. На рис. П3.1 показано выполнение дифференциальной защиты с зоной пониженной чувствительности на стороне высшего напряжения для двух- и трехобмоточных трансформаторов, присоединенных к стороне высшего напряжения через два выключателя.

Рассматриваемая защита имеет две зоны разной чувствительности:

зону пониженной чувствительности, охватывающую соединения на стороне высшего напряжения и ограниченную выносными (или встроенными во втулки выключателей) трансформаторами тока на стороне ВН и трансформаторами тока, встроенными во втулки ВН защищаемого трансформатора;

основную зону, охватывающую трансформатор и ограниченную трансформаторами тока, встроенными во втулки ВН защищаемого трансформатора, и трансформаторами тока, установленными на стороне НН для двухобмоточного и на сторонах НН и СН для трехобмоточного трансформатора.

Такая защита может использоваться в случаях, когда обычная дифференциальная защита с одной зоной чувствительности, отстроенная от максимального тока небаланса при переходном режиме внешних КЗ на стороне высшего напряжения, не обеспечивает требуемую чувствительность к КЗ в защищаемой зоне на сторонах низшего и среднего напряжений трансформатора.

Ток срабатывания защиты в зоне пониженной чувствительности на стороне ВН определяется числом витков рабочей обмотки НТТ реле, присоединенных к выносным (или встроенным во втулки выключателей) трансформаторам тока на стороне ВН: $w_{I\,ур}+w_р$ — в схеме по рис. П3.1,*а*; $w_{II\,ур}+w_р$ — в схеме по рис. П3.1,*б* и $w_р$ — в схеме по рис. П3.1,*в*.

Для увеличения чувствительности защиты при повреждениях в трансформаторе (основная зона защиты) используются трансформаторы тока, встроенные во втулки ВН защищаемого трансформатора, к которым присоединяется некоторое число витков рабочей обмотки НТТ реле. Полярность этих трансформаторов тока принимается такой, чтобы при повреждениях в основной зоне МДС витков рабочей обмотки НТТ реле, присоединенных к этим трансформаторам тока и к выносным (или встроенным во втулки выключателей) трансформаторам тока на стороне ВН, суммировались.

Поэтому при одинаковых коэффициентах трансформации рассматриваемых трансформаторов тока ток срабатывания защиты в основной зоне определяется суммой присоединенных к ним витков рабочей обмотки реле: $(w_{I\,ур}+w_р)+w_р$ — в схеме по рис. П3.1,*а*; $(w_{II\,ур}+w_р)+w_р$ — в схеме по рис. П3.1,*б* и $w_р+w_р'$ — в схеме по рис. П3.1,*в*.

При разных коэффициентах трансформации этих трансформаторов тока рассматриваемые витки должны быть приведены к одному и тому же вторичному номинальному току.

Следует отметить, что опробование трехобмоточных трансформаторов при наличии зоны пониженной чувствительности на стороне высшего напряжения должно производиться также со стороны высшего напряжения, поскольку при повреждении в зоне пониженной чувствительности в режиме опробования со стороны среднего напряжения чувствительность защиты может оказаться недостаточной.

Применение зоны пониженной чувствительности ограничивается по условию чувствительности, поскольку тормозная обмотка реле серии ДЗТ-11 обычно используется для отстройки от токов небаланса основной зоны защиты. Кроме того, при соединении трансформаторов тока на стороне зоны пониженной чувствительности в треугольник снижается чувствительность к двухфазным и однофазным КЗ по сравнению с отдельной защитой ошиновки, трансформаторы тока которой могут быть соединены в звезду.

4. На рис. П3.2 показано выполнение дифференциальной защиты с зоной повышенной чувствительности на стороне низшего напряжения для двух- и трехобмоточных трансформаторов при наличии на рассматриваемой стороне одиночного или сдвоенного реактора.

Рассматриваемая защита имеет две зоны разной чувствительности:

основную зону, охватывающую трансформатор и ограниченную трансформаторами тока, установленными на сторонах ВН и СН, и специально устанавливаемыми между выводами трансформатора и токоограничивающим реактором трансформаторами тока на стороне НН;

зону повышенной чувствительности, охватывающую токоограничивающий реактор и соединения на стороне НН и ограниченную специально устанавливаемыми между выводами трансформатора и токоограничивающим реактором трансформаторами тока и выносными трансформаторами тока, установленными за реактором.

Такая защита может использоваться в случаях, когда обычная дифференциальная защита с одной зоной чувствительности, обеспечивая требуемую чувствительность при КЗ до реактора, не обеспечивает ее при КЗ за реактором.

Ток срабатывания защиты в основной зоне определяется числом витков рабочей обмотки НТТ реле, присоединенных к трансформаторам тока на сторонах ВН и СН: $w_{II\,ур}+w_р$ — в схемах по рис. П3.2,*а* и *б*, $w_{1\,р}$ и $w_{2\,р}$ — в схеме по рис. П3.2,*в*.

Для увеличения чувствительности защиты при повреждениях в токоограничивающем реакторе и соединениях на стороне низшего напряжения используются трансформаторы тока, специально устанавливаемые на стороне НН между выводами трансформатора и реактором, к которым присоединяется некоторое число витков рабочей обмотки реле; полярность этих трансформаторов тока принимается такой, чтобы при повреждениях в зоне повышенной чувствительности МДС витков рабочей обмотки реле, присоединенных к этим трансформаторам тока и к трансформаторам тока, установленным на сторонах ВН и СН, суммировались.

Поэтому при одинаковых коэффициентах трансформации рассматриваемых трансформаторов тока ток срабатывания защиты в зоне повышенной чувствительности определяется суммой присоединенных к ним витков рабочей обмотки реле: $(w_{II\,ур}+w_р)+w_р$ — в схемах по рис. П.3.2,*а* и *б*; $w_{1р}+w'_{2р}$ и $w_{2р}+w'_{2р}$ — в схеме по рис. П3.2,*в*.

При разных коэффициентах трансформации этих трансформаторов тока рассматриваемые витки должны быть приведены к одному и тому же вторичному номинальному току.

5. Присоединение трансформаторов тока к рабочим обмоткам НТТ реле в схемах по рис. П3.1 и П3.2 показано условно. Например, схемы по рис. П3.1,*а* и *б* показаны для случая, когда при одинаковых коэффициентах трансформации выносных (или встроенных во втулки выключателей) и встроенных во втулки трансформаторов трансформаторов тока защита в зоне пониженной чувствительности не более чем в 2 раза грубее, чем в основной зоне. Если же требуется иметь большее загрубление в зоне пониженной чувствительности, то целесообразно поменять местами присоединение к рабочим обмоткам НТТ реле встроенных и выносных трансформаторов тока, установленных на стороне ВН.

6. В схемах защиты трехобмоточного трансформатора (рис. П3.1,*в* и П3.2,*в*) в общем случае требуется предусмотреть дополнительное присоединение к рас-

четному витку дифференциальной обмотки НТТ реле. Конструктивно это может быть легко выполнено гибким проводником, присоединяемым под винт, соединяющий расчетный виток с гнездом под платой. Другой конец гибкого проводника соединяется с одним из зажимов (10, 11 или 12), предусматриваемых во вторичной обмотке реле серии ДЗТ-11 для испытаний, к этому же зажиму присоединяется соответствующий трансформатор тока.

7. Схема по рис. П3.1,*в* в частном случае может быть выполнена без использования дополнительного присоединения, рассмотренного в п. 6 настоящего приложения. В этом случае встроенные во втулки ВН защищаемого трансформатора трансформаторы тока присоединяются к тому же зажиму дифференциальной обмотки $w_р$, что и выносные трансформаторы тока на стороне ВН (рис. П3.3,*а*). При таком присоединении в случае одинаковых коэффициентов трансформации выносных (или встроенных во втулки выключателей) и встроенных во втулки ВН защищаемого трансформатора трансформаторов тока обеспечивается загрубление защиты в зоне пониженной чувствительности ровно в 2 раза.

На рис. П3.3,*б* показано выполнение дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора с тремя зонами разной чувствительности при том же соотношении чувствительности защиты в зоне пониженной чувствительности и в основной зоне, как и в схеме по рис. П3.3,*а*.

Следует учитывать также, что для выполнения защиты с зонами разной чувствительности без использования дополнительного присоединения можно использовать различие коэффициентов трансформации встроенных во втулки защищаемого трансформатора и выносных трансформаторов тока на стороне ВН и выносных трансформаторов тока на стороне НН, установленных до и после токоограничивающего реактора.

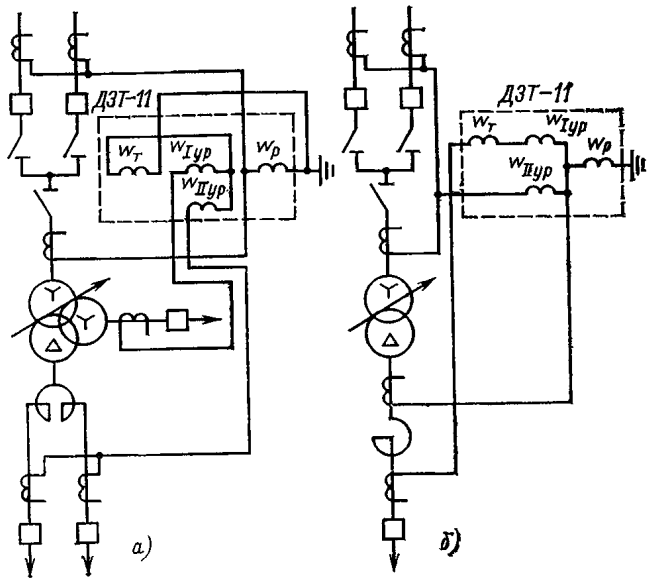


Рис. П3.3. Принципиальные схемы дифференциальной токовой защиты трансформатора с зонами разной чувствительности без использования дополнительного присоединения:

а — для трехобмоточного трансформатора с зоной пониженной чувствительности; *б* — для двухобмоточного трансформатора с зонами пониженной и повышенной чувствительности

8. Следует отметить, что схема по рис. П3.2,*в* имеет весьма ограниченную область применения в связи с тем, что в этой схеме при внешних КЗ на стороне среднего напряжения не имеется торможения.

ПРИЛОЖЕНИЕ П4

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ГРУППЫ ОДНОФАЗНЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ, ВЫПОЛНЕННАЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОКА В КОМПЕНСАЦИОННОЙ ОБМОТКЕ, С РЕЛЕ СЕРИИ РНТ-560 ИЛИ ДЗТ-11*

1. Особенности выполнения и указания по расчету

1.1. Ниже рассмотрены особенности выполнения и даны указания по расчету дифференциальной токовой защиты однофазных автотрансформаторов с вынесенной на отдельный (боковой) стержень магнитопровода регулировочной обмоткой (рис. П4.1), что позволяет производить независимое регулирование напряжения только на стороне среднего напряжения трансформатора.

В таком автотрансформаторе сумма МДС обмоток на среднем стержне магнитопровода при пренебрежении намагничивающим током равна нулю и не зависит от регулирования

$$\underline{I}'_{ВН}(W_1 + W_2) + \underline{I}'_{СН}W_2 + \underline{I}_з'W_з = 0, \qquad (П4.1)$$

где $\underline{I}'_{ВН}$, $\underline{I}'_{СН}$ и $\underline{I}_з'$ — токи (при $t = 0$), проходящие по обмоткам среднего стержня магнитопровода защищаемого автотрансформатора.

Поэтому если дифференциальную защиту, в которую в нагрузочном режиме и при внешних КЗ попадают токи, проходящие по обмоткам среднего стержня ($\underline{I}'_{ВН}$, $\underline{I}'_{СН}$ и $\underline{I}'_з$), настроить на баланс МДС этих обмоток, то при регулировании в ней не будет создаваться МДС от тока небаланса $I''_{нб}$, обусловленного регулированием напряжения под нагрузкой защищаемого автотрансформатора. Такая защита будет чувствительнее обычной дифференциальной защиты, включенной на фазные токи с трех сторон автотрансформатора.

Рассматриваемая защита должна быть включена со стороны низшего напряжения на разность токов на выходе обмотки низшего напряжения $\underline{I}_{НН}$ и в компенсационной обмотке $\underline{I}_{комп}$ (коэффициенты трансформации трансформаторов тока, установленных в этих цепях, должны быть одинаковыми), а со стороны высшего и среднего напряжений — на фазные токи, так как трансформаторы тока со всех сторон включаются в звезду.

Для того чтобы результирующая МДС обмоток НТТ реле в нагрузочном режиме и при внешних КЗ отражала баланс МДС обмоток на среднем стержне магнитопровода автотрансформатора [см. (П4.1)], соотношение чисел используемых витков обмоток реле на разных сторонах автотрансформатора должно соответствовать соотношению чисел витков обмоток среднего стержня магнитопровода или пропорциональных им номинальных фазных напряжений автотрансформатора.

Из выражения, аналогичного (П4.1), но написанного для вторичных токов

$$\underline{I}'_{ВН,в}K_{IВН}(W_1 + W_2) + \underline{I}_{СН,в}K_{IСН}W_2 + \underline{I}'_{Зв}K_{IНН}W_з = 0, \qquad (П4.2)$$

* Настоящее приложение составлено с использованием работы инж. В. И. Абраменкова (Сибирское отделение ЭСП).

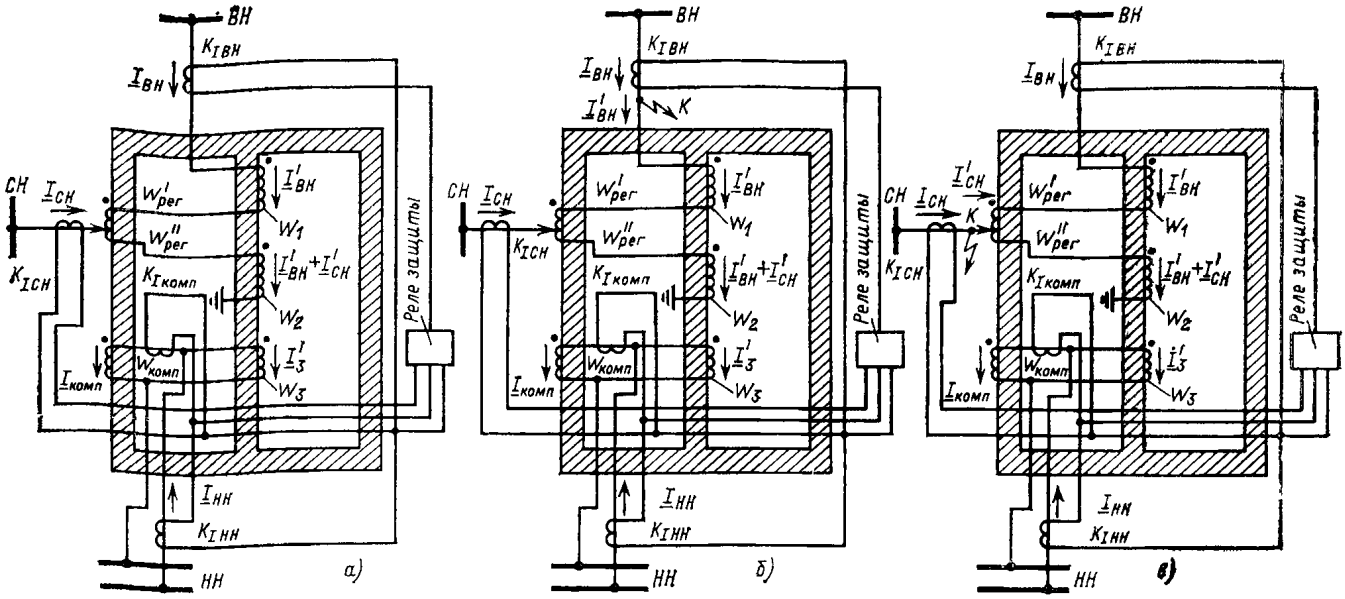


Рис. П4.1. Схема размещения обмоток и токораспределение в автотрансформаторе с вынесенной на боковой стержень магнитопровода регулировочной обмоткой:
а — схема размещения обмоток; *б* — токораспределение при КЗ на выводах ВН; *в* — то же на выводах СН; $I'_{ВН}$, $I'_{СН}$, I'_3 — токи, проходящие по обмоткам среднего стержня магнитопровода автотрансформатора; $I_{ВН}$, $I_{СН}$ — токи, подходящие с соответствующих сторон к защищаемому автотрансформатору (первичные токи, проходящие через трансформаторы тока защиты)

(где $K_{I\,ВН}$, $K_{I\,СН}$ и $K_{I\,НН}$ — коэффициенты трансформации трансформаторов тока, установленных соответственно на сторонах высшего, среднего и низшего — на выходе обмотки низшего напряжения и в цепи компенсационной обмотки — напряжений автотрансформатора), видно, что используемые числа витков обмоток НТТ реле должны быть пропорциональны коэффициентам при вторичных токах в (П4.2), т. е.

$$\left.\begin{aligned} w_{ВН} &= k_1 K_{IВН}(W_1 + W_2);\\ w_{СН} &= k_1 K_{IСН} W_2;\\ w_{НН} &= k_1 K_{IНН} W_3. \end{aligned}\right\} \qquad (П4.3)$$

Поскольку отношение чисел витков обмоток среднего стержня автотрансформатора может быть выражено через номинальные напряжения этих обмоток (см. рис. П4.1).

$$\left.\begin{aligned} W_1 &= k_2(U_{ф,\,ном,\,ВН} - U_{ф,\,ном,\,СН} - 0{,}5U_{ф,\,рег});\\ W_2 &= k_2(U_{ф,\,ном,\,СН} - 0{,}5U_{ф,\,рег});\\ W_3 &= k_2 U_{ном,\,НН}, \end{aligned}\right\} \qquad (П4.4)$$

где $U_{ф,ном,ВН}$, $U_{ф,ном,СН}$, $U_{ном,НН}$, $U_{ф,рег}$ — номинальные напряжения соответственно обмотки высшего, среднего (на среднем ответвлении регулировочной обмотки) и низшего напряжений автотрансформатора и на регулировочной обмотке, выражения (П4.3) для используемых чисел витков обмоток НТТ реле могут быть записаны в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} w_{ВН} &= k_3 K_{IВН}(U_{ф,\,ном,\,ВН} - U_{ф,\,рег});\\ w_{СН} &= k_3 K_{IСН}(U_{ф,\,ном,\,СН} - 0{,}5U_{ф,\,рег});\\ w_{НН} &= k_3 K_{IНН} U_{ном,\,НН}, \end{aligned}\right\} \qquad (П4.5)$$

Расчет рассматриваемой защиты производится аналогично расчету обычной дифференциальной защиты, включенной на геометрическую сумму токов сторон защищаемого автотрансформатора.

1.2. Первичный ток срабатывания защиты определяется по (2.1)—(2.4) с той лишь разницей, что в токе небаланса при внешнем КЗ по (2.3) не учитывается составляющая $I''_{нб}$, обусловленная регулированием напряжения под нагрузкой.

1.3. Ток срабатывания реле (вторичный ток срабатывания защиты) для одной из сторон, принятой в расчете за основную $I_{с.р.осн}$, а также используемое число витков обмотки НТТ реле на основной стороне $w_{осн}$ определяются в соответствии с рекомендациями, приведенными в п. 2.1.6. При этом коэффициент схемы всегда принимается равным 1, так как трансформаторы тока защиты со всех сторон защищаемого автотрансформатора включаются в звезду.

