

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
дополнительного профессионального образования
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ
(ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»)**

**КАФЕДРА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ, СЕТЕЙ И СИСТЕМ**

С. А. Гондуров, Е. В. Илюхин, М. Г. Пирогов, А. Л. Соловьёв.

Ступенчатые дистанционные защиты линий электропередачи 35–220 кВ

Методика расчёта

**Санкт-Петербург
2013**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
дополнительного профессионального образования
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ
(ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»)**

**КАФЕДРА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ, СЕТЕЙ И СИСТЕМ**

С. А. Гондуров, Е. В. Илюхин, М. Г. Пирогов, А. Л. Соловьёв.

Ступенчатые дистанционные защиты линий электропередачи 35–220 кВ

Методика расчёта

**Санкт-Петербург
2013**

УДК 621.316.9
ББК 31.27-05
С60

Одобрено и рекомендовано к опубликованию Ученым советом института

Протокол № 15 от 23 января 2013 г.

Научный редактор А.М. Александров, доцент кафедры РЗА ПЭИПК

С 60 Ступенчатые дистанционные защиты линий электропередачи 35 – 220 кВ:– методика расчёта/ С. А. ГОНДУРОВ и др.– СПб.: ПЭИПК, 2013. – 52 с.

Работа соответствует требованиям ПУЭ и руководящим указаниям по релейной защите – «Дистанционная защита линий 35–330 кВ» (вып. 7), написана с учетом особенностей применения цифровых устройств релейной защиты и опыта их эксплуатации.

Издание позволит проектным организациям и эксплуатирующим предприятиям наиболее полно реализовать все преимущества, которыми обладают цифровые устройства релейной защиты и автоматики ЛЭП.

Методические указания предназначены для специалистов и проектных организаций, работающих в области релейной защиты и системной автоматики электрических станций, подстанций и сетевых предприятий. Данная работа будет полезна студентам высших и средних специальных учебных заведений электроэнергетического профиля, занимающихся изучением и проектированием устройств релейной защиты ЛЭП.

УДК 621.316.9
ББК 31.27-05

1. Введение

Электрическая энергия – продукт, обеспечивающий жизнедеятельность и развитие цивилизованного общества, – является базисом для экономического развития любого государства. Современное развитие энергетики немыслимо без модернизации действующих и строительства новых электрических станций, подстанций и электрических сетей. Электрическая энергия доставляется потребителю с помощью электрических линий электропередачи (ЛЭП). Аварийный вывод из работы ЛЭП напряжением 35–220 кВ создает дефицит электрической энергии и приводит к ущербам, связанным с недоотпуском электрической энергии потребителям. Поэтому работа устройств релейной защиты и автоматики должна отвечать требованиям быстродействия, надежности, чувствительности и селективности.

Дистанционные защиты – это устройства релейной защиты с относительной селективностью, построенные на основе реле сопротивления. Дистанционные защиты применяются в качестве резервных или основных защит воздушных линий электропередачи напряжением 35–330 кВ. Руководящие указания по релейной защите (выпуск 7) «Дистанционная защита линий 35–330 кВ» были опубликованы в 1966 году и дополнения к ним вышли в свет в 1968 году. Следует отметить, что в те годы не было цифровых терминалов, и не было даже статических реле. Эта книга была посвящена выполнению защит на электромеханических реле. После этого никаких нормативных документов по дистанционным защитах на государственном уровне не издавалось.

Сегодня все ведущие фирмы релейного оборудования выпускают терминалы защиты воздушных линий электропередачи. К большому сожалению, в России сегодня отсутствуют общая государственная политика и правила выполнения таких устройств в отличие от таких стран, как Германия, Франция, Италия, США. Поскольку разные концы линии электропередачи напряжением 35–220 кВ принадлежат разным энергетическим предприятиям то, как правило, для защиты линии применяются терминалы различных фирм производителей с разными характеристиками и параметрами настройки этих защит. Поэтому в России расчет параметров срабатывания таких защит зачастую выполняют по разным методикам для каждого из терминалов, установленных на концах защищаемой линии электропередач. Данная книга является методическим пособием для выполнения расчетов и настройки ступенчатых дистанционных защит НТЦ «Механотроника».

Развитие микропроцессорной техники и её применение в автоматизации производства, передачи и распределения электрической энергии позволили повысить надежность и как отдельных объектов энергетики, так и энергосистем в целом. Существенно изменилась и техника релейной защиты. Цифровые терминалы позволяют контролировать режимы работы, выполняют полноценную защиту электроэнергетического оборудования, имеют стабильные характеристики, упрощают настройку и выполнение защит, работают в составе систем АСУ энергопредприятий.

В 1997 году НТЦ «Механотроника» первым в России выпустил цифровой терминал – блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ. Сегодня НТЦ «Механотроника» – это динамично развивающееся предприятие, производящее устройства релейной защиты и автоматики для электрических станций и подстанций с оборудованием на напряжение 0,4–220 кВ, в том числе и ступенчатые дистанционные защиты ЛЭП напряжением 35–220 кВ.