1.4. Числа используемых витков обмотки НТТ реле на других (неосновных) сторонах $w_{I\,расч}$ и $w_{II\,расч}$ определяются, исходя из отношений либо чисел витков обмоток, расположенных на среднем стержне магнитопровода автотрансформатора [см. (П4.3)], либо пропорциональных им номинальных фазных напряжений автотрансформатора [см. (П4.5)].

Например, при принятии за основную стороны высшего напряжения расчетные числа витков обмотки НТТ реле для сторон среднего $w_{сн.расч}$ и низшего $w_{нн.расч}$ напряжений определяются по выражениям:

$$w_{СН,\,расч} = \frac{K_{IСН} W_2}{K_{IВН}(W_1 + W_2)} w_{ВН} = \frac{K_{IСН}(U_{ф,\,ном,\,СН} - 0{,}5U_{ф,\,рег})}{K_{IВН}(U_{ф,\,ном,\,ВН} - U_{ф,\,рег})} w_{ВН}; \qquad (П4.6)$$

$$w_{НН,\,расч} = \frac{K_{IНН} W_3}{K_{IВН}(W_1 + W_2)} w_{ВН} = \frac{K_{IНН} U_{ном,\,НН}}{K_{IВН}(U_{ф,\,ном,\,ВН} - U_{ф,\,рег})} w_{ВН}. \qquad (П4.7)$$

1.5. После принятия числа витков для неосновных сторон в соответствии с рекомендациями пп. 2.2.7, 2.2.8 и 2.2.9 по (2.6), (2.3) и (2.1) определяется составляющая тока небаланса $I'''_{нб.}$, обусловленная неточностью установки на НТТ реле расчетного числа витков обмоток для неосновных сторон, и уточняется ток срабатывания защиты.

1.6. Чувствительность защиты при КЗ в защищаемой зоне определяется в соответствии с п. 2.1.7 по (2.22).

Входящая в (2.22) суммарная рабочая МДС обмоток НТТ реле при рассматриваемом металлическом КЗ в защищаемой зоне определяется по выражению

$$\Sigma F_{раб} = \frac{\underline{I}_{ВН}}{K_{IВН}} w_{ВН} + \frac{\underline{I}_{СН}}{K_{IСН}} w_{СН} + \frac{\underline{I}_{НН} - \underline{I}_{комп}}{K_{IНН}} w_{НН}, \quad (П4.8)$$

где $\underline{I}_{вн}$, $\underline{I}_{сн}$, $\underline{I}_{нн}$ и $\underline{I}_{комп}$ — первичные токи (при $t=0$), подходящие с соответствующих сторон к защищаемому автотрансформатору и ток в его компенсационной обмотке при рассматриваемом КЗ в защищаемой зоне (рис. П4.1,*б* и *в*); $w_{вн}$, $w_{сн}$, $w_{нн}$ — числа используемых витков обмоток НТТ реле соответственно для сторон высшего, среднего и низшего напряжений автотрансформатора.

Ток в компенсационной обмотке $\underline{I}_{комп}$ может быть определен из условия равенства нулю суммы МДС обмоток бокового стержня магнитопровода автотрансформатора

$$\underline{I}'_{ВН}(W'_{рег} + W''_{рег}) + \underline{I}'_{СН} W''_{рег} + \underline{I}_{комп} W_{комп} = 0, \quad (П4.9)$$

откуда

$$\underline{I}_{комп} = -\left(\underline{I}'_{ВН}\frac{W_{рег}}{W_{комп}} + \underline{I}'_{СН}\frac{W''_{рег}}{W_{комп}}\right), \quad (П4.10)$$

где $W_{рег} = W'_{рег} + W''_{рег}$.

С учетом выражения (П4.10) выражение (П4.8) приобретает следующий вид:

$$\Sigma F_{раб} = \underline{I}_{ВН}\frac{w_{ВН}}{K_{I\,ВН}} + \underline{I}_{СН}\frac{w_{СН}}{K_{I\,СН}} + \left(\underline{I}'_{ВН}\frac{W_{рег}}{W_{комп}} + \underline{I}'_{СН}\frac{W''_{рег}}{W_{комп}} + \underline{I}_{НН}\right)\frac{w_{НН}}{K_{I\,НН}}. \quad (П4.11)$$

При КЗ на стороне высшего напряжения (рис. П4.1,*б*) $\underline{I}'_{сн} = \underline{I}_{сн}$, а $\underline{I}'_{вн}$ имеет отрицательное значение (за положительное приняты направления токов к защищаемому автотрансформатору, указанные на рис. П4.1,*б* и *в*); при КЗ на стороне среднего напряжения (рис. П4.1,*в*) $\underline{I}'_{вн} = \underline{I}_{вн}$, а $\underline{I}'_{сн}$ имеет отрицательное значение; при КЗ на стороне низшего напряжения $\underline{I}'_{вн} = \underline{I}_{вн}$ и $\underline{I}'_{сн} = \underline{I}_{сн}$.

Исходя из указанного расчетным режимом работы автотрансформатора при КЗ на сторонах высшего и низшего напряжений будет низшее положение регулятора напряжения ($W''_{рег} = 0$), а при КЗ на стороне среднего напряжения — высшее положение регулятора напряжения ($W''_{рег}$ — максимальное).

Отношения чисел витков обмоток бокового стержня могут быть заменены пропорциональными им отношениями номинальных фазных напряжений автотрансформатора

$$W_{рег} = k_4 U_{ф,рег}; \quad (П4.12)$$

$$W_{комп} = k_4 U_{ном,нн}; \quad (П4.13)$$

$$W''_{рег} = k_4 U_{ф,\,рег}. \quad (П4.14)$$

Выражение (П4.14) соответствует расчетному (верхнему) положению регулятора напряжения для случая КЗ в защищаемой зоне на стороне среднего напряжения.

С учетом (П4.12)—(П4.14) выражение (П4.11) в расчетных условиях КЗ в защищаемой зоне принимает вид:

при нижнем (—РО) положении регулятора

$$\Sigma F_{раб} = \underline{I}_{ВН}\frac{w_{ВН}}{K_{I\,ВН}} + \underline{I}_{СН}\frac{w_{СН}}{K_{I\,СН}} + \left(\underline{I}'_{ВН}\frac{U_{ф,\,рег}}{U_{ном,\,НН}} + \underline{I}_{НН}\right)\frac{w_{НН}}{K_{I\,НН}}; \quad (П4.15)$$

при верхнем (+РО) положении регулятора

$$\Sigma F_{раб} = \underline{I}_{ВН}\frac{w_{ВН}}{K_{I\,ВН}} + \underline{I}_{СН}\frac{w_{СН}}{K_{I\,СН}} + \left[(\underline{I}'_{ВН} + \underline{I}'_{СН})\frac{U_{ф,\,рег}}{U_{ном,\,НН}} + \underline{I}_{НН}\right]\frac{w_{НН}}{K_{I\,НН}}. \quad (П4.16)$$

Следует отметить, что при КЗ на стороне среднего напряжения расчетным по чувствительности, как правило, является верхнее (+РО) положение регулятора, а при КЗ на сторонах высшего и низшего напряжений — нижнее (—РО) положение регулятора.

2. Пример расчета

2.1. В настоящем примере дан расчет дифференциальной токовой защиты группы из трех однофазных автотрансформаторов (в дальнейшем в целях сокращения именуемой «автотрансформатор») мощностью 3×167 МВ·А, напряжением 500/230/11 кВ. Автотрансформатор имеет встроенное регулирование напряжения под нагрузкой (РПН) на стороне среднего напряжения в пределах ±12,12 % номинального. Регулировочная обмотка вынесена на отдельный (боковой) стержень магнитопровода. Автотрансформатор установлен на двухавтотрансформаторной подстанции; предусматривается параллельная работа на стороне 220 кВ.

Дан расчет защиты с использованием тока компенсационной обмотки автотрансформатора, т. е. не реагирующей на ток $I'''_{нб}$ и выполненной с реле типа РНТ-566 и ДЗТ-11/4. В целях сравнения в табл. П4.6 приведены также параметры дифференциальной защиты с реле типа ДЗТ-11/4, включенным по обычной схеме без использования тока компенсационной обмотки, т. е. реагирующей на ток $I'''_{нб}$.

Исходная схема для расчета, а также схемы замещения прямой (обратной) и нулевой последовательности приведены на рис. П4.2,*а*—*к*. Пример рассчитан в именованных единицах, сопротивления, приведенные к стороне высшего напряжения, в схемах замещения указаны в омах.

2.2. Расчет защиты, выполненной с реле типа РНТ-566, без учета $I'''_{нб,\,расч}$ производится в следующем порядке.

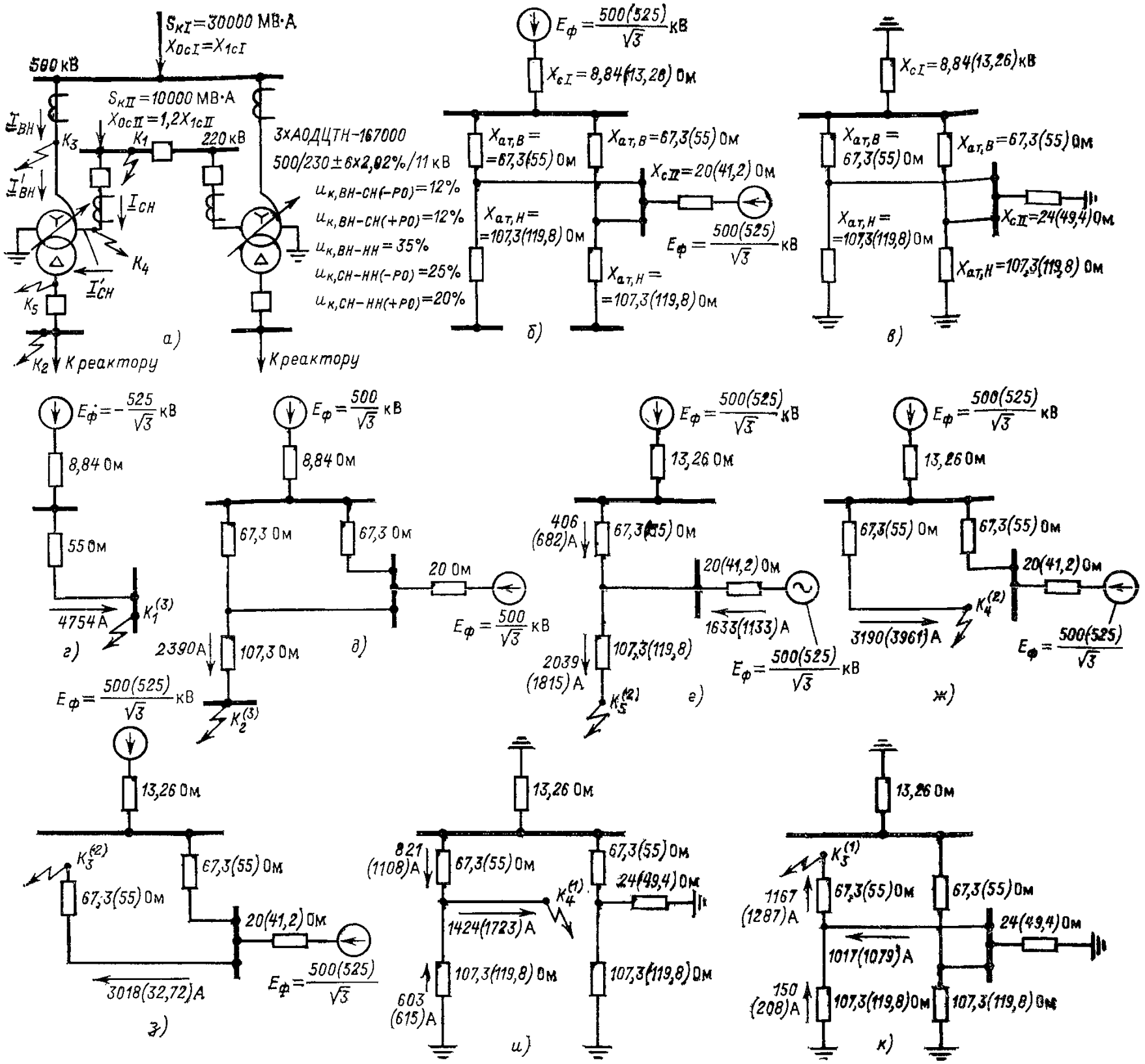


Рис. П4.2. Пример расчета дифференциальной токовой защиты однофазного автотрансформатора с вынесенной на боковой стержень магнитопровода регулировочной обмоткой:

а — исходная схема; *б* — схема замещения прямой (обратной) последовательности; *в*—схема замещения нулевой последовательности; *г* — схема замещения прямой последовательности для определения тока при внешнем трехфазном КЗ в точке K_1 в режиме IV1; *д*—то же, что г, но в точке K_2 в режиме 12; *е*—схема замещения прямой (обратной) последовательности для определения токов КЗ между двумя фазами в защищаемой зоне в точке K_5 в режиме I1; *ж*—то же, что *е*, но в точке K_4 в режиме II2; *з* — то же, что *е*, но в точке K_3 в режиме III2; *и* — схема замещения нулевой последовательности для определения токов однофазного КЗ в защищаемой зоне в точке K_4 в режиме II2 (схема замещения прямой и обратной последовательностей приведена на рисунке *ж*); *к* — то же, что *и*, но в точке K_3 в режиме III2 (схема замещения прямой и обратной последовательностей приведена на рисунке *з*).

Примечания: 1. Режимы обозначены: I — включены обе системы и все выключатели автотрансформатора; II — включены обе системы, но отключен выключатель со стороны СН; III — включены обе системы, но отключен выключатель со стороны ВН; IV — отключена система СН, все выключатели включены; 1 — в работе находится один автотрансформатор; 2 — в работе находятся два автотрансформатора.

2. В схемах замещения даны номинальное и максимальное рабочее напряжения сети. Сопротивления питающих систем указаны для максимального и минимального (в скобках) режимов работы. Сопротивления автотрансформатора и токи указаны для крайних отклонений регулятора в сторону увеличения и уменьшения (в скобках) напряжения регулируемой обмотки

Таблица П4.1

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение для стороны		
		500 кВ	220 кВ	10 кВ
Первичный ток на сторонах защищаемого автотрансформатора, соответствующий его проходной мощности, А	$I_{ном}=\frac{S_{прох}}{\sqrt{3}U_{ном,ср}}$	$\frac{3\cdot167\,000}{\sqrt{3}\cdot500}=580$	$\frac{3\cdot167\,000}{\sqrt{3}\cdot230}=1260$	$\frac{3\cdot167\,000}{\sqrt{3}\cdot11\cdot\sqrt{3}}=15\,160$
Схема соединения трансформаторов тока	—	У	У	У
Коэффициент трансформации трансформаторов тока	K_I	1000/1	2000/1	6000/5
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий проходной мощности защищаемого автотрансформатора, А	$I_{ном,в}=\frac{I_{ном}k_{сх}}{K_I}$	$\frac{580\cdot1}{1000/1}=0,58$	$\frac{1260\cdot1}{2000/1}=0,63$	$\frac{15\,160\cdot1}{6000/5}=12,65$

2.2.1. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого автотрансформатора, соответствующие его проходной мощности. При этом первичный ток на стороне низшего напряжения определяется как ток в фазе, поскольку на стороне низшего напряжения для защиты использованы трансформаторы тока, установленные в фазах. Определяются вторичные токи в плечах защиты, исходя из коэффициентов трансформации трансформаторов тока.

Расчеты выполнены в соответствии с п. 2.2.1 и сведены в табл. П4.1.

2.2.2. Определяется максимальный первичный ток, проходящий через защищаемый автотрансформатор при КЗ между тремя фазами на шинах 220 кВ, отключенной системе среднего напряжения и работе одного автотрансформатора (точка $К1^{(3)}$ на рис. П4.2,*е*).

$$I^{(3)}_{к\,max}=4754\text{ А}.$$

2.2.3. Определяется первичный расчетный ток небаланса $I_{нб,расч}$ без учета составляющих $I''_{нб,расч}$ и $I'''_{нб,расч}$ при рассматриваемом внешнем КЗ по (2.3) и (2.4) и в соответствии с п. 2.2.3.

$$I_{нб,расч}=1\cdot1\cdot0,1\cdot4754=475,4\text{ А}.$$

2.2.4. Предварительно определяется первичный ток срабатывания защиты в соответствии с п. 1.2 настоящего приложения по условию отстройки от максимального тока небаланса по (2.1) без учета составляющих тока небаланса $I''_{нб,расч}$ и $I'''_{нб,расч}$

$$I_{с,з}\geqslant1,3\cdot475,4=618\text{ А};$$

по условию отстройки от броска намагничивающего тока по (2.2)

$$I_{с,з}\geqslant1,3\cdot0,54\cdot580=407\text{ А}.$$

Первичный ток срабатывания защиты принимается равным $I_{с,з}=618$ А.

2.2.5. Определяется число витков обмотки НТТ реле для основной стороны 500 кВ (за основную сторону в соответствии с п. 1.3 данного приложения принята сторона основного питания). Принимается ближайшее меньшее по отношению к полученному из выражения (2.18) число витков $w_{осн}=161$ виток.

2.2.6. Предварительно определяются числа витков обмотки НТТ реле для неосновных сторон 220 и 10 кВ защищаемого автотрансформатора в соответствии с (П4.6) и (П4.7).

Эти числа витков уточняются после учета составляющей тока небаланса $I'''_{нб,расч}$, обусловленной неточностью установки на НТТ реле расчетных чисел витков согласно п. 2.2.8.

Расчеты по пп. 2.2.5 и 2.2.6 настоящего приложения сведены в табл. П4.2.

Из п.11 табл. П4.2 видно, что коэффициент отстройки не обеспечивает селективности действия защиты, поэтому для основной стороны следует принять новое число витков, ближайшее меньшее по отношению к полученному в п.3 табл. П4.2 и пересчитать числа витков обмотки НТТ реле для неосновных сторон. Указанное снижение чисел витков для основной стороны и пересчет числа витков обмотки НТТ реле для неосновных сторон должно производиться, до тех пор, пока ни обеспечится селективность. Окончательно принятым числом витков для основной стороны явилось $w_{осн}=155$ витков, а для неосновных сторон $w_{сн}=141$ виток и $w_{нн}=8$ витков.

Схема включения реле РНТ-566 приведена на рис. П4.3,*а*.

2.2.7. Определяется чувствительность защиты при КЗ в защищаемой зоне по (П4.15) и (П4.16) в соответствии с п. 1.6 настоящего приложения.

Схемы замещения для расчета токов КЗ в расчетных режимах приведены на рис. П.4.2,*е* — *к*, а значения токов сведены в табл. П4.3.

Результаты расчетов по п.2.2.7 настоящего приложения приведены в табл. П4.3.

2.3. Расчет защиты, выполненной с реле типа ДЗТ-11/4, без учета $I''_{нб,расч}$ производится в следующем порядке.

2.3.1. Первичные токи для всех сторон защищаемого автотрансформатора, коэффициенты трансформации трансформаторов тока и вторичные токи в плечах защиты заимствованы из табл. П4.1.

2.3.2. Выбирается сторона, к трансформаторам тока которой целесообразно присоединить тормозную обмотку реле. В соответствии с рекомендациями п.3.1.5 тормозную обмотку целесообразно включить на ток трансформатора тока, установленного на стороне среднего напряжения.