Методические указания, приведенные в работе, соответствуют требованиям ПУЭ [1] и руководящим указаниям [2] с учетом особенностей применения цифровых устройств релейной защиты и опыта их эксплуатации.

В работе приведены методические указания по расчёту дистанционных защит

(ДЗ) от междуфазных коротких замыканий на линиях напряжением 35–220 кВ, двойных замыканий на землю линий 35 кВ для:

- одиночных и параллельных линий;
- линий с ответвлениями;
- линий, работающих по схеме «трансформатор (автотрансформатор) – линия».

Расчётные формулы выполнены в первичных электрических величинах. При настройке терминала релейной защиты расчетные первичные значения параметров срабатывания защит (уставок) необходимо перевести во вторичные значения с учетом применяемых трансформаторов тока и напряжения.

Для практических расчётов авторы рекомендуют использовать расчётные программные комплексы.

Использование этой работы позволит проектным организациям и эксплуатирующим предприятиям наиболее полно реализовать все преимущества, которыми обладают цифровые устройства релейной защиты и автоматики, в том числе и с применением терминалов НТЦ «Механотроника».

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам НТЦ «Механотроника» И.В. Черкесовой и В. Ф. Александрову за значительный вклад в эту работу и признательность рецензенту – доценту кафедры РЗА ПЭИПК А.М. Александрову за ценные советы при написании этой книги.

2. Обозначения и сокращения

В работе приняты следующие обозначения и сокращения:

АПВ – автоматическое повторное включение
 БМРЗ – блок микропроцессорный релейной защиты
 ДЗ – дистанционная защита
 ДЗМФ – дистанционная защита от междуфазных коротких замыканий
 ДЗДВ – дистанционная защита от двойных замыканий на землю
 ДО – дистанционный орган
 КЗ – короткое замыкание
 КЦН – контроль исправности цепей напряжения
 ЛЭП – линия электропередачи
 НЦН – неисправность цепей напряжения
 ПС – подстанция
 РМН – реле минимального напряжения
 РС – реле сопротивления
 Т – трансформатор (автотрансформатор)
 ТН – трансформатор напряжения
 ТТ – трансформатор тока
 УБК – устройство блокировки при качаниях
 ЦП – центральный процессор.

3 Общие сведения о ДЗ

Дистанционными называют направленные защиты с относительной селективностью, выполняемые с использованием реле минимального сопротивления [4].

Для реле сопротивления отношение напряжения на зажимах реле к току в реле пропорционально расстоянию (по-иному – дистанции) от места КЗ до места установки защиты, что определило название защиты.

Для обеспечения селективного отключения повреждённого участка сети [4] время срабатывания t ДЗ должно зависеть от расстояния до точки КЗ:

$$t = f(l), \quad (3.1)$$

где l – расстояние от точки подключения реле защиты до места КЗ.

При этом ближайшее к месту КЗ реле защиты всегда будет иметь меньшую выдержку времени, чем более удалённые от места КЗ защиты.

Как и другие защиты с относительной селективностью, ДЗ могут быть выполнены со ступенчатыми, зависимыми или комбинированными характеристиками.

Обычно применяют ступенчатые (часто трёхступенчатые) характеристики.

Основным элементом ДЗ является ДО, определяющий удалённость КЗ от места установки защиты. В качестве ДО используют реле сопротивления, реагирующие на полное Z сопротивление линии (реактивное X и активное R).

Сопротивление фазы линии от места установки реле до места КЗ пропорционально длине этого участка:

$$Z_{\text{л}} = Z_{\text{уд}} \cdot l_{\text{л}}; \quad (3.2)$$

$$X_{\text{л}} = X_{\text{уд}} \cdot l_{\text{л}}; \quad (3.3)$$

$$R_{\text{л}} = R_{\text{уд}} \cdot l_{\text{л}} \quad (3.4)$$

где $Z_{\text{л}}$, $X_{\text{л}}$, $R_{\text{л}}$ – полное, реактивное и активное сопротивления, Ом; $l_{\text{л}}$ – длина участка линии, км; $Z_{\text{уд}}$, $X_{\text{уд}}$, $R_{\text{уд}}$ – удельное сопротивление линии, Ом/км.

На практике помимо сопротивления самой линии приходится учитывать ряд других факторов:

- переходные сопротивления в месте повреждения;
- источники питания и нагрузки, находящиеся между точкой подключения реле и точкой КЗ и др. [4].

По сравнению с токовыми ступенчатыми защитами применение РС позволяет:

- обеспечить независимость действия защиты при изменении напряжения на шинах станций и подстанций при переходных процессах в сетях;
- задать фиксированную длину первой защищаемой зоны;
- точнее контролировать конец защищаемого участка и шины противоположной подстанции второй зоной.

4. Особенности выполнения ДЗ на терминалах БМРЗ

4.1. Характеристики срабатывания ДЗ

4.1.1. В терминалах БМРЗ реализована трёхступенчатая ДЗ от междуфазных КЗ. В терминалах БМРЗ, используемых для защиты линий напряжением 35 кВ, эта

защита дополнена защитой от двойных замыканий на землю.

Алгоритмы ДЗМФ и ДЗДВ имеют одинаковые характеристики.

Для первых двух ступеней предусмотрено использование только четырёхугольных характеристик.

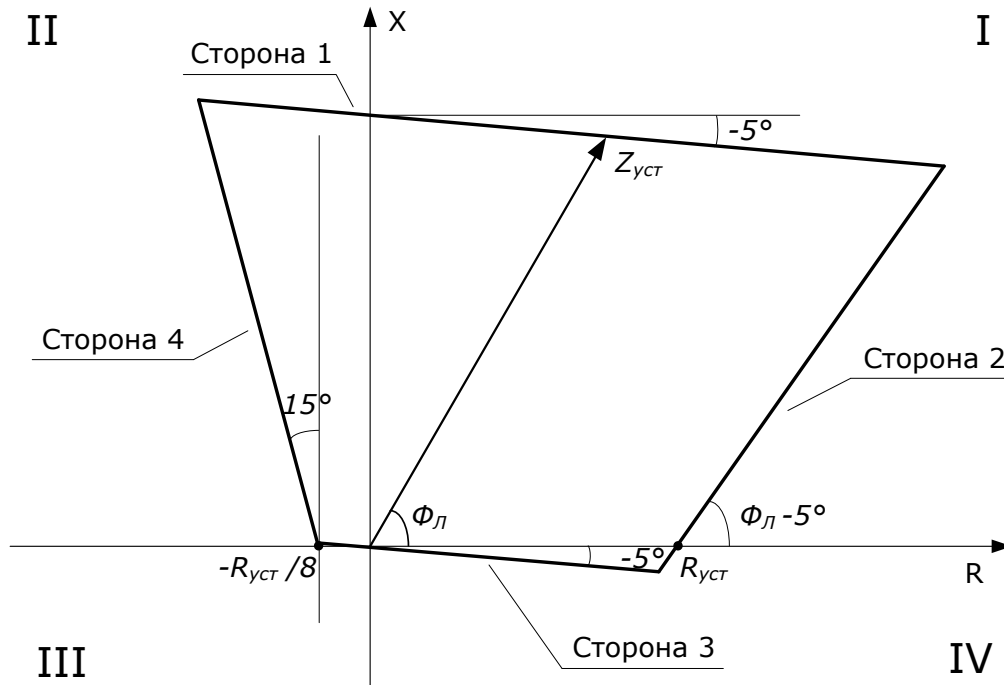


Рис. 4.1 Четырёхугольная характеристика ДЗ

4.1.2. Четырёхугольную характеристику срабатывания I ступени ДЗ (рис. 4.1) характеризуют следующие уставки: $R_{уст}$ – активное сопротивление, Ом; $Z_{уст}$ – полное сопротивление, Ом; $\varphi_{л}$ – угол линии, град.

Угол линии $\varphi_{л}$ зависит от соотношения индуктивной и активной составляющих сопротивления прямой последовательности линии:

$$\varphi_{л} = \arctg\left(\frac{X_{л}}{R_{л}}\right), \quad (4.1)$$

где $X_{л}$ – реактивное сопротивление защищаемой линии, Ом; $R_{л}$ – активное сопротивление защищаемой линии, Ом.

Во всех трёх характеристиках положение стороны I (рис. 4.1, 4.3, 4.4) задают уставкой полного сопротивления $Z_{уст}$.

Для повышения селективности ДЗ при дуговых замыканиях вне зоны действия первой ступени сторона 1 имеет наклон относительно оси R . Наклон задан постоянным и равен минус 5° .

4.1.3. Положение стороны 2 (граница правой части четырехугольной характеристики) выбирают таким, чтобы защита реагировала на дуговое замыкание через переходное сопротивление.

Учитывая, что сопротивление дуги R_d с приближением точки КЗ к источнику питания уменьшается, угол наклона стороны 2 меньше угла линии и принят равным $(\varphi_{\text{л}} - 5^\circ)$.

Для обеспечения срабатывания ДЗ при близких КЗ через переходное сопротивление угол наклона стороны 3 четырехугольной характеристики задан равным минус 5° относительно оси R .

Существенное расширение области слева нежелательно из-за:

- влияния качаний на работу ДО;
- ухудшения динамических характеристик ДО в переходных режимах (расширение области излишнего срабатывания).

Учитывая погрешности РС (ДО) в статических и динамических режимах, а также необходимость обеспечения быстродействия, положение стороны 4 задано следующим образом:

- сторона 4 смещена влево по оси X на расстояние, равное $1/8R_{\text{уст}}$;
- угол наклона стороны 4 задан равным 15° относительно оси X .