Таблица П4.2

№ п/п.	Наименование величин	Обозначение и метод определения	Числовое значение
1	Ток срабатывания реле на основной стороне, *А*	$I_{с,\,р,\,осн} = \frac{I_{с,\,з} k_{сх}}{K_{I\,ВН}}$	$\frac{618 \cdot 1}{1000/1} = 0{,}618$
2	Расчетное число витков обмотки НТТ реле для основной стороны	По (2.18) $w_{осн,\,расч} = \frac{F_{с,\,р}}{I_{с,\,р,\,оси}}$	$\frac{100}{0{,}618} = 161{,}8$
3	Предварительно принятое число витков обмотки НТТ реле для основной стороны	$w_{осн}$	161
4	Расчетное число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 220 кВ	По (П4.6) $w_{СН\,расч} = \frac{K_{IСН}(U_{ф,\,ном,\,СН} - 0{,}5U_{ф,\,рег})}{K_{IВН}(U_{ф,\,ном,\,ВН} - U_{ф,\,рег})} w_{ВН}$	$\frac{2000/1\,(230/\sqrt{3} - 16{,}4)}{1000/1\,(500/\sqrt{3} - 16{,}4 \cdot 2)} \times 161 = 146{,}2$
5	Предварительно принятое число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 220 кВ	$w_{СН}$	148
6	Расчетное число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 10 кВ	По (П4.7) $w_{НН\,расч} = \frac{K_{IНН} U_{ном,\,НН}}{K_{IВН}(U_{ф,\,ном,\,ВН} - U_{ф,рег})} w_{ВН}$	$\frac{6000/5 \cdot 11}{1000/1\,(500/\sqrt{3} - 16{,}4 \cdot 2)} \times 161 = 8{,}29$
7	Предварительно принятое число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 10 кВ	$w_{НН}$	8
8	Составляющая первичного тока небаланса, обусловленная округлением расчетного числа витков неосновной стороны для расчетного случая повреждения, А.	По (2.6) $I'''_{нб,\,расч} = \left\| \frac{w_{СН\,расч} - w_{СН}}{w_{СН\,расч}} I_{к\,max} \right\|$	$\left\| \frac{146{,}2 - 148}{146{,}2} \cdot 4754 \right\| = 48{,}6$
9	Первичный расчетный ток небаланса с учетом составляющей $I'''_{нб,\,расч}$, А	$I_{нб,расч} = \| I'_{нб,\,расч} \| + \| I'''_{нб,\,расч} \|$	$475{,}4 + 48{,}6 = 524$
10	Ток срабатывания защиты на основной стороне, *А*	$I_{с,\,з} = \frac{F_{с,\,р}}{w_{осн}} \frac{K_{IВН}}{k_{сх}}$	$\frac{100}{161} \cdot \frac{1000/1}{1} = 621$
11	Уточненное значение коэффициента отстройки	$k_{отс} = \frac{I_{с,\,з}}{I_{нб,расч}}$	$\frac{621}{524} = 1{,}18 < 1{,}3$
12	Уточненное число витков обмотки НТТ реле для основной стороны	$w'_{осн}$	155
13	Уточненное расчетное число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 220 кВ	По (П4.6) $w_{СНрасч} = \frac{K_{IСН}(U_{ф,\,ном,\,СН} - 0{,}5U_{ф,\,рег})}{K_{IВН}(U_{ф,\,ном,\,ВН} - U_{ф,рег})} w_{ВН}$	$\frac{2000/1\,(230/\sqrt{3} - 16{,}4)}{1000/1\,(500/\sqrt{3} - 16{,}4 \cdot 2)} \times 155 = 141$
14	Уточненное число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 220 кВ	$w_{СН}$	141

Продолж. табл. П4.2

№ п/п.	Наименование величин	Обозначение и метод определения	Числовое значение
15	Уточненное расчетное число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 10 кВ	По (П4.7) $w_{НН\ расч} = \frac{K_{I\,НН} U_{ном,\,НН}}{K_{I\,ВН}(U_{ф,\,ном,\,ВН} - U_{ф,\,рег})} w_{ВН}$	$\frac{6000/5 \cdot 11}{1000/5(500/\sqrt{3} - 16{,}4 \cdot 2)} \times 155 = 7{,}98$
16	Уточненное число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 10 кВ	$w_{НН}$	8
17	Составляющая первичного тока небаланса, обусловленная, округлением уточненного расчетного числа витков неосновной стороны для расчетного случая повреждения, А	По (2.6) $I'''_{нб,\,расч} = \left\| \frac{w_{СН\ расч} - w_{СН}}{w_{СН\ расч}} I_{к\ max} \right\|$	0
18	Ток срабатывания защиты на основной стороне, А	$I_{с.з} = \frac{F_{с.р}}{w_{осн}} \frac{K_{I\,ВН}}{k_{сх}}$	$\frac{100}{155} \cdot \frac{1000/1}{1} = 645$
19	Первичный уточненный расчетный ток небаланса с учетом составляющей $I'''_{нб,\,расч}$, А	$I_{нб,\,расч} = \| I'_{нб,\,расч} \| + \| I'''_{нб,\,расч} \|$	$475{,}4 + 0 = 475{,}4$
20	Уточненное значение коэффициента отстройки	$k_{отс} = \frac{I_{с.з}}{I_{нб,расч}}$	$\frac{645}{475{,}4} = 1{,}36 > 1{,}3$
21	Окончательно принятое число витков	$w_{ВН}$; $w_{СН}$; $w_{НН}$	155; 141; 8

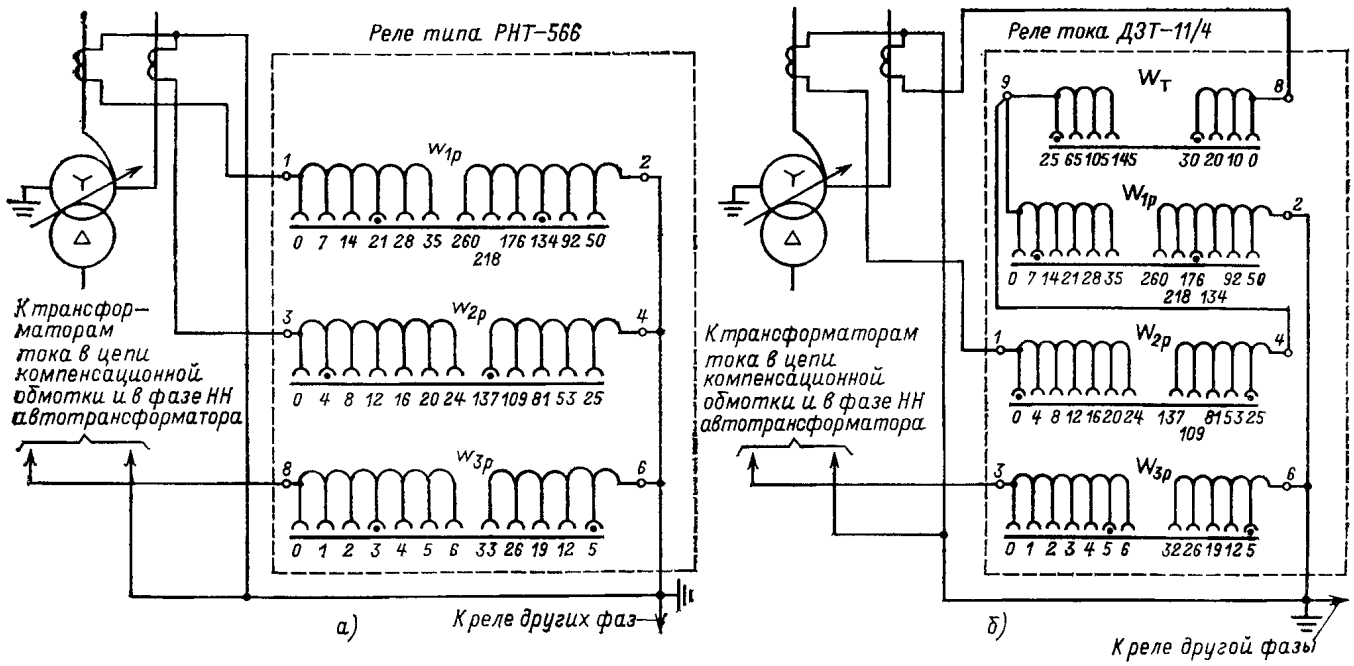


Рис. П4.3. Схемы включения реле в примере расчета дифференциальной токовой защиты однофазного автотрансформатора с вынесенной на боковой стержень магнитопровода регулировочной обмоткой:
а — при выполнении защиты с реле типа РНТ-566; *б* — то же с реле типа ДЗТ-11/4

Таблица П4.3

№ п/п.	Вид и место КЗ в защищаемой зоне в режиме	Значения токов КЗ по рис. П4.2, *а*, приведенных к соответствующим сторонам, А, при положении регулятора				
		$I_{ВН}$		$I'_{ВН}$		$I_{СН}$
		+РО	−РО	+РО	−РО	+РО
1	КЗ между двумя фазами на выводах низшего напряжения автотрансформатора в режиме 11	406	682	406	682	$1633\frac{500}{257,6}=3168$
2	КЗ между двумя фазами на стороне среднего напряжения автотрансформатора в режиме II 2	3190	3961	3190	3961	0
3	КЗ между двумя фазами на стороне высшего напряжения автотрансформатора в режиме III 2	0	0	−3018	−3272	$3018\frac{500}{257,6}=5855$
4	КЗ на землю одной фазы на стороне среднего напряжения автотрансформатора в режиме II 2	$1424\cdot2+$ $+821=3669$	$1723\cdot2+$ $+1108=$ $=4554$	3669	4554	0
5	КЗ на землю одной фазы на стороне высшего напряжения автотрансформатора в режиме III 2	0	0	$-1167\cdot3=$ $=-3501$	$-1287\cdot3=$ $=-3861$	$(1167\cdot2+1017)\times$ $\times\frac{500}{257,6}=6501$

Примечание. См. примечание к рис. П4.2.

Продолж. табл. П4.3

№ п/п.	Вид и место КЗ в защищаемой зоне в режиме	Значения токов КЗ по рис. П4.2, *а*, приведенных к соответствующим сторонам, А, при положении регулятора				
		$I_{СН}$	$I'_{СН}$		$I_{НН}$	
		−РО	+РО	−РО	+РО	−РО
1	КЗ между двумя фазами на выводах низшего напряжения автотрансформатора в режиме 11	$1133\frac{500}{219}=2587$	3168	2587	0	0
2	КЗ между двумя фазами на стороне среднего напряжения автотрансформатора в режиме II 2	0	$-3190\times$ $\times\frac{500}{257,6}=$ $=-6189$	$-3961\times$ $\times\frac{500}{219}=$ $=-9043$	0	0
3	КЗ между двумя фазами на стороне высшего напряжения автотрансформатора в режиме III 2	$3272\frac{500}{219}=7470$	5855	7470	0	0
4	КЗ на землю одной фазы на стороне среднего напряжения автотрансформатора в режиме II 2	0	$(-1424\cdot3)\times$ $\times\frac{500}{257,6}=$ $=-8288$	$(-1723\cdot3)\times$ $\times\frac{500}{219}=$ $=-11\,801$	$\frac{603\cdot500/11}{\sqrt{3}}=$ $=15\,843$	$\frac{615\cdot500/11}{\sqrt{3}}=$ $=16\,158$
5	КЗ на землю одной фазы на стороне высшего напряжения автотрансформатора в режиме III 2	$(1287\cdot2+$ $+1079)\times$ $\times\frac{500}{219}=8340$	6501	8340	$\frac{150\cdot500/11}{\sqrt{3}}=$ $=3941$	$\frac{208\cdot500/11}{\sqrt{3}}=$ $=5465$

Таблица П4.4

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
Ток срабатывания реле на основной стороне, А	$I_{с,\,р,\,осн}=\dfrac{I_{с,\,з}k_{сх}}{K_{IВН}}$	$\dfrac{470\cdot1}{1000/1}=0,47$
Расчетное число витков обмотки ТНН реле для основной стороны	По (2.18) $w_{осн,расч}=\dfrac{F_{с.р}}{I_{с,\,р,\,осн}}$	$\dfrac{100}{0,47}=213$
Принятое число витков обмотки НТТ реле для основной стороны	$w_{осн}$	208
Расчетное число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 220 кВ	По (П4.6) $w_{СН\ расч}=\dfrac{K_{IСН}(U_{ф,\,ном,\,СН}-0,5U_{ф,\,рег})}{K_{IВН}(U_{ф,\,ном,\,ВН}-U_{ф,\,рег})}w_{ВН}$	$\dfrac{2000/1\ (230/\sqrt{3}-16,4)}{1000/1\ (500/\sqrt{3}-16,4\cdot2)}\times$ $\times208=189$
Принятое число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 220 кВ	$w_{СН}$	183
Расчетное число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 10 кВ	По (П4.7) $w_{НН\ расч}=\dfrac{K_{IНН}U_{ном,\,НН}}{K_{IВН}(U_{ф,\,ном,\,ВН}-U_{ф.рег})}\times$ $\times w_{ВН}$	$\dfrac{6000/5\cdot11}{1000/1\ (500/\sqrt{3}-16,4\cdot2)}\times$ $\times208=10,7$
Принятое число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны 10 кВ	$w_{НН}$	10

Таблица П4.5

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
Первичный расчетный ток небаланса с учетом составляющей $I'''_{нб,\,расч}$, А	По (2.3), (2.4), (2.6) $I_{нб,\,расч}=\left(k_{пер}k_{одн}\varepsilon+\left\lvert\dfrac{w_{СН\ расч}-w_{СН}}{w_{СН\ расч}}\right\rvert\right)I_{к\ max}$	$\left(1\cdot1\cdot0,1\right\rvert+\left\lvert\dfrac{189-183}{189}\right\rvert\Big)\times$ $\times4754=623$
Расчетное число витков тормозной обмотки НТТ реле	По (3.4) $w_{торм,\,расч}=k_{отс}\dfrac{I_{нб,расч}w_{раб,расч}}{I_{торм}\,\mathrm{tg}\,\alpha}$	$\dfrac{1,5\cdot623\cdot189}{4754\cdot0,75}=49,5$
Принятое число витков тормозной обмотки НТТ реле	$w_{торм}$	55

2.3.3. Определяется минимальный ток срабатывания защиты в соответствии с п.1.2 настоящего приложения:

по условию отстройки от максимального тока небаланса при КЗ между тремя фазами на стороне низшего напряжения по выражению (2.1)

$$I_{с,з}\geqslant1,5\cdot0,1\cdot1580=237\ \text{А};$$

где 1580А — ток трехфазного КЗ в точке K_2 в режиме 112;

по условию отстройки от броска намагничивающего тока при включении ненагруженного автотрансформатора под напряжение по (2.2).

$$I_{с,з}\geqslant1,5\cdot0,54\cdot580=470\ \text{А}.$$

Минимальный ток срабатывания защиты принимается равным $I_{с,з\,min}=470$ А.

2.3.4. Определяются числа витков рабочей обмотки НТТ реле для основной стороны 500 кВ и для неосновных сторон 220 и 10 кВ в соответствии с п. 2.2.6 настоящего приложения, исходя из значения минимального тока срабатывания защиты $I_{с,з\,min}=$ $=470$ А, полученного в п.2.3.3 настоящего приложения. Расчеты сведены в табл. П4.4. Принимаются следующие числа витков: $w_{осн}=208$ $w_{I}=183$, $w_{II}=$ $=10$.

Таблица П4.6

Вид КЗ в защищаемой зоне и режим работы систем	Коэффициент чувствительности защиты с использованием реле типа		
	РНТ-565	ДЗТ-11/4	ДЗТ-11/4
	с использованием тока в компенсационной обмотке		без использования тока в компенсационной обмотке
КЗ между двумя фазами на выводах низшего напряжения автотрансформатора в режиме I1	3,0	3,0	3,9
КЗ между двумя фазами на стороне среднего напряжения автотрансформатора в режиме II2	4,3	5,9	6,8
КЗ между двумя фазами на стороне высшего напряжения автотрансформатора в режиме III2	4,6	4,0	2,7
КЗ на землю одной фазы на стороне среднего напряжения автотрансформатора в режиме II2	5,9	7,8	8,9
КЗ на землю одной фазы на стороне высшего напряжения автотрансформатора в режиме III2	5,5	4,7	3,3

Примечание. См. примечание 1 к рис. П4.2.

2.3.5. Выбирается необходимое число витков тормозной обмотки НТТ реле в соответствии с п.3.1.6. Для этого рассматривается внешнее КЗ между тремя фазами на стороне среднего напряжения при отключенной системе среднего напряжения и работе одного автотрансформатора (рис. П4.2,*г*). Определяется первичный ток небаланса и необходимое число витков тормозной обмотки. Расчеты сведены в табл. П4.5. Схема включения реле с указанием числа использованных витков рабочих и тормозной обмоток НТТ реле приведена на рис. П4.3,*б*.

2.3.6. Определяется чувствительность защиты при металлических КЗ в защищаемой зоне, когда торможение отсутствует, по (П4.15) и (П4.16) в соответствии с п.1.6 настоящего приложения и по (2.26).

2.3.7. Определяется чувствительность защиты при КЗ в защищаемой зоне, когда имеется торможение, в соответствии с п.1.6 настоящего приложения и п.3.2.10.

Рабочая МДС НТТ реле $F_{раб}$ определяется по выражениям (П4.15) и (П4.16). Тормозная МДС НТТ реле $F_{торм}$ и рабочая МДС срабатывания реле $F_{раб.с.р}$ определяются по методике (см. п. 3.1.8).

Схемы замещения для расчета токов КЗ в расчетных режимах приведены на рис. П4.2,*е* — *к*. Значения токов указаны в табл. П4.3.

Результаты расчетов по пп.2.3.6 и 2.3.7 настоящего приложения сведены в табл. П4.6.

2.4. В целях сравнения чувствительности дифференциальных защит различного исполнения был выполнен также расчет дифференциальной защиты с реле типа ДЗТ-11/4, включенной по обычной схеме, т. е. без использования тока компенсационной обмотки, реагирующей и на ток $I''_{нб}$.

Расчет производился в соответствии с гл. 3 и в настоящем примере не приведен.

В результате расчета были получены следующие параметры защиты:

ток срабатывания защиты, приведенный к стороне высшего напряжения, $I_{с.з}=470$ А;

используемое число витков рабочей обмотки на стороне: высшего напряжения $w_{вн}=208$; среднего напряжения $w_{сн}=183$; низшего напряжения $w_{нн}=10$;

используемое число витков тормозной обмотки, присоединенной к трансформаторам тока, установленным на стороне среднего напряжения, $w_{торм}=105$.

Коэффициенты чувствительности сведены в табл. П4.6.

2.5. Из рассмотрения табл. П4.6 можно сделать следующие выводы:

2.5.1. Дифференциальная защита, выполненная с использованием тока в компенсационной обмотке и реле типа РНТ-566 (см. п.2.2 настоящего приложения), имеет чувствительность примерно на 70 % выше, чем дифференциальная защита обычного выполнения с реле типа ДЗТ-11/4 при КЗ на стороне высшего напряжения и отключенном выключателе на этой стороне (режим III2). При других КЗ чувствительность защиты, выполненной с реле типа РНТ-566, на 20—35 % ниже, чем у защиты обычного выполнения с реле типа ДЗТ-11/4.

2.5.2. Дифференциальная защита, выполненная с использованием тока в компенсационной обмотке и реле типа ДЗТ-11/4 (см. п.2.3 настоящего приложения), имеет чувствительность на 40—50 % выше, чем дифференциальная защита обычного выполнения с реле типа ДЗТ-11/4, при КЗ на стороне высшего напряжения и отключенном выключателе на этой стороне (режим III2). При других КЗ чувствительность этой защиты на 12—20 % ниже, чем у защиты обычного выполнения с реле типа ДЗТ-11/4.