4.1.4. Сопротивление срабатывания I ступени ДЗ $Z_{\text{с.з}}^I$, определяющее уставку $Z_{\text{уст}}$, рассчитывают из условия несрабатывания ДО при КЗ за пределами защищаемой линии.

Погрешность используемых совместно с терминалами БМРЗ измерительных ТТ и ТН, а так же погрешность РС, применённого в терминале БМРЗ, приводит к изменению зоны действия первой ступени.

Поэтому сопротивление срабатывания $Z_{\text{с.з}}^I$ для I ступени ДЗ необходимо выбирать меньше, чем сопротивление защищаемой линии.

Как правило, значение $Z_{\text{с.з}}^I$ составляет порядка 85% от полного сопротивления прямой последовательности линии. Таким образом, первая ступень оставляет незащищенными 10–15% длины линии.

4.1.5. Для исключения излишней работы ДЗ при близких КЗ на элементах сети, находящихся до места установки защиты, так называемых КЗ «за спиной» (точка KI для защиты 2 на рис. 4.2), характеристика первой ступени ДЗ реализована без смещения в III квадрант.

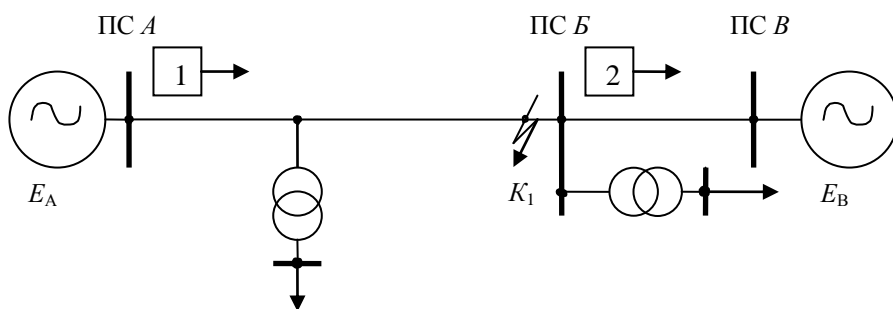


Рис. 4.2 Пример схемы сети с установленными ДЗ на ПС А и ПС Б

Выдержка времени срабатывания этой ступени принимается нулевой.

4.1.6. Четырёхугольную характеристику срабатывания для второй и третьей ступеней ДЗ (рис. 4.3) задают следующими уставками: $R_{уст}$ – активное сопротивление, Ом; $Z_{уст}$ – полное сопротивление, Ом; $Z_{см}$ – смещение по полному сопротивлению, Ом; $\Phi_{л}$ – угол линии, °град.

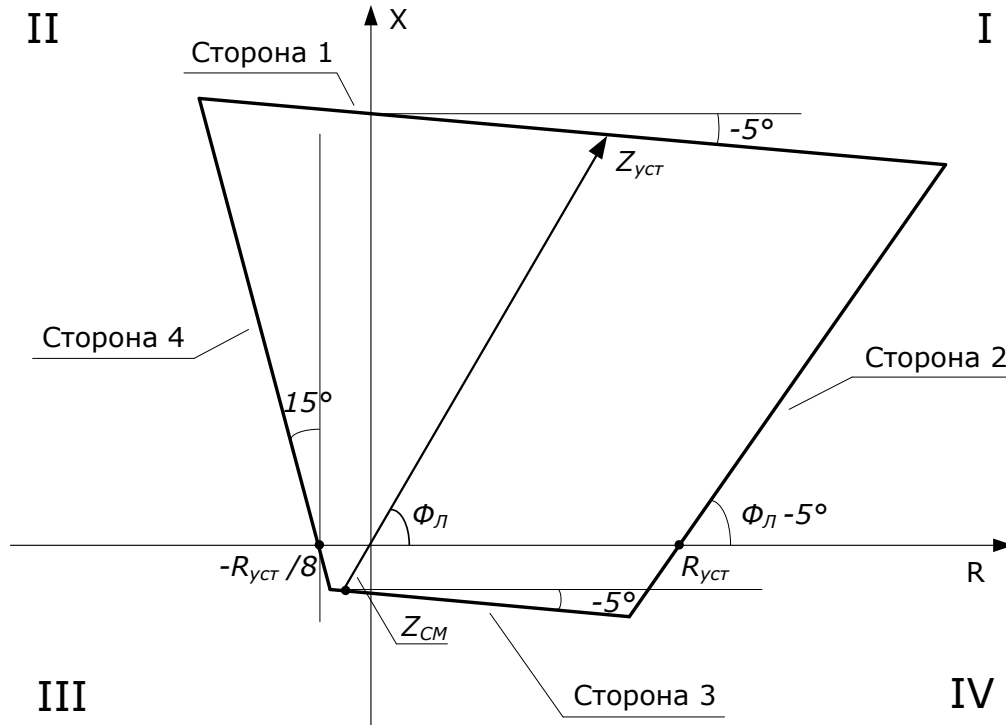


Рис. 4.3. Четырёхугольная характеристика ДЗ со смещением

При задании уставки $Z_{см} = 0$ эта характеристика становится идентичной приведенной на рис. 4.1.

4.1.7. Вторая ступень ДЗ предназначена для:

- резервирования первой ступени защиты;
- защиты участка линии, оставшегося незащищённым первой ступенью ДЗ. Как правило, это 10–15% от длины линии;
- выполнения функции ближнего резервирования при отказе первых ступеней ДЗ элементов смежной линии при близких КЗ.

В зону, защищаемую второй ступенью ДЗ, входят шины на противоположном конце линии и отходящие от них элементы.

Уставку второй ступени защиты задают с учётом нагрузочных режимов и возможности подпитки от шин противоположного конца линии.

Вторую зону ДЗ целесообразно смещать в III и IV квадранты для защиты шин, где установлена рассматриваемая защита ($Z_{см} > 0$).

4.1.8. Для обеспечения селективности ДЗ уставки срабатывания второй ступени, должны быть согласованы с уставками защит первой ступени элементов противоположной подстанции (под противоположной понимается подстанция, подключенная в конце защищаемой линии, противоположном месту установки защиты, т.е. ПС В для защиты 2 на рис. 4.2).

Время срабатывания защиты принимают:

- при $Z_{см} = 0$ – на ступень селективности больше, чем выдержки времени первых ступеней элементов, отходящих от шин противоположной подстанции;

- при $Z_{см} > 0$ – на ступень селективности больше, чем выдержки времени первых ступеней элементов, отходящих от шин противоположной подстанции, а также элементов, отходящих от шин подстанции «за спиной».

В том случае, когда невозможно отстроить выдержку времени только на одну ступень селективности, $Z_{см}$ должно быть принятым равным нулю.

При этом резервирование защит шин подстанции, на которой установлена защита, выполняется смещением в III и IV квадранты характеристики третьей ступени ДЗ, имеющей большую выдержку времени.

Характеристика третьей ступени в этом случае выполняется четырехугольной.

4.1.9. Для третьей ступени предусмотрена возможность выбора следующих характеристик срабатывания:

- четырёхугольная (рис. 4.3);
- треугольная (рис. 4.4).

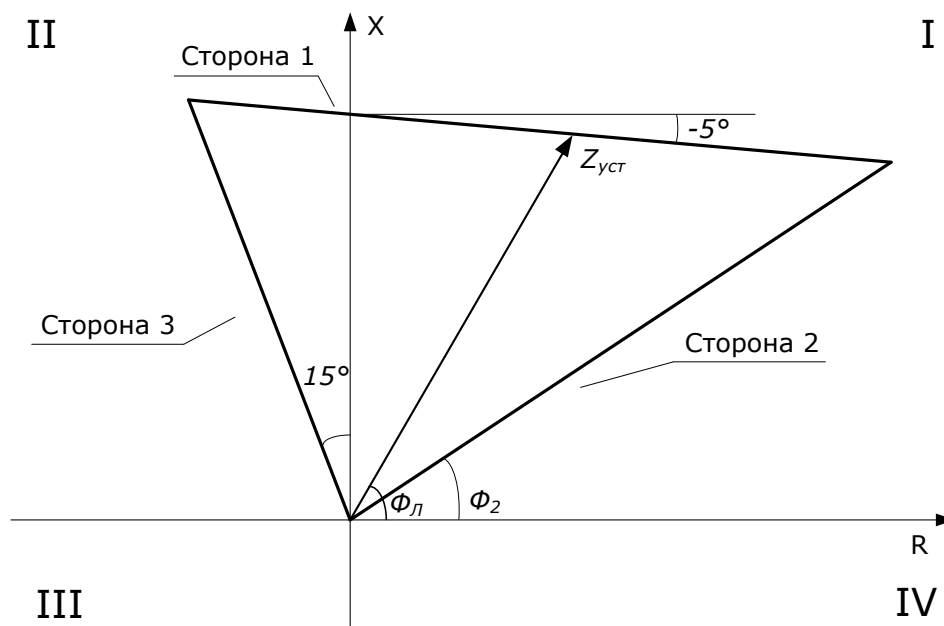


Рис. 4.4 . Треугольная характеристика ДЗ

Треугольную характеристику задают следующими уставками: $Z_{уст}$ – полное сопротивление, Ом; $\Phi_{л}$ – угол линии, °; Φ_2 – угол наклона стороны 2, град.

Угол наклона стороны 2 предназначен для отстройки защиты от сопротивления нагрузки, и его можно изменять относительно угла защищаемой линии в любую сторону.

Треугольную характеристику применяют при условии выполнения дальнего резервирования (защиты присоединений, отходящих от шин противоположной подстанции).