Следует отметить, что реально возможными повреждениями являются только замыкания на землю одной фазы и редко междуфазные КЗ на стороне СН, так как на стороне НН и, как правило, на стороне ВН защита включается на встроенные трансформаторы тока.

2.5.3. Ввиду сложности выполнения и расчета дифференциальной защиты с использованием тока в компенсационной обмотке она может применяться в отдельных случаях, когда указанное необходимо для обеспечения требуемой чувствительности. Следует также отметить, что защита по принципу действия не реагирует на витковые КЗ в регулировочной обмотке.

ПРИЛОЖЕНИЕ П5

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ТИПА ДЗТ-21 (ДЗТ-23)*

1. Дифференциальная токовая защита типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23), разработанная во ВНИИР, обладает высокой чувствительностью, достаточной для отключения повреждений, сопровождающихся токами в защите, меньшими номинальных, что делает применение ее особо целесообразным в первую очередь для защиты мощных, дорогостоящих трансформаторов и автотрансформаторов.

Защита типа ДЗТ-21 предназначена для работы

* Настоящее приложение составлено с использованием материалов канд. техн. наук А. М. Дмитренко и инж. М. Г. Линта (ВНИИР).

при питании от сети постоянного тока напряжением 110 или 220 В или блоков питания с номинальным выходным напряжением выпрямленного тока 110 В. Защита типа ДЗТ-23 предназначена для работы при питании от сети постоянного тока напряжением 220 В и имеет пофазные выходы.

2. Для отстройки от броска намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора (автотрансформатора) под напряжение и от переходных токов небаланса при внешних КЗ в защите серии ДЗТ-20 используется время-импульсный принцип блокирования защиты при появлении в кривой дифференциального тока пауз, длительностью превышающих заданную, в сочетании с торможением от второй гармоники. Для улучшения отстройки от «трансформированных» однополярных бросков намагничивающего тока используется принцип коррекции формы кривой вторичного тока. Для отстройки от установившихся и переходных токов небаланса используется торможение от токов плеч защиты.

Реле обеспечивает торможение от арифметической полусуммы фазных токов двух групп трансформаторов тока. При необходимости иметь торможение от трех или четырех групп трансформаторов тока используются трехфазные приставки дополнительного торможения типа ПТ-1.

Для обеспечения надежности и уменьшения времени действия реле при больших кратностях токов КЗ в защищаемой зоне, когда может наступить насыщение трансформаторов тока (особенно при наличии апериодической слагающей), а во вторичном токе появятся длительные паузы, предусмотрена дифференциальная токовая отсечка.

3. Тормозная характеристика реле (рис. П5.1) состоит из горизонтального и наклонного участков, что улучшает чувствительность защиты к КЗ в защищаемой зоне при прохождении сквозного тока нагрузки.

Минимальный ток срабатывания реле при отсутствии торможения $I_{с,pmin}$ (в пределах горизонтального участка тормозной характеристики) регулируется плавно от 0,3 до 0,7 номинального тока принятого ответвления $I_{отв,ном}$ трансреактора *TAV* реле.

Длина горизонтального участка характеристики $I_{торм,нач,в}$ регулируется ступенчато на два положения (0,6 и 1,0) номинального тока принятого ответвления промежуточных трансформаторов тока *TA* цепи торможения реле и приставок дополнительного торможения.

Коэффициент торможения реле, равный тангенсу угла наклона наклонной части характеристики,

$$k_{торм} = \frac{\Delta I_{д}^{*}}{0{,}5\Delta\Sigma I_{торм,в}^{*}}$$

($\Delta I_{д}^{*}$ — приращение относительного дифференциального тока, а $0{,}5\Delta\Sigma I_{торм,в}^{*}$ — приращение арифметической полусуммы относительных вторичных тормозных токов) регулируется плавно в пределах 0,3—0,9.

4. Защита типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23) выполнена трехфазной в четырехмодульной кассете: три модуля по числу фаз и четвертый общий модуль питания и управления (стабилизатор питания полупроводниковых цепей, выходное промежуточное реле, сигнализация и т. д.).

Принципиальная схема фазного модуля реле дифференциальной защиты МРЗД (рис. П.5,2,*а*) содержит следующие основные узлы: рабочую цепь; упрощенную цепь торможения от второй гармоники; цепь торможения от токов в плечах защиты; реагирующий орган.

Рабочая цепь состоит из трансреактора *TAV* (обмотка w_2), выпрямительного моста на диодах *VD1* — *VD4* и резисторов *R7* — *R9*. Обмоточные данные трансреактора и значения резисторов *R7* — *R9* и *R3* подобраны так, что постоянная времени вторичной цепи

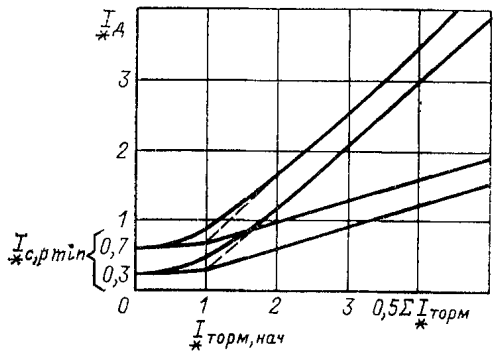


Рис. П5.1. Тормозные характеристики реле типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23).

Примечание. Значения по осям даны в относительных единицах (по отношению к номинальным токам использованных ответвлений реле)

$$I^{*}_{д} = \frac{I_{д}}{I_{ном,отв}}; \quad I^{*}_{торм} = \frac{I_{торм,в}}{I_{ном,отв}}$$

трансреактора τ (совместно с ветвью намагничивания) равна примерно 0,06 периода промышленной частоты. Указанное значение постоянной времени является оптимальным из условия корректирования формы кривой «трансформированных» однополярных токов включения. При таком значении τ апериодическая составляющая тока КЗ в защищаемой зоне поглощается ветвью намагничивания трансреактора практически полностью за время, равное 0,18 периода промышленной частоты. Благодаря этому реле практически не замедляется при синусоидальных токах КЗ с апериодической составляющей.

При больших кратностях токов КЗ в защищаемой зоне, особенно при наличии апериодической составляющей, может наступить насыщение трансформаторов тока защиты. При этом во вторичном токе трансформаторов тока появляются паузы. Для обеспечения надежности и быстродействия реле в этих режимах применена дифференциальная отсечка, выполненная на диоде *VD5*, резисторах *R2*, *R4* и *R5*, конденсаторе *C1* и реле с магнитоуправляемым контактом *KA*. Диод *VD5* препятствует разряду конденсатора *C1* на рабочую цепь во время пауз в токе. Постоянная времени цепи отсечки принята равной примерно 1,5 периода промышленной частоты. При этом приближенно можно полагать, что реле *KA* реагирует на среднее значение напряжения на вторичной обмотке трансреактора. Благодаря этому обеспечивается некоторая отстройка от однополярных бросков намагничивающего тока и переходных токов небаланса, т. е. отсечка не реагирует на импульс тока небаланса в первый период от возникновения КЗ. С помощью накладки *SX2*, выведенной на лицевую сторону панели, может быть получена уставка отсечки 6 $I_{отв,ном}$ (положение *аб*) или $9I_{отв,ном}$ (положение *вб*) трансреактора. Изменение положения накладки *SX2* практически не влияет на процессы в рабочей цепи, так как сумма сопротивлений *R2* и *R5* значительно больше приведенного сопротивления нагрузки вторичной цепи трансреактора.

Для защиты рабочей цепи от ВЧ помех (с частотами более 1000 Гц) параллельно обмотке w_2 трансреактора включен конденсатор *C5* небольшой емкости. Указанный конденсатор практически не оказывает влияния на характеристики защиты в рабочем диапазоне частот.

Цепь торможения от второй гармоники состоит из трансреактора *TAV* (обмотка w_3), резисторов *R3*, *R10*, фильтра второй гармоники *LC2*, выпрямительного моста на диодах *VD10* — *VD13*, сглаживающего конденсатора *C4* и разделительного диода *VD14*.

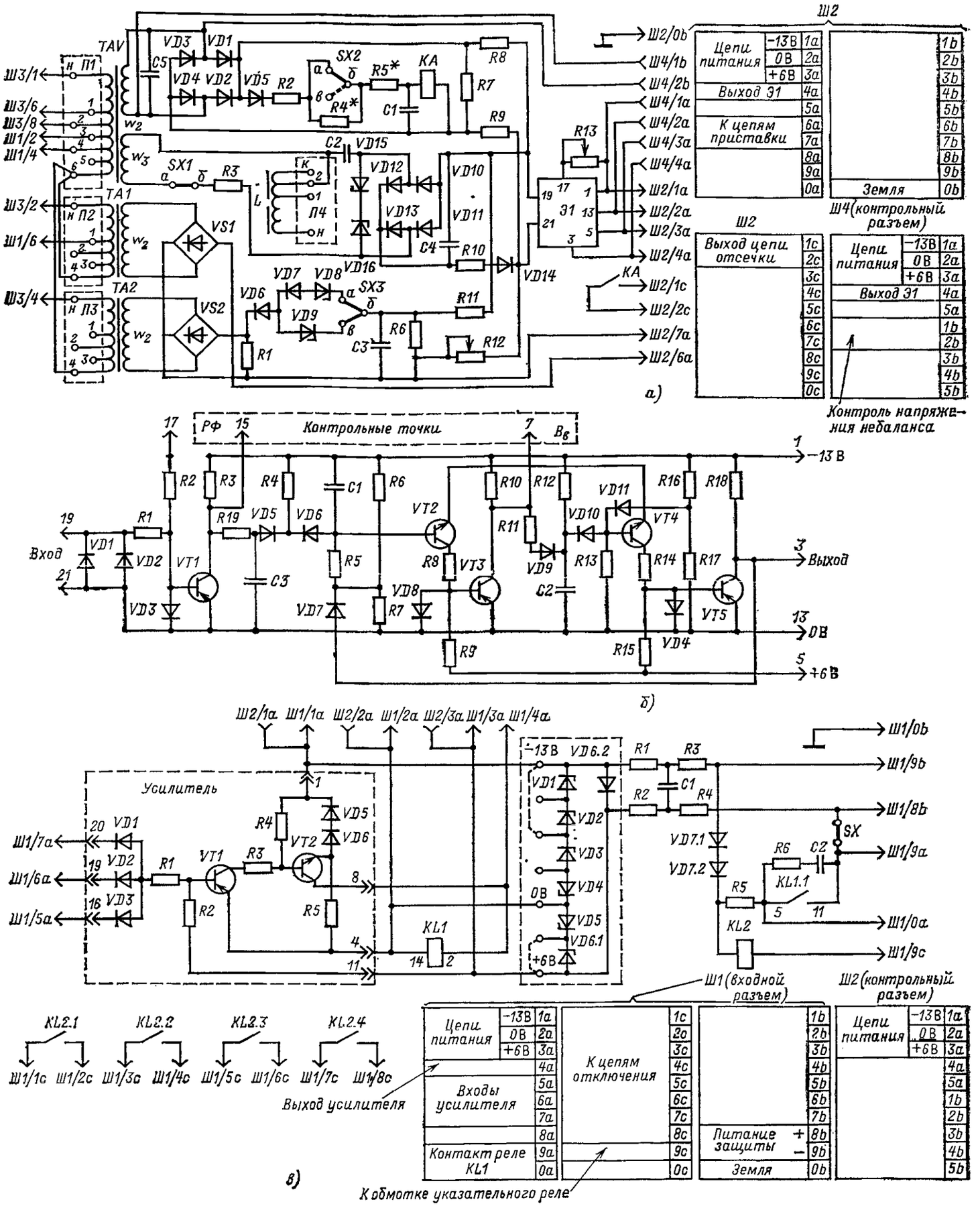


Рис. П5.2. Принципиальная схема дифференциальной защиты типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23):

а — схема фазного модуля защиты; *б* — схема реагирующего органа *Э1* фазного модуля защиты; *в* — схема модуля питания и управления дифференциальной защиты типа ДЗТ-21; *г* — схема модуля питания и управления дифференциальной защиты типа ДЗТ-23; *д* — схема приставки дополнительного торможения; *е* — схема автотрансформатора тока.

Примечание. Резисторы *R4* и *R5* в схеме рис. П5.2,*а* (отмечены звездочкой) подбираются при регулировании

Стабилитроны *VD15*, *VD16* применены для ограничения тормозного сигнала на уровне, соответствующем периодическому броску намагничивающего тока с амплитудой $2I_{отв,ном}$. В качестве тормозного сигнала используется выпрямленный ток плеча фильтра, содержащего конденсатор *C2*. Добротность фильтра равна примерно 2,3. При этом обеспечивается отстройка от периодического броска намагничивающего тока, имеющего длительность пауз не менее 4,5 мс и относительное содержание второй гармоники не менее 40 %.

Цепь торможения от токов в плечах защиты состоит из промежуточных трансформаторов тока *TA1* и *TA2*, выпрямительных мостов *VS1*, *VS2*, диодов *VD6*, *DV7*, стабилитронов *VD8*, *VD9*, сглаживающего конденсатора *C3* и резисторов *R1*, *R6*, *R11* и *R12*. Для подключения одной или двух приставок дополнительного торможения предусмотрены выводы *Ш2/6а* и *Ш2/7а*. Благодаря включению стабилитронов *VD9* или *VD8* в начальной части тормозных характеристик имеется горизонтальный участок. С помощью накладки *SX3* устанавливается длина горизонтального участка тормозной характеристики $0{,}6\,I_{отв,ном}$ и $1{,}0\,I_{отв,ном}$. Регулировка коэффициента торможения $k_{торм}$ производится с помощью переменного резистора *R12*.

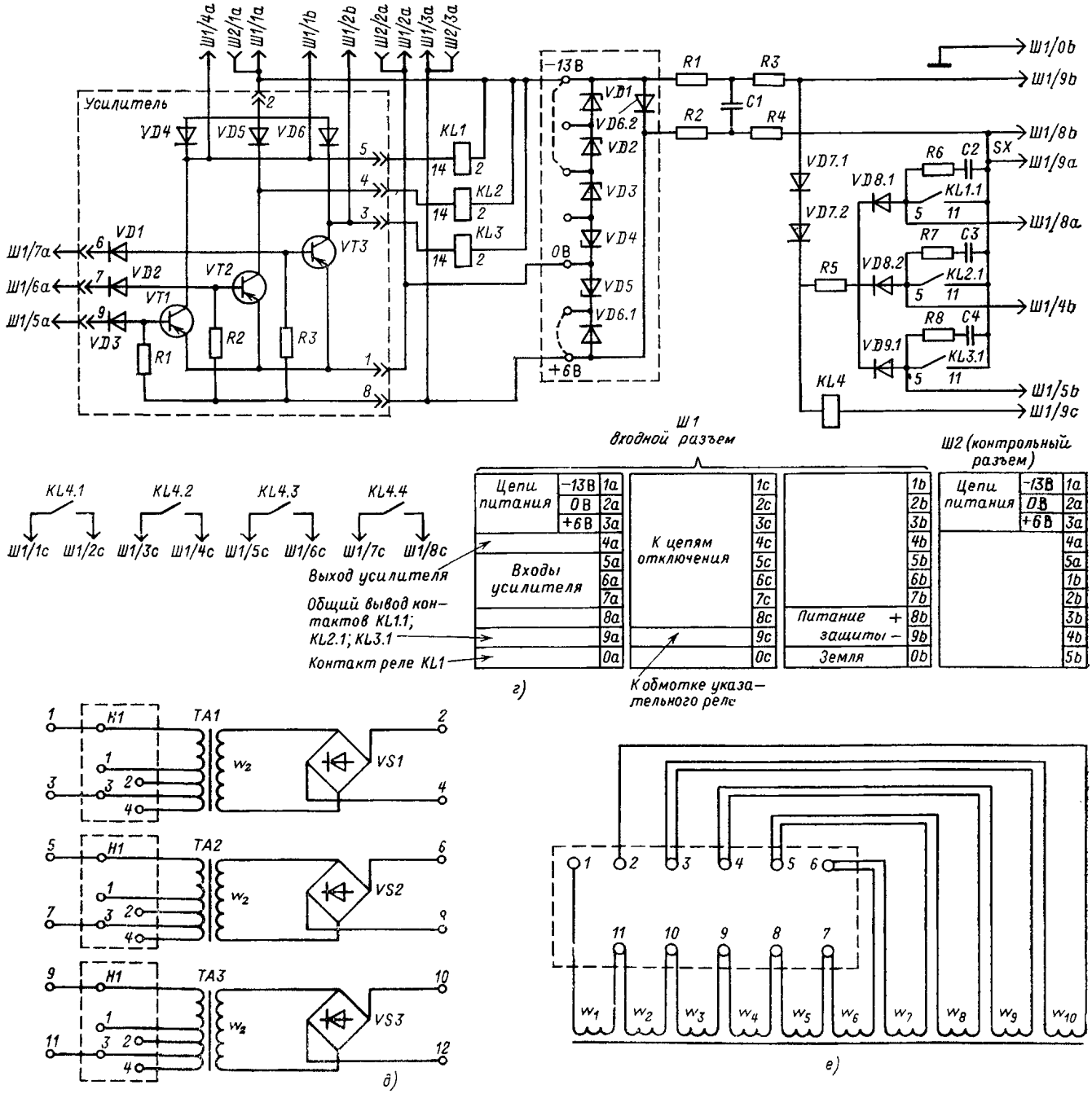


Рис. П5.2. *Продолжение*

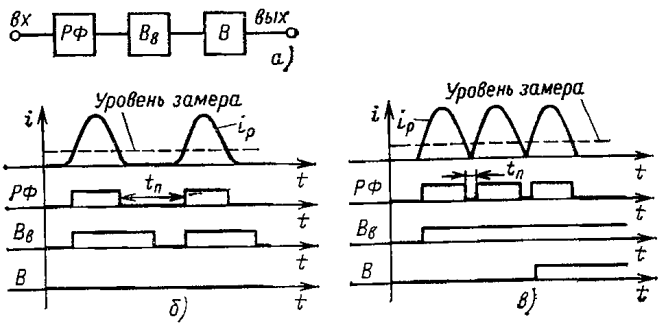


Рис. П5.3. Структурная схема и временные диаграммы работы реагирующего органа:

а — структурная схема; *б* — действие реагирующего органа при броске намагничивающего тока; *в* — то же при КЗ в зоне

Принципиальная схема приставки дополнительного торможения приведена на рис. П5.2,*д*.

Принципиальная схема реагирующего органа приведена на рис. П5.2,*б*. Структурная схема и временные диаграммы работы реагирующего органа приведены на рис. П5.3. Реагирующий орган состоит из релейного формирователя прямоугольных импульсов *РФ*, элемента выдержки времени на возврат $B_в$ и элемента выдержки времени *В*. При однополярном броске намагничивающего тока (рис. П5.3,*б*) длительность пауз на выходе *РФ*, замеряемая на заданном уровне, больше выдержки времени на возврат элемента $B_в$ и на выходе последнего имеются паузы с периодом следования, равным периоду промышленной частоты; элемент *В*, имеющий установку более периода промышленной частоты, не срабатывает. При синусоидальном токе на входе реле, превышающем уставку (рис. П5.3,*в*), длительность пауз на выходе *РФ* становится меньше выдержки времени на возврат элемента $B_в$, на выходе последнего появляется сплошной сигнал и элемент *В* срабатывает.