Уставки защиты следует задавать с учётом предельных нагрузочных режимов и условий подпитки от шин противоположного конца линии.

Сопротивление срабатывания III ступени ДЗ задают для КЗ в конце защищаемого участка зоны резервирования.

4.1.10. Наличие тока подпитки между местом установки защиты и местом КЗ увеличивает погрешность расчёта сопротивления. Этот эффект возникает потому, что ток подпитки вызывает дополнительное падение напряжения в месте установки защиты. Поэтому защита определяет замыкание как более удалённое, чем есть на самом деле, т.е. фактическая длина защищаемой зоны уменьшается.

Выдержку времени III ступени ДЗ выбирают по условию селективности с III ступенью резервируемой ДЗ $t_{III A} = t_{III B} + \Delta t$ (рис. 4.2)

4.2. Включение цифровых РС

4.2.1. Программа ЦП терминалов БМРЗ в зависимости от исполняемого алгоритма, реализует два типа включения РС при неизменной схеме подключения входных аналоговых сигналов к терминалу.

4.2.2. В алгоритме ДЗМФ реализованы РС, включённые на междуфазные напряжения и разность фазных токов. Расчёт сопротивлений контуров \underline{Z}_{ab}^1 , \underline{Z}_{bc} , \underline{Z}_{ca} на «зажимах» реле происходит в ЦП терминала БМРЗ по формулам (4.2) – (4.4):

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{\dot{U}_a - \dot{U}_b}{\dot{I}_a - \dot{I}_b};^2 \quad (4.2)$$

$$\underline{Z}_{bc} = \frac{\dot{U}_b - \dot{U}_c}{\dot{I}_b - \dot{I}_c}; \quad (4.3)$$

$$\underline{Z}_{ca} = \frac{\dot{U}_c - \dot{U}_a}{\dot{I}_c - \dot{I}_a}, \quad (4.4)$$

где \dot{U}_a – вторичное напряжение фазы А, В; \dot{U}_b – вторичное напряжение фазы В, В; \dot{U}_c – вторичное напряжение фазы С, В; \dot{I}_a – вторичный ток фазы А, А; \dot{I}_b – вторичный ток фазы В, А; \dot{I}_c – вторичный ток фазы С, А.

В общем случае, можно сказать, что работа РС определяется отношением напряжения \dot{U}_p , подводимого к нему, к току \dot{I}_p , протекающему через РС.

Напряжение на РС при междуфазном металлическом КЗ равно.

$$\dot{U}_p = \dot{I}_p \cdot \underline{Z}_{уд} \cdot l, \quad (4.5)$$

где $\underline{Z}_{уд}$ – удельное сопротивления линии, Ом/км;

l – длина участка линии от места установки защиты до точки КЗ, км.

Таким образом, при междуфазном КЗ сопротивления \underline{Z}_p на «зажимах» РС равно

$$\underline{Z}_p = \underline{Z}_{уд} \cdot l. \quad (4.6)$$

Поэтому сопротивление \underline{Z}_p зависит только от расстояния l до точки КЗ и не зависит от абсолютных значений \dot{U}_p и \dot{I}_p [4].

4.2.3. В алгоритме ДЗДВ реализованы РС, включённые по схеме с токовой компенсацией [8]. Расчёт сопротивления контуров \underline{Z}_{A0} , \underline{Z}_{B0} , \underline{Z}_{C0} на «зажимах» реле происходит в ЦП терминала БМРЗ с учётом тока нулевой последовательности и коэффициента компенсации тока нулевой последовательности линии $k_{комп}$ по

¹ Здесь и далее по тексту чертой, подчеркивающей величину (\underline{Z}_{ab}), обозначены обычные комплексные величины.

² Здесь и далее по тексту точкой, стоящей над величиной (\dot{U}_a), обозначены векторы на комплексной плоскости, изображающие гармонически изменяющиеся функции времени.

формулам (4.7) – (4.9) [8]:

$$\underline{Z}_{A0} = \frac{\dot{U}_A}{(\dot{I}_A + k_{\text{КОМП}} \cdot 3\dot{I}_0)}; \quad (4.7)$$

$$\underline{Z}_{B0} = \frac{\dot{U}_B}{(\dot{I}_B + k_{\text{КОМП}} \cdot 3\dot{I}_0)}; \quad (4.8)$$

$$\underline{Z}_{C0} = \frac{\dot{U}_C}{(\dot{I}_C + k_{\text{КОМП}} \cdot 3\dot{I}_0)}, \quad (4.9)$$

где \dot{U}_a – вторичное напряжение фазы A , В; \dot{U}_b – вторичное напряжение фазы B , В; \dot{U}_c – вторичное напряжение фазы C , В; \dot{I}_a – вторичный ток фазы A , А; \dot{I}_b – вторичный ток фазы B , А; \dot{I}_c – вторичный ток фазы C , А. $k_{\text{КОМП}}$ – коэффициент компенсации тока нулевой последовательности; \dot{I}_0 – вторичный ток нулевой последовательности, А.

Коэффициент $k_{\text{КОМП}}$ определяют по формуле [8]:

$$k_{\text{КОМП}} = \frac{Z_0 - Z_1}{3 \cdot Z_1}, \quad (4.10)$$

где Z_1 и Z_0 – соответственно сопротивления прямой и нулевой последовательностей защищаемого участка линии, Ом.

Для реле, установленного между двумя точками замыкания на землю, учет коэффициента компенсации тока нулевой последовательности линии $k_{\text{КОМП}}$ позволяет обеспечить равенство двух величин:

- сопротивления на «зажимах» реле;
- сопротивления фазы линии до места КЗ.

4.2.4. В терминалах БМРЗ, установленных для защиты сетей с малым током замыкания на землю, реализован автоматический переход от алгоритма ДЗМФ к алгоритму ДЗДВ. При появлении тока нулевой последовательности, всегда возникающего на участке между точками замыкания на землю, происходит автоматическое переключение алгоритма ДЗМФ на алгоритм ДЗДВ.

4.3. Ускорение ДЗМФ

4.3.1. КЗ на защищаемой линии вне зоны действия первой ступени ДЗМФ будут селективно отключены с выдержками времени второй или третьей ступенью защиты.

При использовании на обоих концах линии терминалов БМРЗ возможно ускоренное срабатывание ДЗМФ, обеспечивающее селективное отключение КЗ в пределах всей линии с минимальной выдержкой времени.

Для этого в терминалах БМРЗ предусмотрена возможность обмена информацией с терминалом противоположного конца линии с использованием дополнительной аппаратуры и каналов связи.

При срабатывании РС первой ступени защиты одного конца защищаемой линии терминал БМРЗ формирует сигнал ускорения, который передаётся на другой конец защищаемой линии, где установлен второй терминал защиты. Полученный сигнал ускоряет работу первой, второй и третьей ступеней ДЗМФ.

Для исключения влияния на работу алгоритма ДЗМФ разновременности

отключения выключателей на обоих концах линии в терминалах БМРЗ предусмотрено продление сигнала ускорения на время, равное 0,5 с, после срабатывания первой ступени ДЗМФ на данном конце линии на отключение.

Задержка на формирование, передачу и приём сигнала ускорения составляет не более 40 мс.

4.3.2. Кроме того, в алгоритме ДЗМФ предусмотрено:

- оперативное ускорение ДЗМФ по входному дискретному сигналу;
- автоматическое ускорение при включении выключателя на КЗ.

Более подробная информация по ускорению ДЗМФ содержится в руководстве по эксплуатации на соответствующий терминал защиты.

4.4. Блокирование защиты при качаниях

4.4.1. Для исключения возможного ложного действия РС при качаниях в энергосистеме в терминалах БМРЗ для первой, второй и третьей ступеней ДЗ с помощью алгоритма «УБК» происходит блокирование защиты при качаниях.

В нормальном режиме работы энергосистемы и при качаниях реле сопротивления заблокированы. В момент КЗ при срабатывании пусковых органов алгоритма «УБК» РС будут разблокированы на время, задаваемое уставкой $T_{Д.Б.1}$.

При попадании вектора измеряемого сопротивления линии в зону срабатывания ДЗ произойдет пуск РС.

Дальнейшая корректная работа выдержек времени всех ступеней ДЗ обеспечивается тем, что вне зависимости от значения уставки $T_{Д.Б.1}$ РС после пуска остаются в разблокированном состоянии в течение промежутка времени, определяемого уставкой $T_{Д.Б.2}$:

$$T_{Д.Б.2} = t_{с.з}^{III} + 0,1 \text{ с}, \quad (4.11)$$

где $t_{с.з}^{III}$ – время срабатывания III ступени ДЗ, с.

Для разблокирования всех ступеней защиты при КЗ в защищаемой зоне, уставки пусковых органов алгоритма «УБК» рассчитывают для зоны действия III ступени ДЗ.

4.4.2 Быстропротекающие процессы несимметрии токов и напряжений являются характерным признаком, отличающим КЗ от симметричных качаний.

При металлических трёхфазных КЗ равенство сопротивлений фаз не нарушается, поэтому токи и напряжения в этом режиме симметричны.

Исследования и опыт эксплуатации показывают, что процессы КЗ обычно начинаются с замыкания одной или двух фаз, а затем переходят в трёхфазные КЗ. Это характерно и для случаев включения ЛЭП на трёхфазное КЗ через заземление из-за разновременности замыкания фаз контактами выключателя. Помимо этого, при одновременном замыкании трёх фаз вследствие переходных процессов, возникающих в первичных и вторичных цепях измерительных трансформаторов, появляется кратковременная несимметрия вторичных величин. В результате в начальный момент трёхфазного КЗ кратковременно возникает несимметрия.