Уставка элемента $B_в$ находится в пределах 4,5 — 5 мс, уставка элемента *В* — 21—23,5 мс. Релейный формирователь *РФ* выполнен по схеме усилителя-ограничителя на транзисторе *VT1* (см. рис. П5.2,*б*). Регулировка тока срабатывания релейного формирователя РФ, а следовательно, и минимального тока срабатывания реле в целом производится с помощью переменного резистора *R13*. Элемент выдержки времени на возврат $B_в$ выполнен по мостовой схеме и включает в себя зарядную цепь *R5* — *C1* и пороговый орган, выполненный на транзисторах *VT2*, *VT3* и делителе напряжения *R6*, *R7*. Элемент выдержки времени включает в себя зарядную цепь *R12* — *C2* и пороговый орган, выполненный на транзисторах *VT4*, *VT5* и делителе напряжения *R16*, *R17*. Положительная обратная связь в реагирующем органе осуществляется путем подключения диода *VD7* между выходом реагирующего органа и средней точкой делителя, выполненного на резисторах *R6*, *R7*. К этой же точке подключено зарядное сопротивление *R5* элемента $B_в$. Конденсатор *C3* используется для создания небольшой задержки срабатывания *РФ* (примерно 0,4 мс) с целью повышения помехоустойчивости защиты при появлении продольной высокочастотной помехи.

Схема модуля питания и управления МПУ защиты типа ДЗТ-21 (см. рис. П5.2,*в*) содержит параметрический стабилизатор питания, выполненный на стабилитронах *VD4*, *VD5* и резисторах *R1* — *R4*. Стабилитроны *VD1* — *VD3* и диод *VD6.1* служат для некоторой компенсации разброса напряжений стабилизации стабилитронов *VD4* и *VD5* соответственно. Перемычки, показанные пунктиром, устанавливаются в зависимости от напряжения стабилитронов при заводской калибровке модуля. Номинальные напряжения питания полупроводниковых цепей приняты — 13 В и +6 В.

Диод *VD6.2* служит для защиты стабилитронов *VD1* — *VD3* при подаче на модуль напряжения обратной полярности. Конденсатор *C1* служит для предотвращения влияния помех по цепям питания на реагирующие органы реле.

Усилитель, выполненный на транзисторах *VT1* — *VT2*, имеет на выходе схему ИЛИ на диодах *VD1* — *VD3* и служит для связи выходов реагирующих органов реле каждой из фаз с промежуточным реле на герконе *KL1*. Контакт реле *KL1* находится в цепи катушки выходного промежуточного реле *KL2*. Искрогасящий контур *R6* и *C2* и диоды *VD7.1* и *VD7.2* служат для улучшения условий коммутации герметизированного контакта.

В схеме модуля предусмотрен вывод *Ш1/9с*, позволяющий подключать последовательно с обмоткой реле *KL2* указательное реле типа РУ-21, и вывод *Ш1/0а*, позволяющий подключать дополнительное промежуточное реле. При номинальном напряжении 220 В должно использоваться указательное реле типа РУ-21/0,015, а при номинальном напряжении 110 В — РУ-21/0,025. Потребляемая мощность дополнительного промежуточного реле должна быть не более 8 Вт. Накладка *SX* позволяет снимать напряжение питания с промежуточного реле *KL2*.

Схема модуля питания и управления защиты типа ДЗТ-23 (см. рис. П5.2,*г*) содержит параметрический стабилизатор питания такой же, как в схеме защиты типа ДЗТ-21. Схема модуля содержит три усилителя на транзисторах *VT1* — *VT3*, которые через диоды *VD3* — *VD1* соответственно связаны с выходами реагирующих органов реле каждой фазы и воздействуют на промежуточные реле на герконе *KL1* — *KL3*.

Контакты реле *KL1.1* — *KL3.1* через диоды *VD8.1*, *VD8.2*, *VD9.1* соответственно воздействуют на выходное промежуточное реле *KL4*. Искрогасящие контуры *R6* — *C2*, *R7* — *C3*, *R8* — *C4* и диоды *VD7.1* и *VD7.2* служат для улучшения условий коммутации герметизированных контактов. В схеме модуля предусмотрен вывод *Ш1/9с* для подключения последовательно с обмоткой реле *KL4* указательного реле типа РУ-21 и выводы *Ш1/8а*, *Ш1/4в*, *Ш1/5в* для подключения внешних промежуточных реле. Накладка *SX* позволяет снимать напряжение питания с промежуточного реле *KL4*.

5. Реле выполнено на вторичный номинальный ток 5 А; подключение к трансформаторам тока с вторичным током 1 А производится через автотрансформаторы тока типа АТ-31. Для подключения плеч защиты с номинальным вторичным током больше 5 А используются автотрансформаторы тока типа АТ-32. Поскольку на первичной обмотке трансреактора *TAV* рабочей цепи имеется всего шесть ответвлений, а на первичной обмотке трансформаторов тока *TA1* и *TA2* тормозной цепи — четыре ответвления на токи от 2,5 до 5 А (табл. П5.1, П5.2), автотрансформаторы тока типов АТ-31 и АТ-32 могут использоваться также для выравнивания вторичных токов в плечах защиты

Таблица П5.1

Номер ответвления трансреактора *TAV* рабочей цепи	1	2	3	4	5	6
$I_{отв. ном}$, *А*	5	4,6	4,25	3,63	3,0	2,5

Таблица П5.2

Номер ответвления трансформаторов тока *TA1* и *TA2* тормозной цепи	1	2	3	4
$I_{отв. ном}$, *А*	5	3,75	3,0	2,5

Таблица П5.3

Номинальный ток рассматриваемого включения, А	1	0,34	0,37	0,4	0,41	0,43	0,44	0,48	0,49
Номера используемых ответвлений автотрансформатора тока типа АТ-31, к которым подводятся вторичные токи в плечах защиты	2	1—2	1—2	1—2	1—2	1—2	1—3	1—2	1—2
Максимальный допустимый ток включения, А	3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,32	1,2	1,2
Номера используемых ответвлений автотрансформатора тока, к которым подключается реле	4	1—11	1—10	1—9	1—11	1—8	1—11	1—9	1—11
Номинальный ток используемого ответвления реле, А	5	2,5	2,5	2,5	3	2,5	2,5	3	3,63

1	0,52	0,53	0,54	0,56	0,58	0,58	0,6	0,63	0,63	0,64	0,65	0,68	0,7	0,71
2	1—2	1—3	1—2	1—3	1—3	1—2	1—4	1—2	1—3	1—3	1—4	1—2	1—2	1—4
3	1,2	1,32	1,2	1,32	1,32	1,2	1,8	1,2	1,32	1,32	1,8	1,2	1,2	1,8
4	1—8	1—11	1—10	1—8	1—10	1—9	1—11	1—8	1—9	1—11	1—10	1—11	1—7	1—9
5	3	3,63	3	2,5	3	3,63	2,5	3,63	3	3,63	2,5	5	3	2,5

1	0,72	0,74	0,74	0,74	0,75	0,76	0,76	0,78	0,8	0,81	0,82	0,82	0,85	0,87
2	1—4	1—2	1—2	1—2	1—3	1—4	1—2	1—4	1—2	1—5	1—3	1—3	1—4	1—4
3	1,8	1,2	1,2	1,2	1,32	1,8	1,2	1,8	1,2	2,43	1,32	1,32	1,8	1,8
4	1—11	1—8	1—10	1—9	1—11	1—8	1—6	1—10	1—9	1—11	1—10	1—11	1—9	1—11
5	3	4,25	5	4,6	4,25	2,5	2,5	3	5	2,5	4,25	4,6	3	3,63

1	0,88	0,89	0,89	0,92	0,95	0,97	0,97	1,03	1,06	1,1	1,11	1,12	1,2	1,22
2	1—5	1—3	1—3	1—3	1—4	1—3	1—5	1—5	1—5	1—6	1—4	1—6	1—6	1—4
3	2,43	1,32	1,32	1,32	1,8	1,32	2,43	2,43	2,43	3,3	1,8	3,3	3,3	1,8
4	1—10	1—10	1—11	1—7	1—10	1—10	1—11	1—8	1—10	1—11	1—8	1—11	1—10	1—11
5	2,5	4,6	5	3	3,63	5	3	2,5	3	2,5	3,63	2,5	2,5	5

1	1,23	1,24	1,26	1,28	1,29	1,3	1,34	1,38	1,39	1,45	1,49	1,50	1,5	1,56
2	1—5	1—4	1—2	1—5	1—4	1—6	1—6	1—5	1—6	1—7	1—5	1—5	1—5	1,6
3	2,43	1,8	1,2	2,43	1,8	3,3	3,3	2,43	3,3	4,35	2,43	2,43	2,43	3,3
4	1—8	1—7	1—5	1—10	1—8	1—9	1—11	1—11	1—8	1—11	1—11	1—10	1—8	1—9
5	3	3	2,5	3,63	4,25	2,5	3	4,25	2,5	2,5	4,6	2,5	3,63	3

1	1,58	1,62	1,62	1,71	1,74	1,75	1,76	1,84	1,89	1,97	2,02	2,04	2,05
2	1—7	1—5	1—5	1—7	1—6	1—5	1—5	1—7	1—6	1—8	1—6	1—6	1—7
3	4,35	2,43	2,43	4,35	3,3	2,43	2,43	4,35	3,3	5,91	3,3	3,3	4,35
4	1—10	1—10	1—11	1—9	1—10	1—8	1—9	1—8	1—9	1—11	1—11	1—10	1—9
5	2,5	4,6	5	2,5	3,63	4,25	4,6	2,5	3,63	2,5	4,6	4,5	3

1	2,1	2,14	2,21	2,21	2,21	2,21	2,28	2,31	2,32	2,36	2,39	2,49	2,57	2,66
2	1—7	1—8	1—6	1—6	1—7	1—6	1—6	1—9	1—8	1—8	1—6	1—7	1—8	1—7
3	4,35	5,91	3,3	3,3	4,35	3,3	3,3	7,5	5,91	5,91	3,3	4,35	5,91	4,35
4	1—11	1—10	1—9	1—10	1—8	1—11	1—7	1—10	1—9	1—11	1—9	1—9	1—10	1—11
5	3,63	2,5	4,25	4,6	3	5	3	2,5	2,5	3	4,6	3,63	3	4,6

1	2,68	2,75	2,77	2,77	2,78	2,8	2,84	2,9	2,9	3,07	3,12	3,14	3,15	3,16
2	1—7	1—10	1—7	1—9	1—8	1—6	1—8	1—7	1—7	1—9	1—8	1—7	1—7	1—7
3	4,35	7,5	4,35	7,5	5,91	3,3	5,91	4,35	4,35	7,5	5,91	4,35	4,35	4,35
4	1—10	1—11	1—8	1—10	1—9	1—8	1—11	1—10	1—11	1—11	1—10	1—8	1—9	1—10
5	4,25	3	3,63	3	3	5	3,63	4,6	5	3,63	3,63	4,25	4,6	5

1	3,33	3,35	3,38	3,6	3,64	3,89	3,92	3,94	3,94	3,95	4,25	4,27	4,29
2	1—10	1—9	1—8	1—9	1—8	1—10	1—9	1—8	1—8	1—8	1—9	1—8	1—8
3	7,5	7,5	5,91	7,5	5,91	7,5	7,5	5,91	5,91	5,91	7,5	5,91	5,91
4	1—11	1—10	1—9	1—11	1—10	1—11	1—10	1—10	1—11	1—9	1—10	1—9	1—10
5	3,63	3,63	3,63	4,25	4,25	4,25	4,25	4,6	5	4,25	4,6	4,6	5

Примечание. Максимальный допустимый ток включения, определяемый термической стойкостью обмоток автотрансформаторов тока (при возможной 40 %-ной перегрузке защищаемого трансформатора или автотрансформатора).

Таблица П5.4

Номинальный ток рассматриваемого включения, А	1	5,06	5,13	5,15	5,18	5,2	5,31	5,31	5,31
Номера используемых ответвлений автотрансформатора тока типа АТ-32, к которым подводятся вторичные токи, в плечах защиты	2	1—5	1—10	1—8	1—7	1—9	1—10	1—11	1—6
Максимальный допустимый ток включения, А	3	10	20	15	15	15	12,5	12,5	10
Номера используемых ответвлений автотрансформатора тока, к которым подключается реле	4	1—3	1—7	1—5	1—4	1—6	1—9	1—10	1—3
Номинальный ток используемого ответвления реле, А	5	3,63	2,5	2,5	2,5	2,5	4,25	4,25	3

1	5,39	5,39	5,41	5,41	5,44	5,47	5,5	5,61	5,75	5,75	5,77	5,81	5,84	5,84
2	1—6	1—7	1—4	1—4	1—3	1—5	1—5	1—7	1—10	1—11	1—6	1—10	1—6	1—7
3	10	12,7	10	10	10	10	10	15	12,5	12,5	15	16	10	12,7
4	1—5	1—6	1—2	1—3	1—2	1—4	1—2	1—3	1—9	1—10	1—2	1—8	1—5	1—6
5	4,25	4,25	4,6	5	5	4,25	3,63	2,5	4,6	4,6	3	3,63	4,6	4,6
1	5,84	5,88	5,89	5,89	5,9	5,93	5,93	5,93	5,95	6,0	6,1	6,15	6,19	6,22
2	1—7	1—4	1—8	1—9	1—8	1—5	1—5	1—6	1—9	1—11	1—7	1—10	1—8	1—7
3	15	10	12,8	12,8	15	10	10	10	15	20	15	20	15	15
4	1—5	1—2	1—7	1—8	1—6	1—3	1—4	1—4	1—7	1—8	1—2	1—7	1—5	1—4
5	3,63	5	4,6	4,6	3,63	4,25	4,6	3,63	3,63	3	2,5	3	3	3
1	6,25	6,25	6,35	6,35	6,4	6,4	6,41	6,42	6,44	6,44	6,5	6,6	6,64	6,74
2	1—9	1—10	1—6	1—7	1—8	1—9	1—5	1—6	1—5	1—5	1—10	1—9	1—11	1—7
3	15	12,5	10	12,7	12,8	12,8	10	10	10	10	20	15	15,6	15
4	1—6	1—9	1—5	1—6	1—7	1—8	1—3	1—3	1—2	1—4	1—6	1—5	1—9	1—3
5	3	5	5	5	5	5	4,6	3,63	4,25	5	2,5	2,5	4,25	3
1	6,8	6,84	6,88	6,94	6,98	6,98	6,99	7,17	7,18	7,26	7,32	7,36	7,41	7,44
2	1—10	1—7	1—8	1—6	1—9	1—5	1—6	1—8	1—11	1—11	1—7	1—10	1—7	1—10
3	16	15	15	10	15	10	10	15	15,6	20	15	16	15	20
4	1—8	1—5	1—6	1—4	1—7	1—3	1—2	1—3	1—9	1—8	1—2	1—8	1—5	1—7
5	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	5	3,63	2,5	4,6	3,63	3	4,6	4,6	3,63
1	7,48	7,49	7,51	7,52	7,55	7,55	7,69	7,82	7,82	7,92	7,97	8,0	8,05	8,13
2	1—8	1—8	1—6	1—7	1—9	1—9	1—11	1—8	1—10	1—9	1—8	1—10	1—7	1—8
3	15	15	15	15	15	15	20	15	20	15	15	16	15	15
4	1—6	1—5	1—4	1—4	1—7	1—6	1—7	1—2	1—6	1—5	1—4	1—8	1—5	1—6
5	4,6	3,63	3,63	3,63	4,6	3,63	3	2,5	3	3	3	5	5	5
1	8,14	8,2	8,25	8,5	8,5	8,63	8,71	8,76	8,81	8,84	8,25	8,85	9,2	9,2
2	1—7	1—9	1—10	1—11	1—9	1—8	1—10	1—8	1—7	1—9	1—6	1—7	1—9	1—11
3	15	15	20	20	15	15	20	15	15	15	10	15	15	20
4	1—3	1—7	1—5	1—8	1—4	1—3	1—7	1—5	1—4	1—6	1—3	1—2	1—3	1—8
5	3,63	5	2,5	4,25	2,5	3	4,25	4,25	4,25	4,25	5	3,63	2,5	4,6
1	9,3	9,38	9,44	9,44	9,49	9,53	9,55	9,57	9,57	9,61	9,64	9,75	9,9	10,0
2	1—11	1—8	1—10	1—10	1—8	1—7	1—7	1—9	1—9	1—6	1—8	1—11	1—10	1—9
3	20	15	20	20	15	15	15	15	15	10	15	20	20	15
4	1—7	1—2	1—7	1—6	1—5	1—3	1—4	1—6	1—5	1—2	1—4	1—6	1—5	1—2
5	3,63	3	4,6	3,63	4,6	4,25	4,6	4,6	3,63	5	3,63	3	3	2,5
1	10,2	10,25	10,3	10,32	10,38	10,39	10,4	10,41	10,62	10,92	11,05	11,05	11,2	11,3
2	1—9	1—10	1—11	1—7	1—7	1—11	1—9	1—8	1—10	1—11	1—10	1—9	1—7	1—8
3	15	20	20	15	15	20	15	15	20	20	20	15	15	15
4	1—4	1—7	1—5	1—3	1—4	1—5	1—6	1—3	1—4	1—7	1—6	1—3	1—3	1—4
5	3	5	2,5	4,6	5	2,5	5	3,63	2,5	4,25	4,25	3	5	4,25
1	11,4	11,5	11,8	11,85	11,95	12,05	12,12	12,2	12,2	12,2	12,35	12,38	12,5	12,75
2	1—8	1—10	1—11	1—11	1—10	1—10	1—9	1—7	1—8	1—8	1—9	1—11	1—10	1—10
3	15	20	20	20	20	20	15	15	15	15	15	20	20	20
4	1—2	1—3	1—7	1—6	1—6	1—5	1—5	1—2	1—3	1—4	1—4	1—5	1—2	1—4
5	3,63	2,5	4,6	3,65	4,6	3,63	4,6	5	4,25	4,6	3,63	3	2,5	3
1	12,8	13	13,2	13,3	13,35	13,7	13,8	14,01	14,4	14,51	15,0	15,2	15,42	15,65
2	1—11	1—10	1—9	1—11	1—9	1—11	1—10	1—10	1—11	1—9	1—10	1—10	1—10	1—9
3	20	20	15	20	15	20	20	20	20	15	20	20	20	15
4	1—7	1—6	1—5	1—4	1—3	1—6	1—3	1—5	1—3	1—2	1—2	1—5	1—4	1—3
5	5	5	5	2,5	3,63	4,25	3	4,25	2,5	3,63	3	4,6	3,63	4,25
1	15,65	15,95	16,25	16,5	16,7	16,9	17,0	17	17,25	17,51	18,05	18,15	18,4	18,4
2	1—11	1—11	1—11	1—10	1—10	1—9	1—9	1—9	1—11	1—11	1—10	1—10	1—9	1—9
3	20	20	20	20	20	15	15	15	20	20	20	20	15	15
4	1—2	1—4	1—6	1—5	1—3	1—3	1—2	1—4	1—3	1—5	1—4	1—2	1—2	1—3
5	2,5	3	5	5	3,63	4,6	4,25	5	3	4,25	4,25	3,63	4,6	5

Продолжение табл. П5.4

1	18,75	18,95	19,25	19,52	19,55	20,0	20,6	20,9	21,2	21,2	21,25
2	I—11	I—11	I—11	I—10	I—10	I—9	I—11	I—11	I—10	I—10	I—10
3	20	20	20	20	20	15	20	20	20	20	20
4	I—2	I—5	I—4	I—3	I—4	I—2	I—5	I—3	I—3	I—4	I—2
5	3	4,6	3,63	4,25	4,6	5	5	3,63	4,6	5	4,25

1	22,6	22,7	23	24,4	24,6	25,0	26,6	28,8	28,8	31,3
2	I—11	I—11	I—10	I—11	I—11	I—10	I—11	I—11	I—11	I—11
3	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
4	I—4	I—2	I—2	I—4	I—3	I—2	I—2	I—3	I—2	I—2
5	4,25	3,63	4,6	4,6	4,25	5	4,25	5	4,6	5

Примечание. См. примечание к табл. П5.3.

(табл. П5.3 для автотрансформатора типа АТ-31 и табл. П5.4 для автотрансформатора типа АТ-32).

Автотрансформаторы выполнены однофазными и поставляются комплектно с реле (не более 15 шт.). Принципиальная схема автотрансформаторов тока типов АТ-31 и АТ-32 приведена на рис. П5.2,*е*.

6. Время срабатывания защиты при токе, равном $2I_{с.з}$, и отсутствии торможения не более 0,033 с без выходного реле и 0,045 с с выходным реле. Контакты выходного реле *KL2* на рис. П5.2,*в* и *KL4* на рис. П5.2,*г* имеют мощность 50 Вт. Потребляемая мощность в цепи переменного тока при номинальном токе 2 В·А (без автотрансформатора) и 5 В·А (с автотрансформатором).

Каждая фаза защиты типа ДЗТ-23 имеет на выходе реле на герконе (*KL1* — *KL3*, рис. П5.2,*г*), контакт которого допускает коммутацию активно-индуктивной цепи мощностью не более 8 Вт при номинальном напряжении 220 В постоянного тока.

ПРИЛОЖЕНИЕ П6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И ВЫВОД ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КЗ ЗА ЛИНЕЙНЫМ РЕГУЛИРОВОЧНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

Принципиальная схема включения, а также схема соединения обмоток и расчетная схема замещения прямой (обратной) последовательности линейного регулировочного трансформатора приведены на рис. П6.1.

Метод расчета токов КЗ за линейным регулировочным трансформатором (в точке *К* рис. П6.1,*а*), состоящим из двух элементов, базируется на принципе замены регулировочного трансформатора эквивалентным трансформатором.

Исходя из расчетных схем по рис. П6.1,*в* и *г*, можно составить следующие выражения, связывающие токи и напряжения сторон *I* и *II*, в которых верхний знак соот-

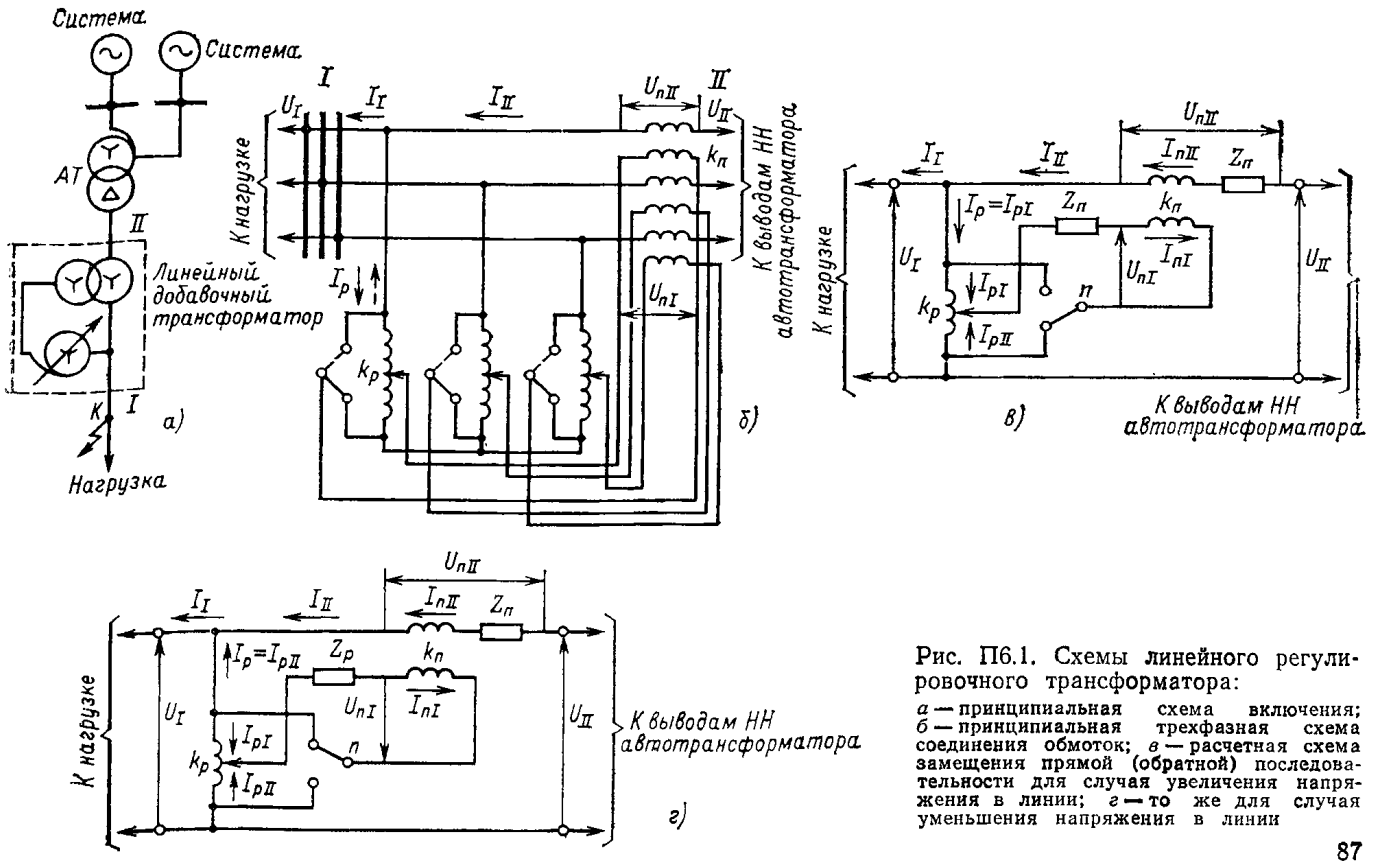


Рис. П6.1. Схемы линейного регулировочного трансформатора:

а — принципиальная схема включения; *б* — принципиальная трехфазная схема соединения обмоток; *в* — расчетная схема замещения прямой (обратной) последовательности для случая увеличения напряжения в линии; *г* — то же для случая уменьшения напряжения в линии

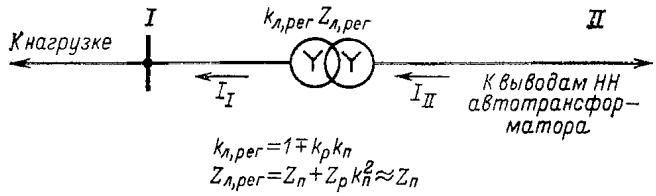


Рис. П6.2. Эквивалентная схема линейного регулировочного трансформатора

ветствует положению переключающего устройства, когда напряжения трансформатора и сети складываются, а нижний знак — положению переключающего устройства, когда напряжения трансформатора и сети вычитаются,

$$I_I=I_{II}\mp I_р=I_{II}\mp k_р k_п I_{II}=(1\mp k_р k_п)I_{II}; \quad (П6.1)$$

$$U_I=U_{II}-I_{II}Z_п\pm U_{пI}k_п; \quad (П6.2)$$

$$U_{пI}=U_I k_р\mp I_{пI}Z_р=U_I k_р\mp I_{II}Z_р k_п. \quad (П.6.3)$$

Из (П6.2) и (П6.3) следует

$$(1\mp k_р k_п)U_I=U_{II}-I_{II}(Z_п+Z_р k_п^2). \quad (П6.4)$$

На основании (П6.1) и (П6.4) линейный регулировочный трансформатор можно рассматривать как эквивалентный трансформатор по рис. П6.2 с коэффициентом трансформации $k_{л,рег}$, и сопротивлением $Z_{л\ рег}$, выраженным в омах и приведенным к напряжению стороны *II*, соответственно равными

$$k_{л,рег}=1\mp k_р k_п; \quad (П6.5)$$

$$Z_{л,рег}=Z_п+Z_р k_п^2. \quad (П6.6)$$

В соответствии с рис. П6.1,*в* и *г* коэффициент трансформации регулировочного автотрансформатора

$$k_р=\frac{\sqrt{3}U_{пIх,\ отв}}{U_{I\ ном}}, \quad (П6.7)$$

а коэффициент трансформации последовательного трансформатора

$$k_п=\frac{U_{пII\ х,\ отв}}{U_{пI\ х,\ отв}}, \quad (П6.8)$$

где $U_{пIх,отв}$; $U_{пIIх,отв}$—фазные напряжения холостого хода последовательного трансформатора соответственно для первичной и вторичной его обмоток при работе регулировочного автотрансформатора на рассматриваемом ответвлении; $U_{Iном}$—номинальное линейное напряжение линейного регулировочного трансформатора.

Поскольку коэффициент трансформации последовательного трансформатора $k_п$ не зависит от положения переключающего устройства регулировочного автотрансформатора, он может быть определен при работе последнего на крайнем ответвлении, когда $U_{пIх,отв}=U_{Iном}$ (см. рис. П6.1,*в*),

$$k_п=\frac{U_{л,\ доб,\ р}}{U_{I\ ном}}, \quad (П6.9)$$

где $U_{л,доб,кр}$ — значение линейного добавочного напряжения при работе регулировочного автотрансформатора на крайнем ответвлении.

Учитывая, что рассматриваемый линейный регулировочный трансформатор используется в системе с малым током замыкания на землю, эквивалентный трансформатор по рис. П6.2 принимается с соединением обмоток У/У.

В заводских материалах обычно задаются следующие параметры линейных регулировочных трансформаторов для каждого ответвления:

$I_{л,рег,ном}$ — номинальный ток в линии (во вторичной обмотке последовательного трансформатора I_{II} на рис. П6.1), А;

$U_{л,доб}$—линейное добавочное напряжение, В;

$u_{к,р}$ — напряжение КЗ регулировочного автотрансформатора, %;

$u_{к,п}$—напряжение КЗ последовательного трансформатора, %;

$u_{к,л,рег}$ — напряжение КЗ линейного регулировочного трансформатора в целом, %

Исходя из этих значений, можно вычислить коэффициент трансформации и общее сопротивление линейного регулировочного трансформатора при работе на данном ответвлении.

Коэффициент трансформации $k_{л,рег}$ в соответствии с (П6.5), (П6.7)—(П6.9)

$$k_{л,\ рег}=1\mp\frac{\sqrt{3}U_{пI\ х,\ отв}}{U_{I\ ном}}\frac{U_{пII\ х,\ отв}}{U_{пI\ х,\ отв}}=$$

$$=1\mp\frac{U_{л,\ доб}}{U_{I\ ном}}. \quad (П6.10)$$

Сопротивление линейного регулировочного трансформатора $Z_{л\ рег}$, Ом, приведенное к выводам НН автотрансформатора, в соответствии с (П6.6)

$$Z_{л,\ рег}=\frac{u_{к,\ п}U^2_{л,\ доб}}{100S_{л,\ рег}}+\frac{u_{к,\ р}3U^2_{пI\ х,\ отв}k_п^2}{100S_{л,\ рег}}=$$

$$=\frac{(u_{к,\ п}+u_{к,\ р})\,U^2_{л,\ доб}}{100S_{л,\ рег}}\approx\frac{u_{к,\ л,\ рег}U^2_{л,\ доб}}{100S_{л,\ рег}}, \quad (П6.11)$$

где $S_{л,рег}$ — мощность линейного регулировочного трансформатора при работе на рассматриваемом ответвлении, В·А; может быть определена по выражению

$$S_{л,\ рег}=\sqrt{3}U_{л,\ доб}I_{л,\ рег,\ ном}. \quad (П6.12)$$

Из (П6.11) и (П6.12) для сопротивления линейного регулировочного трансформатора окончательно можно получить:

$$Z_{л,\ рег}=\frac{u_{к,\ л,\ рег}U_{л,\ доб}}{\sqrt{3}\cdot 100I_{л,\ рег,\ ном}}. \quad (П6.13)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ П7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРАБАТЫВАНИЯ ВТОРОЙ СТУПЕНИ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ МНОГОФАЗНЫХ КЗ

Первичное сопротивление срабатывания второй ступени защиты $Z^{II}_{с,з,ат}$ выбирается по условию отстройки от вектора сопротивления нагрузки в месте установки защиты в расчетных условиях $Z_{нагр,расч}$ и может быть выражено через радиус R и смещение первичной характеристики срабатывания (рис. П7.1)

$$Z^{II}_{с,з,ат}=2R+a2R=2R(1+a). \quad (П7.1)$$

Значение смещения принято отрицательным при смещении характеристики срабатывания в третий квадрант и положительным — при смещении ее в первый квадрант.

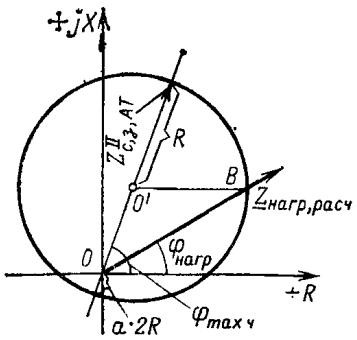


Рис. П7.1. Определение радиуса характеристики срабатывания второй ступени дистанционной защиты автотрансформатора

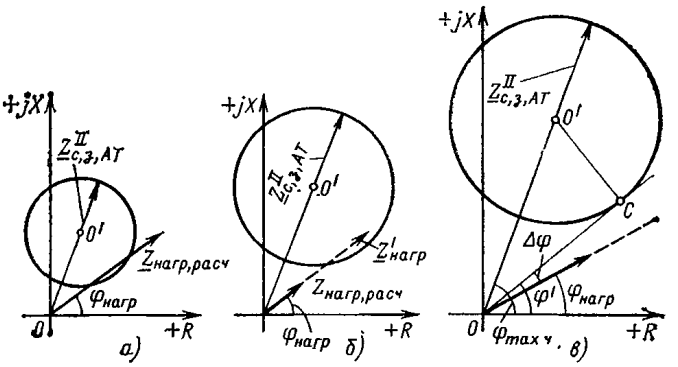


Рис. П7.2. Характеристики срабатывания второй ступени дистанционной защиты автотрансформатора при значительном смещении в первый квадрант:

а — характеристика, соответствующая знаку «—» перед квадратным корнем в (П7.7); *б* — характеристика, соответствующая знаку «+» перед квадратным корнем в (П7.7), отстроенная от сопротивлений нагрузки в максимальном режиме, но не отстроенная от бо́льших сопротивлений нагрузки с теми же углами; *в* — характеристика, отстроенная от любых по значению векторов сопротивления нагрузки с углом $\varphi_{нагр}$

Радиус R может быть определен из треугольника $OO'B$ (рис. П7.1), в котором:

$$OB \leqslant \frac{Z_{нагр,\,расч}}{k}; \qquad (П7.2)$$

$$OO' = R + a2R = (1+2a)R; \qquad (П7.3)$$

$$(O'B)^2 = R^2 \leqslant \frac{Z^2_{нагр,\,расч}}{k^2} + (1+2a)^2 R^2 - \frac{2Z_{нагр,\,расч}}{k}(1+2a)\cos(\varphi_{max\,ч} - \varphi_{нагр})\,R, \qquad (П7.4)$$

где $Z_{нагр,расч}$ и $\varphi_{нагр}$—модуль и угол вектора расчетного сопротивления нагрузки; k—коэффициент, равный произведению коэффициента отстройки $k_{отс}$ на коэффициент возврата $k_в$, поскольку реле должно быть отстроено от расчетного значения нагрузки в условиях возврата; $\varphi_{max\,ч}$—угол максимальной чувствительности реле.

Преобразовывая (П7.4), получаем

$$-4a(1+a)R^2 + 2\frac{Z_{нагр,\,расч}}{k}(1+2a)\times \cos(\varphi_{max\,ч} - \varphi_{нагр})\,R - \frac{Z^2_{нагр,\,расч}}{k^2} \leqslant 0, \qquad (П.7.5)$$

откуда

$$R \leqslant \frac{-2\frac{Z_{нагр,\,расч}}{k}(1+2a)\cos(\varphi_{max\,ч} - \varphi_{нагр}) \pm \sqrt{4\frac{Z^2_{нагр,\,расч}}{k^2}(1+2a)^2\cos^2(\varphi_{max\,ч} - \varphi_{нагр}) - 4\frac{Z^2_{нагр,\,расч}}{k^2}\cdot 4a(1+a)}}{-8a(1+a)} = \frac{Z_{нагр,\,расч}}{k}\,\frac{(1+2a)\cos(\varphi_{max\,ч} - \varphi_{нагр}) \pm \sqrt{(1+2a)^2\cos^2(\varphi_{max\,ч} - \varphi_{нагр}) - 4a(1+a)}}{4a(1+a)}. \qquad (П7.6)$$

С учетом (П7.1) получаем

$$Z^{II}_{с,\,з,\,ат} \leqslant \frac{Z_{нагр,\,расч}}{k}\,\frac{(1+2a)\cos(\varphi_{max\,ч} - \varphi_{нагр}) \pm \sqrt{(1+2a)^2\cos^2(\varphi_{max\,ч} - \varphi_{нагр}) - 4a(1+a)}}{2a}. \qquad (П7.7)$$

При смещении характеристики срабатывания в третий квадрант ($a<0$) в (П7.7) перед корнем должен учитываться только знак «—», иначе значение сопротивления срабатывания $Z^{II}_{с,\,з,\,ат}$ получится отрицательным.

При смещении характеристики срабатывания в первый квадрант ($a>0$) как знак «+», так и знак «—» перед корнем в (П7.7) дают положительные значения сопротивления $Z^{II}_{с,\,з,\,ат}$, поскольку второй член числителя в рассматриваемом случае (при $a>0$) всегда меньше первого. При этом меньшему значению $Z^{II}_{с,\,з,\,ат}$ (знак «—» перед корнем) соответствует характеристика срабатывания, отстроенная как от расчетного минимального сопротивления нагрузки $Z_{нагр,расч}$, так и от бо́льших сопротивлений нагрузки с тем же углом $\varphi_{нагр}$, которые могут иметь место в других, например в минимальном, нагрузочных режимах (рис. П7.2,*а*). Бо́льшему значению $Z^{II}_{с,\,з,\,ат}$, полученному из выражения (П7.7) (знак «+» перед корнем), соответствует характеристика срабатывания, отстроенная от расчетного минимального сопротивления нагрузки $Z_{нагр,расч}$ в максимальном нагрузочном режиме, однако она оказывается не отстроенной от бо́льших сопротивлений нагрузки $Z'_{нагр}$ с тем же углом $\varphi_{нагр}$ (рис. П7.2,*б*). Поэтому и при смещении характеристики срабатывания в первый квадрант в (П7.7) перед корнем должен учитываться тоже только знак «—».

Очевидно, что отстройка характеристики срабатывания как от расчетного минимального сопротивления нагрузки $Z_{нагр,расч}$ в максимальном нагрузочном режиме, так и от бо́льших сопротивлений нагрузки $Z_{нагр}$ с тем же углом $\varphi_{нагр}$ будет обеспечена также в случае, когда касательная к рассматриваемой характеристике, проведенная из начала координат, расположена с запасом выше луча, выходящего из начала координат под углом $\varphi_{нагр}$ к оси абсцисс. При этом характеристика будет отстроена от любых по значению векторов сопротивлений нагрузки с углом $\varphi_{нагр}$, т. е. будет отстроена по углу (рис. П7.2,*в*).

Из (П7.7) видно, что действительное значение сопротивления срабатывания $Z^{II}_{с,з,ат}$, удовлетворяющее условию остройки от расчетного сопротивления нагрузки для смещения в первый квадрант ($a>0$) может быть получено только при определенном соотношении смещения a и разности углов ($\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр}$), а именно при

$$(1+2a)^2\cos^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр}) - 4a(1+a) \geqslant 0. \qquad (П7.8)$$

Преобразовывая (П7.8), получаем:

$$4a^2[\cos^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})-1]+4a[\cos^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})-1]+\cos^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})\geqslant 0, \quad (П7.9)$$

или окончательно:

$$4a^2\sin^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})+4a\sin^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})-\cos^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})\leqslant 0, \quad (П7.10)$$

откуда

$$a\leqslant \frac{-4\sin^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})\pm \sqrt{[-4\sin^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})]^2+4\cdot 4\sin^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})\cos^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})}}{2\cdot 4\sin^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})} =$$

$$=\frac{-4\sin^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})\pm 4\sin(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})\sqrt{\sin^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})+\cos^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})}}{2\cdot 4\sin^2(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})}. \quad (П7.11)$$

Учитывая, что при $a>0$ перед корнем следует рассматривать только знак «+», для смещения в первый квадрант получаем

$$a\leqslant \frac{1-\sin(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})}{2\sin(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})}. \quad (П7.12)$$

Для отстройки характеристики срабатывания от любого по значению сопротивления нагрузки с углом $\varphi_{нагр}$ (рис. П7.2,*в*) достаточно, чтобы луч, проведенный из начала координат под углом $\varphi'\geqslant(\varphi_{нагр}+\Delta\varphi)$ к оси абсцисс, являлся касательной к этой характеристике. Угол $\Delta\varphi$ должен учитывать погрешность реле, его коэффициент возврата и необходимый запас.

Указанное условие может быть записано из треугольника $OO'C$ (рис. П7.2,*в*) в следующем виде:

$$O'C=OO'\sin(\varphi_{max\,ч}-\varphi')$$

или

$$R\leqslant R(1+2a)\sin(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр}-\Delta\varphi), \quad (П7.13)$$

откуда

$$a\geqslant \frac{1-\sin(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр}-\Delta\varphi)}{2\sin(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр}-\Delta\varphi)}. \quad (П7.14)$$

Для характеристики, проходящей через начало координат ($a=0$), из (П7.4) имеем:

$$R^2\leqslant \frac{Z^2_{нагр.\,расч}}{k^2}+R^2-2\frac{Z_{нагр.\,расч}}{k}\cos(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})R, \quad (П7.15)$$

откуда

$$Z^{II}_{с.\,з.\,ат}=2R\leqslant \frac{Z_{нагр.\,расч}}{k\cos(\varphi_{max\,ч}-\varphi_{нагр})}. \quad (П7.16)$$

В случаях, когда первая ступень защиты направлена в ту же сторону, что и рассматриваемая вторая ступень при смещении последней в первый квадрант ($a>0$), следует обеспечивать надежное перекрытие зон, охватываемых первой и второй ступенями, т. е. надежное «зацепление» характеристик срабатывания указанных ступеней (если разрыв между указанными зонами не перекрывается другими резервными защитами от многофазных КЗ защищаемого автотрансформатора).

Надежное «зацепление» характеристик срабатывания обеспечивается, если соприкасаются или перекрываются окружности, соответствующие работе реле первой и второй ступеней с погрешностью 10 %.

При одинаковых углах максимальной чувствительности ($\varphi^{I}_{max\,ч}=\varphi^{II}_{max\,ч}\approx\varphi_л$) надежное «зацепление» обеспечивается, если удовлетворяется выражение

$$0{,}9Z^{I}_{с.\,р.\,ат}-a2R^{II}\geqslant 0{,}1Z^{II}_{с.\,р.\,ат}. \quad (П7.17)$$

Подставляя в (П7.17) $2R^{II}=\frac{Z^{II}_{с.\,р.\,ат}}{1+a}$ и переходя к первичным величинам, получаем

$$0{,}9Z^{I}_{с.\,з.\,ат}-\frac{a}{1+a}Z^{II}_{с.\,з.\,ат}\geqslant 0{,}1Z^{II}_{с.\,з.\,ат}. \quad (П7.18)$$

Из (П7.18) получаем условия, при которых обеспечивается надежное зацепление:

для смещения a при заданном сопротивлении срабатывания $Z^{II}_{с.\,з.\,ат}$

$$a\leqslant \frac{0{,}9Z^{I}_{с.\,з.\,ат}-0{,}1Z^{II}_{с.\,з.\,ат}}{1{,}1Z^{II}_{с.\,з.\,ат}-0{,}9Z^{I}_{с.\,з.\,ат}}; \quad (П7.19)$$

для сопротивления срабатывания $Z^{II}_{с.\,з.\,ат}$ при заданном смещении a

$$Z^{II}_{с.\,з.\,ат}\leqslant \frac{0{,}9(1+a)Z^{I}_{с.\,з.\,ат}}{0{,}1+1{,}1a}. \quad (П7.20)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ П8

УКАЗАНИЯ К ВЫБОРУ ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ $I_{2с.з}$ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

1. Согласование с токовой защитой нулевой последовательности смежных линий в сетях с глухозаземленными нейтралями (см. п. 9.3.1).

Для указанного согласования рассматривается КЗ на землю на линиях, входящих в зону резервирования токовой защиты нулевой последовательности смежной линии, в условиях, когда эта защита находится на грани срабатывания, а выключатель поврежденной линии на дальнем конце отключен. Например, для согласования с токовой защитой нулевой последовательности, установленной на линии *Л1* сети на рис. П8.1,*а*, рассматривается замыкание на землю на линии *Л4* при отключении ее с дальнего конца. В случаях, когда при металлическом КЗ в конце линии, на которой рассматривается повреждение, коэффициент чувствительности защиты, с которой производится согласование, больше единицы, расчетные условия соответствуют КЗ через переходное сопротивление.

В целях упрощения в приведенных ниже расчетных выражениях разница в углах сопротивлений элементов сети не учитывалась, а влияние переходного сопротивления, ухудшающего условия согласования при замыкании на землю двух фаз, учтено введением специального коэффициента.

Токи обратной последовательности в месте замыкания одной фазы на землю $I^{(1)}_{2к}$ и двух фаз на землю

$I_{2к}^{(1,1)}$ определяются из комплексных схем замещения, приведенных соответственно на рис. П8.1,*б* и *в* для расчетных условий, при которых токовая защита нулевой последовательности, установленная на *Л1*, находится на грани срабатывания, т. е. для которых удовлетворяется условие

$$I_{0к}^{(1)} = I_{0к}^{(1,1)} = \frac{I_{0с,з}}{3}\frac{1}{k_{0\,ток}}, \qquad (П8.1)$$

где $k_{0ток}$ — по возможности минимальный (однако должен рассматриваться тот же режим работы сети, что и при определении $k_{2ток}$ — см. ниже) коэффициент токораспределения в схеме замещения нулевой последовательности, равный отношению тока в смежной линии, с защитой которой производится согласование, к току в месте КЗ; $I_{0с,з}$ — ток срабатывания токовой защиты нулевой последовательности, с которой производится согласование.

Из комплексных схем замещения с учетом выражения (П8.1) следует:

для замыкания одной фазы на землю

$$I_{2к}^{(1)} = I_{0к}^{(1)} = \frac{I_{0с,з}}{k_{0\,ток}\cdot 3}; \qquad (П8.2)$$

для замыкания двух фаз на землю

$$I_{2к}^{(1,1)} = I_{0к}^{(1,1)}\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}} = \frac{I_{0с,з}}{k_{0\,ток}\cdot 3}\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}}. \qquad (П8.3)$$

Ток обратной последовательности в месте установки защиты $I_{2расч}$ в рассматриваемых условиях определяется по выражениям:

для замыкания одной фазы на землю

$$I_{2\,расч}^{(1)} = k_{2ток}I_{2к}^{(1)}, \qquad (П8.4)$$

или с учетом выражения (П8.2)

$$I_{2\,расч}^{(1)} = \frac{k_{2\,ток}}{k_{0\,ток}}\frac{I_{0\,с,з}}{3}; \qquad (П8.5)$$

для замыкания двух фаз на землю

$$I_{2\,расч}^{(1,1)} = k_{п}k_{2ток}I_{2к}^{(1,1)}, \qquad (П8.6)$$

или с учетом выражения (П8.3)

$$I_{2\,расч}^{(1,1)} = k_{п}\frac{k_{2\,ток}}{k_{0\,ток}}\frac{I_{0с,з}}{3}\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}}, \qquad (П8.7)$$

где $k_{2ток}$ — максимальный коэффициент токораспределения в схеме замещения обратной последовательности, равный отношению тока в месте установки рассматриваемой защиты к току в месте КЗ; $k_{п}$ — коэффициент, учитывающий влияние переходных сопротивлений в месте КЗ, может быть принят равным 1,2; $Z_{0\Sigma}$ и $Z_{2\Sigma}$ = результирующие сопротивления схем замещения соответственно нулевой и обратной последовательностей относительно места расчетного КЗ, определяются для металлического КЗ; $k_{0ток}$, $I_{0с,з}$ — то же, что в выражении (П8.1).

Из сопоставления (П8.5) и (П8.7) следует, что расчетным для рассматриваемого согласования явится, как правило, замыкание на землю двух фаз.

Для определения отношения $Z_{0\Sigma}$ / $Z_{2\Sigma}$, входящего в (П8.7), для выбора $I_{2с,з}$ рассмотрим схемы замещения, приведенные на рис. П8.1, принимая сопротивления элементов, входящих в схемы прямой и обратной последовательностей, равными, т. е. $Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma}$.

На рис. П8.1,*г* приняты следующие обозначения:

$$Z_1' = Z_{1\Sigma} - Z_{1к}; \qquad (П8.8)$$

$$Z_0' = Z_{0\Sigma} - Z_{0к}, \qquad (П8.9)$$

где $Z_{1к}$ и $Z_{0к}$ — сопротивления соответственно прямой (обратной) и нулевой последовательностей участка поврежденной линии *Л4* (рис. П8.1,*а*) до места металлического КЗ на землю, при котором токовая защита нулевой последовательности находится на грани срабатывания.

При замыкании двух фаз на землю ток нулевой последовательности в месте замыкания $I_{0к}^{(1,1)}$ для рассматриваемых условий равен

$$I_{0к}^{(1,1)} = \frac{E_{ф}}{Z_{1\Sigma} + 2Z_{0\Sigma}} = \frac{I_{0с,з}}{k_{0\,ток}\cdot 3}, \qquad (П8.10)$$

откуда следует

$$Z_{1\Sigma} + 2Z_{0\Sigma} = \frac{E_{ф}\cdot 3k_{0\,ток}}{I_{0с,з}} = Z_{с}. \qquad (П8.11)$$

Из (П8.8), (П8.9) и (П8.11), если принять обозначения $n = \frac{Z_{0к}}{Z_{1к}}$ и $\alpha = \frac{Z_0'}{Z_1'}$, получается выражение для определения $Z_{1к}$

$$Z_{1к} = \frac{1}{(2n+1)}[Z_{с} - (1+2\alpha)Z_1']. \qquad (П8.12)$$

Подставив значение $Z_{1к}$ из (П8.12) и $Z_{0к}=nZ_{1к}$ в (П8.8) и (П8.9), получим искомую величину

$$\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma}} = \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}} = \frac{nZ_{с} - (n-\alpha)Z_1'}{Z_{с} + 2(n-\alpha)Z_1'}, \qquad (П8.13)$$

где $Z_{с}$ определяется по выражению (П8.11).

Расчет по рассматриваемому условию производится по выражениям (9.4), (9.6) или (9.7) с учетом (П8.13) и (П8.11).

Для грубо ориентировочной оценки $I_{2с,з}$ по рассматриваемому условию можно принять

$$\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}} \approx 3{,}0, \text{ а } \frac{k_{2\,ток}}{k_{0\,ток}} \approx 1{,}5 \div 2{,}0.$$

При этом рассматриваемое условие приобретает вид

$$I_{2с,з} = (1{,}5 \div 2{,}0)I_{0с,з}. \qquad (П8.14)$$

Ввиду противоречивости влияния на значение $I_{2с,з}$ изменения отдельных величин, входящих в выражения (П8.5) и (П8.7), при изменении режимов работы исходной схемы непосредственное выявление расчетных режимов, определяющих наибольшее значение $I_{2с,з}$ в общем случае затруднительно. В связи с этим может потребоваться определение $I_{2с,з}$ по рассматриваемому условию для ряда основных режимов работы.

Для выявления расчетного вида КЗ определяется отношение $k_{п}\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}}$ с помощью выражения (П8.13) для выбранного режима работы исходной схемы. Если $k_{п}\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}} > 1{,}0$, что имеет место в большинстве практических случаев, определение $I_{2с,з}$ достаточно произве-

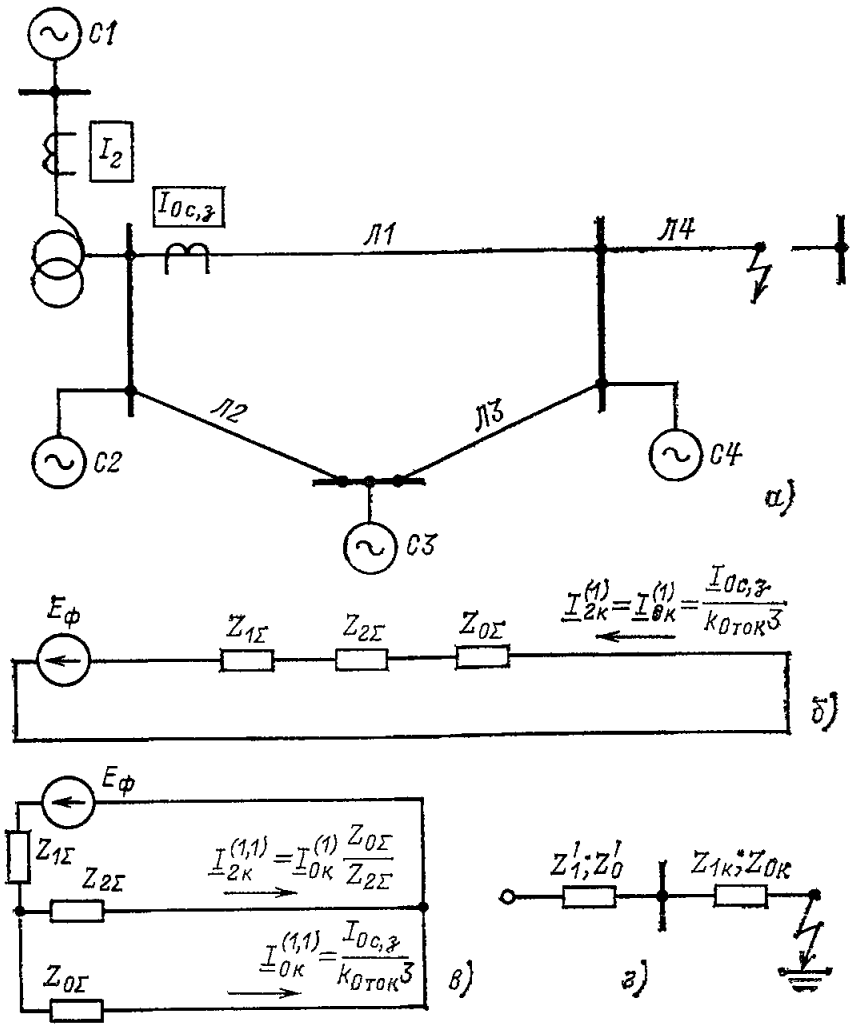


Рис. П8.1. Согласование по чувствительности токовой защиты обратной последовательности с защитами смежных элементов при КЗ на смежном элементе:

а — исходная схема; *б* — комплексная схема замещения при КЗ одной фазы на землю; *в* — то же при КЗ двух фаз на землю; *г* — схема замещения отдельных последовательностей

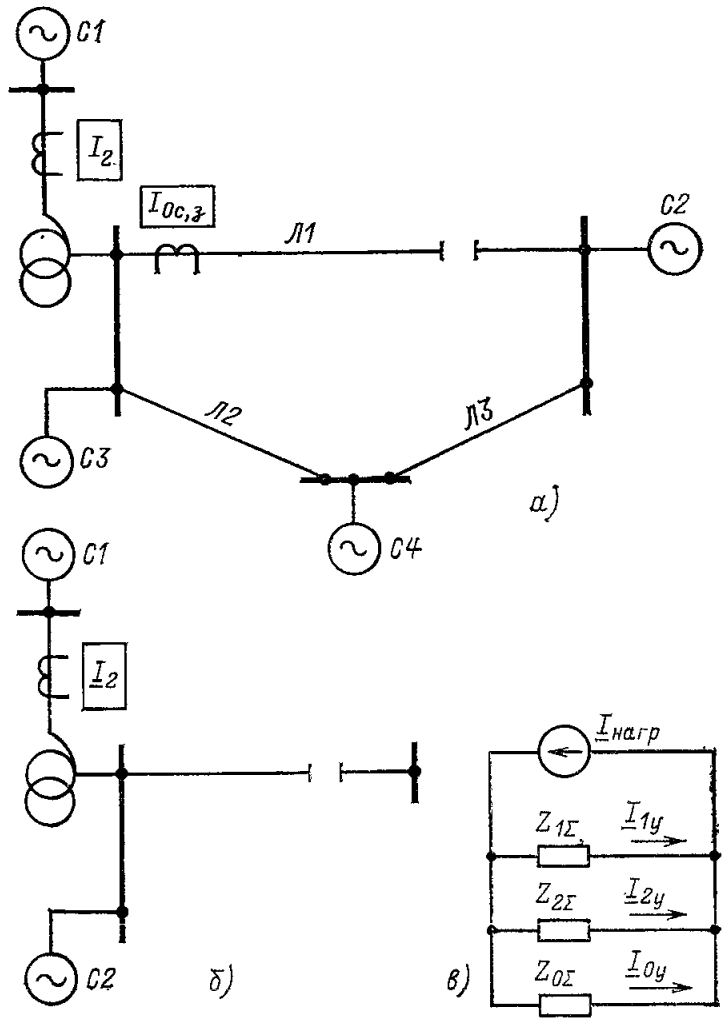


Рис. П8.2. Согласование по чувствительности токовой защиты обратной последовательности с защитами смежных линий при разрывах одной фазы на смежной линии

а — исходная схема 1; *б* — исходная схема 2; *в* — комплексная схема замещения при разрыве одной фазы

сти только для замыкания двух фаз на землю как расчетного для указанных случаев. Если $k_п\frac{Z_{0Σ}}{Z_{2Σ}}<1{,}0$, то выбор $I_{2с,з}$ производится для замыкания одной фазы на землю.

2. Согласование с токовой защитой нулевой последовательности смежных линий в режиме длительной работы двумя фазами этих линий, если для них предусматривается возможность указанного режима в сетях с глухозаземленными нейтралями (см. п. 9.3.1).

Указанное согласование производится дополнительно к рассмотренному в п. 1 настоящего приложения.

Ток обратной последовательности в месте установки защиты $I_{2расч}$ может быть определен из комплексной схемы замещения (рис. П8.2,*в*) с учетом коэффициента токораспределения в схеме обратной последовательности $k_{2ток}$ в условиях, когда токовая защита нулевой последовательности, установленная на линии, работающей двумя фазами, находится на грани срабатывания, т. е. когда

$$I_{0у}=\frac{I_{0\,с,\,з}}{3};$$

$$I_{2\,расч}=k_{2\,ток}I_{2у}=k_{2\,ток}I_{0у}\frac{Z_{0Σ}}{Z_{2Σ}}=$$

$$=k_{2\,ток}\frac{I_{0\,с,\,з}}{3}\frac{Z_{0Σ}}{Z_{2Σ}}, \qquad (П8.15)$$

где $I_{2у}$ и $I_{0у}$ — токи соответственно обратной и нулевой последовательностей в линии, работающей в рассматриваемом неполнофазном режиме ($I_{2у}=I_{0у}\frac{Z_{0Σ}}{Z_{2Σ}}$ — из комплексной схемы замещения); все остальные обозначения те же, что и в выражении (П8.7).

Расчет по рассматриваемому условию производится по (9.4) и (9.8). Расчет $I_{2расч}$ по (П8.15) может потребоваться для ряда основных режимов работы так же как и по (П8.5) и (П8.7).

Условие выбора $I_{2с,з}$ по (9.4) и (9.8) может быть значительно упрощено, если принять с запасом $k_{2ток}=1{,}0$, а также учитывать, что обычно $k_{отс}\frac{Z_{0Σ}}{Z_{2Σ}}$ не превосходит 3,0. При этом рассматриваемое условие практически удовлетворяется независимо от параметров исходной схемы, если ориентировочно принять

$$I_{2с,з}\geqslant I_{0с,з}. \qquad (П8.16)$$

В случаях, когда учет (П8.16) приводит к загрублению защиты по отношению к остальным расчетным условиям выбора $I_{2с,з}$, следует пользоваться более точными выражениями (9.4) и (9.8).

3. Определение $Z_Σ$ для условия согласования по чувствительности с дистанционной защитой, установленной на смежной линии в сети с изолированной нейтралью (см. п. 9.4.5).

Для определения Z_Σ рассмотрим схему замещения, приведенную на рис. П8.1,*г*. Из этой схемы следует, что $Z'=Z_\Sigma-Z_к$, где $Z_к$ — сопротивление участка поврежденной линии до места КЗ, при котором резервная ступень дистанционной защиты находится на грани срабатывания.

Введем обозначения:

$Z_{с,з}$ — сопротивление срабатывания ступени дистанционной защиты, с которой производится согласование;

$Z_л$ — сопротивление линии, на которой установлена дистанционная защита;

$k_{ток}$ — коэффициент токораспределения в рассматриваемых условиях, равный отношению тока в линии с дистанционной защитой к току в месте КЗ.

Тогда $Z_{с,з}$ равно

$$Z_{с,з}=Z_л+\frac{1}{k_{ток}}Z_к, \qquad (П8.17)$$

откуда вытекает выражение для определения $Z_к$ и Z_Σ

$$Z_к=k_{ток}(Z_{с,з}-Z_л); \qquad (П8.18)$$

$$Z_\Sigma=Z'+Z_к=Z'+k_{ток}(Z_{с,з}-Z_л). \qquad (П8.19)$$

Расчет по рассматриваемому условию производится по выражениям (9.4) и (9.10) с учетом (П8.19).

Расчет $I_{2с,з}$ по указанным выражениям может потребоваться для ряда основных режимов работы аналогично тому, как и по (П8.5) и (П8.7).

ПРИЛОЖЕНИЕ П9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ В ОБМОТКАХ И НА ВЫВОДАХ ОДНОФАЗНЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ С ВЫНЕСЕННОЙ НА БОКОВОЙ СТЕРЖЕНЬ МАГНИТОПРОВОДА РЕГУЛИРОВОЧНОЙ ОБМОТКОЙ ПРИ ВНЕШНИХ КЗ

В рассматриваемом автотрансформаторе (АОДЦТН-167000/500/220, АОДЦТН-167000/500/330 и АОДЦТН-267000/500/220) сумма МДС обмоток на среднем и боковом стержнях магнитопровода при пренебрежении намагничивающим током равна нулю при любом положении переключателя устройства РПН.

Для обмоток, расположенных на боковом стержне, при принятых на рис. 17.1 положительных направлениях:

$$\underline{I}_{ВН}W'_{рег}+(\underline{I}_{ВН}+\underline{I}_{СН})W''_{рег}+\underline{I}_{комп}W_{комп}=0, \qquad (П9.1)$$

откуда

$$\underline{I}_{комп}=-\left(\underline{I}_{ВН}\frac{W_{рег}}{W_{комп}}+\underline{I}_{СН}\frac{W''_{рег}}{W_{комп}}\right), \qquad (П9.2)$$

где $W_{рег}=W'_{рег}+W''_{рег}$.

При крайних (верхнем и нижнем) положениях переключателя (П9.2) принимает вид:

при верхнем положении переключателя, т. е. при

$$W''_{рег}=W_{рег}; \qquad (П9.3)$$

$$\underline{I}_{комп}=-(\underline{I}_{ВН}+\underline{I}_{СН})\frac{W_{рег}}{W_{комп}}=-(\underline{I}_{ВН}+\underline{I}_{СН})\frac{U_{рег}}{U_{НН}}; \qquad (П9.4)$$

при нижнем положении переключателя, т. е. при

$$W''_{рег}=0 \qquad (П9.5)$$

$$\underline{I}_{комп}=-\underline{I}_{ВН}\frac{W_{рег}}{W_{комп}}=-\underline{I}_{ВН}\frac{U_{рег}}{U_{НН}}, \qquad (П9.6)$$

где $U_{рег}$ — напряжение на регулировочной обмотке; $U_{НН}$ — номинальное напряжение обмотки низшего напряжения автотрансформатора;

при некотором среднем положении переключателя, при котором

$$\frac{W''_{рег}}{W_{рег}}=-\frac{\underline{I}_{ВН}}{\underline{I}_{СН}}; \qquad (П9.7)$$

$$\underline{I}_{комп}=0. \qquad (П9.8)$$

Для внешних междуфазных КЗ на стороне среднего или высшего напряжения для рассматриваемых автотрансформаторов наибольшие токи в компенсационной обмотке будут иметь место при нижнем положении переключателя устройства РПН [см. (П9.5) и (П9.6)]. При верхнем положении переключателя для рассматриваемых автотрансформаторов (П9.4) принимает вид:

для АОДЦТН-167000/500/220, имеющего регулирование $\Delta U=\pm 6\times 2{,}1$ %,

$$\underline{I}_{комп}=-\left(\underline{I}_{ВН}-\underline{I}_{ВН}\frac{500}{230(1+0{,}126)}\right)\frac{U_{рег}}{U_{НН}}=0{,}93\underline{I}_{ВН}\frac{U_{рег}}{U_{НН}}; \qquad (П9.9а)$$

для АОДЦТН-167000/500/330, имеющего регулирование $\Delta U=\pm 8\times 1{,}5$ %,

$$\underline{I}_{комп}=-\left(\underline{I}_{ВН}-\underline{I}_{ВН}\frac{500}{330(1+0{,}12)}\right)\frac{U_{рег}}{U_{НН}}=0{,}35\underline{I}_{ВН}\frac{U_{рег}}{U_{НН}}; \qquad (П9.9б)$$

для АОДЦТН-267000/500/220, имеющего регулирование $\Delta U=\pm 8\times 1{,}4$ %,

$$\underline{I}_{комп}=-\left(\underline{I}_{ВН}-\underline{I}_{ВН}\frac{500}{230(1+0{,}112)}\right)\frac{U_{рег}}{U_{НН}}=0{,}94\underline{I}_{ВН}\frac{U_{рег}}{U_{НН}}, \qquad (П9.9в)$$

т. е. ток в компенсационной обмотке будет меньше, чем при нижнем положении переключателя устройства РПН.

Выражения (П9.1), (П9.2), (П9.4), (П9.6) и (П9.8), составленные для полных токов в обмотках автотрансформатора, действительны также для симметричных составляющих этих токов, в частности для токов нулевой последовательности. В соответствии с этим при внешних замыканиях на землю ток нулевой последовательности в компенсационной обмотке автотрансформатора при верхнем положении переключателя [по аналогии с (П9.4)]:

$$\underline{I}_{0\,комп}=-(\underline{I}_{0ВН}+\underline{I}_{0СН})\frac{U_{рег}}{U_{НН}}, \qquad (П9.10)$$

при нижнем положении переключателя [по аналогии с (П9.6)]:

$$\underline{I}_{0комп}=-\underline{I}_{0ВН}\frac{U_{рег}}{U_{НН}}. \qquad (П9.11)$$

УСТРОЙСТВО ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ОБМОТКЕ СТАТОРА СИНХРОННОГО КОМПЕНСАТОРА ТИПА ЗЗГ-2

1. Устройство типа ЗЗГ-2 состоит из двух основных блоков с раздельной сигнализацией:

а) блока основной гармоники, представляющего собой максимальное реле напряжения первой гармоники — так называемое реле напряжения;

б) блока третьей гармоники, представляющего собой реле, реагирующее на производную третьей гармоники — так называемое реле производной.

Принципиальная схема устройства приведена на рис. П.10.1.

2. Реле напряжения *1* состоит из:

фильтра *R1, TA1, C1, C2*, выделяющего напряжение первой гармоники;

выпрямительного моста *VS1*;

сглаживающего конденсатора *C3*;

резисторов для регулирования уставки *R2—R8*;

реагирующего органа, собранного на транзисторах *VT1, VT2*, резисторах *R9—R14*, диодах *VD1—VD4*;

исполнительного органа *K1*.

Изменение уставки по напряжению срабатывания производится дискретно переключателем уставок срабатывания *П*.

Конденсатор *C4*, создавая задержку на срабатывание, увеличивает помехоустойчивость реле.

3. Реле производной имеет два реагирующих органа: пусковой и измерительный, а также элемент времени, схему логики и исполнительный орган.

3.1. Пусковой орган *2* состоит из:

фильтра *C14, TA3*, выделяющего напряжение третьей гармоники;

выпрямительного моста, собранного на диодах *VD23—VD26*;

резистора *R46*, служащего для выравнивания амплитуд напряжений;

формирующих цепочек из резисторов *R47—R54*, конденсаторов *C19—C23* и диодов *VD27—VD31*;

усилителя мощности на транзисторе *VT8*, диодах *VD29, VD32*, резисторах *R55—R57*;

триггера с одним временно устойчивым состоянием на нормально открытом триоде *VT10* и нормально закрытом триоде *VT9*, диодах *VD33—VD35*, резисторах *R58—R63* и конденсаторе *C24*.

3.2. Измерительный орган *3* состоит из:

фильтра *C13, TA2*, выделяющего напряжение третьей гармоники;

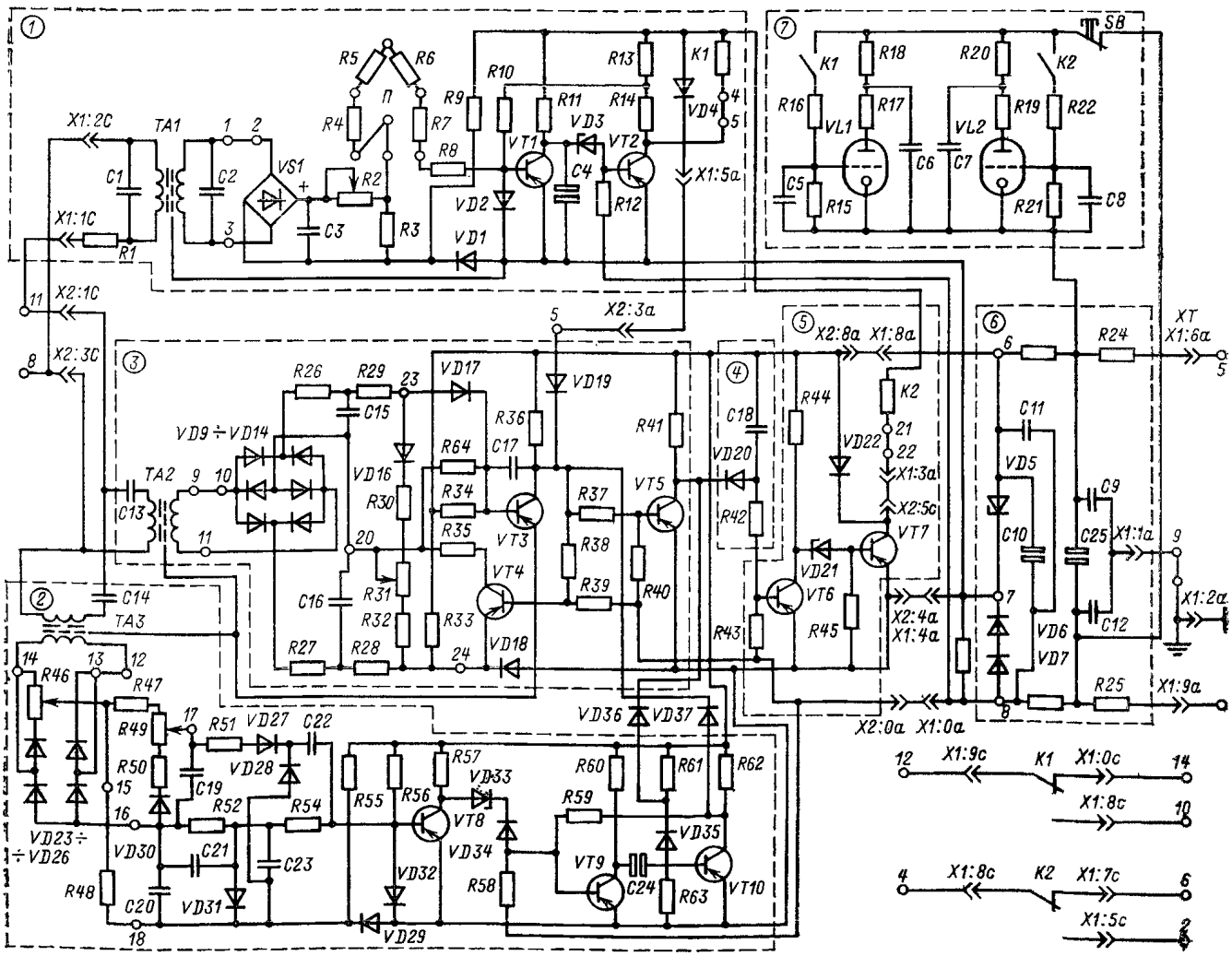


Рис. П10.1. Принципиальная схема устройства типа ЗЗГ-2

формирующих цепочек из резисторов *R26—R29, R35, R38, R39, R64*, конденсаторов *C15, C16*, диодов *VD16, VD17*;

порогового устройства на нормально открытом триоде *VT3* и нормально закрытых триодах *VT4, VT5*, резисторах *R33, R34, R36, R37, R40, R41* и конденсаторе *C17*, диоде *VD18*.

3.3. Элемент времени *4* состоит из диода *VD20*, конденсатора *C18* и резистора *R42*.

3.4. Исполнительный орган *5* состоит из нормально открытого триода *VT6*, нормально закрытого триода *VT7*, выходного реле *K2*, диодов *VD21, VD22* и резисторов *R43—R45*.

3.5. Схема логики обеспечивает включение пускового и измерительного органов по схеме И, что осуществляется связью коллекторов триодов *VT3* и *VT10* через диод *VD37*. Схема логики блокирует возврат триггера пускового органа после срабатывания измерительного органа с помощью диодов *VD35, VD36* и резистора *R61*, что обеспечивает сработанное состояние реле производной в процессе удерживания измерительного органа при наличии замыкания.

4. Кроме двух основных блоков устройство содержит:

4.1. Блок питания *6*, который состоит из стабилитрона *VD5*, диодов смещения *VD6, VD7*, резисторов *R24, R25* и конденсаторов *C9—C12, C25*.

4.2. Устройство световой сигнализации *7*, выполненное на тиратронах *VL1, VL2*, резисторах *R15—R22* и конденсаторах *C5—C8*. Тиратроны управляются контактами исполнительных органов *K1* и *K2*. Для гашения тиратронов предусмотрена кнопка *SB* — сброс сигнала.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

1. Общие положения 4
2. Дифференциальная токовая защита трансформаторов, выполненная с реле серии РНТ-560 4
3. Дифференциальная токовая защита трансформаторов и автотрансформаторов, выполненная с реле серии ДЗТ-11 14
4. Дифференциальная токовая защита трансформаторов, имеющая зоны разной чувствительности и выполненная с реле серии РНТ-560 или ДЗТ-11 23
5. Дифференциальная токовая защита трансформаторов и автотрансформаторов, выполненная с реле типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23) 28
6. Дифференциальная токовая защита ошиновки высшего (среднего) напряжения автотрансформаторов 37
7. Дифференциальная токовая защита цепей стороны низшего напряжения автотрансформаторов 37
8. Дистанционная защита автотрансформаторов от многофазных КЗ 41
9. Токовая защита обратной последовательности автотрансформаторов 51
10. Максимальная токовая защита с пуском напряжения трансформаторов и автотрансформаторов 53
11. Максимальная токовая защита 54
12. Ступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности автотрансформаторов от замыканий на землю в сетях с глухозаземленными нейтралями 55
13. Защита от замыканий на землю на стороне низшего напряжения автотрансформаторов 56
14. Токовая защита нулевой последовательности трансформаторов от замыканий на землю 56
15. Защита от перегрузки трансформаторов и автотрансформаторов 56
16. Контроль изоляции вводов обмотки высшего напряжения автотрансформаторов 57
17. Токовая защита регулировочных обмоток группы однофазных автотрансформаторов 57
18. Защита синхронного компенсатора, работающего в блоке с автотрансформатором . . 59

Приложение П1. Уточнение значений коэффициента отстройки k от броска намагничивающего тока дифференциальной токовой защиты трансформаторов и автотрансформаторов, выполненной с реле серии РНТ-560 или ДЗТ-11 60

Приложение П2. Методика определения коэффициента чувствительности дифференциальной токовой защиты трансформаторов при отсутствии торможения 64

Приложение П3. Принципы выполнения дифференциальной токовой защиты трансформаторов, имеющей зоны разной чувствительности 68

Приложение П4. Дифференциальная токовая защита группы однофазных автотрансформаторов, выполненная с использованием тока в компенсационной обмотке, с реле серии РНТ-560 или ДЗТ-11 71

Приложение П5. Устройство и принцип действия чувствительной дифференциальной токовой защиты трансформаторов и автотрансформаторов типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23) . . . 80

Приложение П6. Определение параметров схемы замещения и вывод выражений для расчета токов КЗ за линейным регулировочным трансформатором 87

Приложение П7. Определение сопротивления срабатывания второй ступени дистанционной защиты автотрансформаторов от многофазных КЗ 88

Приложение П8. Указания к выбору тока срабатывания $I_{2с,з}$ токовой защиты обратной последовательности автотрансформаторов 90

Приложение П9. Определение токов в обмотках и на выводах однофазных автотрансформаторов с вынесенной на боковой стержень магнитопровода регулировочной обмоткой при внешних КЗ 93

Приложение П10. Устройство чувствительной защиты от однофазных замыканий на землю в обмотке статора синхронного компенсатора типа ЗЗГ-2 94

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Напечатано	Должно быть
65	Рис. П2.1	Рис. П2.3
67	Рис. П2.3	Рис. П2.4
68	Рис. П2.4	Рис. П2.1

gost.e-ecolog.ru