Несимметрия сопровождается появлением составляющих тока I_2 и напряжения U_2 обратной последовательности [8], наличие которых и позволяет установить факт возникновения КЗ.

Такое различие между режимами КЗ и качаний использовано для работы алгоритма «УБК» в терминалах БМРЗ.

4.4.3. Если значение одной из контролируемых величин превышает уставку, то происходит срабатывание пусковых органов алгоритма «УБК», обеспечивающее разблокирование защит.

Алгоритм «УБК» контролирует:

- действующее значение аварийной составляющей фазных токов;
- приращение действующего значения тока обратной последовательности;
- приращение действующего значения напряжения обратной последовательности.

Уставку по аварийной составляющей фазного тока рассчитывают по формуле

$$I_{\text{ф.УБК}} = \frac{I_{\text{КЗ min}} - I_{\text{раб. max}}}{K_{\text{ч}}}, \quad (4.12)$$

где $I_{\text{КЗ min}}$ – минимальное значение тока КЗ в конце III зоны действия рассматриваемой ДЗ; $I_{\text{раб. max}}$ – максимальное значение рабочего тока защищаемой линии, А; $K_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, значение которого выбирают из диапазона 1,5 – 2,5.

Уставку по приращению напряжения обратной последовательности рассчитывают по формуле

$$U_{2\text{УБК}} = \frac{U_{2\text{min}} - (U_{\text{несим}} + U_{\text{нб}})}{K_{\text{ч}}}, \quad (4.13)$$

где $U_{2\text{min}}$ – минимальное значение напряжения обратной последовательности при КЗ в конце защищаемой зоны, В; $U_{\text{несим}}$ – максимальное значение напряжения несимметрии в режиме нагрузки и в режиме качаний энергосистемы, В; $U_{\text{нб}}$ – максимальное значение напряжения небаланса фильтра напряжения обратной последовательности, В; $K_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, значение которого выбирают из диапазона 1,5 – 2,5.

Максимальное значение напряжения небаланса $U_{\text{нб}}$ для терминалов БМРЗ можно рассчитать по формуле:

$$U_{\text{нб}} = \frac{U_{\text{ном}} \cdot K_{\text{нб} U_2}}{\sqrt{3}}, \quad (4.14)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное первичное значение напряжения защищаемой линии, В; $K_{\text{нб} U_2}$ – коэффициент небаланса фильтра, принимаемый равным 0,025.

После расчёта уставки $U_{2\text{УБК}}$ необходимо удостовериться, что условие $U_{2\text{УБК}} \geq k_{\text{н}} \cdot (U_{\text{несим}} + U_{\text{нб}})$ выполнено.

Значение коэффициента надежности $k_{\text{н}}$ принимают равным 1,2.

Уставку по приращению тока обратной последовательности определяют по формуле:

$$I_{2\text{УБК}} = \frac{I_{2\text{min}} - (I_{\text{несим}} + I_{\text{нб}})}{K_{\text{ч}}}, \quad (4.15)$$

где $I_{2\min}$ – минимальное значение тока обратной последовательности при КЗ в конце защищаемой зоны, А; $I_{\text{несим}}$ – максимальное значение тока несимметрии в режиме нагрузки и в режиме качаний энергосистемы, А; $I_{\text{нб}}$ – максимальное значение тока небаланса фильтра тока обратной последовательности, А; $K_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, принимаемый из диапазона 1,5 – 2,5.

Максимальное значение тока небаланса $I_{\text{нб}}$ для терминалов БМРЗ можно рассчитать по формуле

$$I_{\text{нб}} = I_{\text{раб. max}} \cdot K_{\text{нб } I_2}, \quad (4.16)$$

где $I_{\text{раб. max}}$ – первичное значение максимального рабочего тока линии, А; $K_{\text{нб } I_2}$ – коэффициент небаланса фильтра, принимаемый равным 0,025.

После расчёта уставки $I_{2\text{УБК}}$ необходимо проверить, что условие $I_{2\text{УБК}} \geq k_{\text{н}} \cdot (I_{\text{несим}} + I_{\text{нб}})$ выполнено.

Как и ранее значение коэффициента надёжности $k_{\text{н}}$ принимают равным 1,2.

Выдержку времени $T_{\text{д.б.1}}$ определяют по формуле

$$T_{\text{д.б.1}} = t_{\text{откл1}} + t_{\text{АПВ}} + t_{\text{откл2}}, \quad (4.17)$$

где $t_{\text{откл1}}$ и $t_{\text{откл2}}$ – наибольшее время отключения КЗ в результате срабатывания III ступени ДЗ, в первый раз и после АПВ соответственно, с;

$t_{\text{АПВ}}$ – время действия АПВ, с.

Функциональная схема алгоритма «УБК» ДЗ приведена в руководстве по эксплуатации на конкретное исполнение БМРЗ.

5. Контроль исправности измерительных цепей напряжения

5.1. Для исключения ложного срабатывания ДЗ при возникновении неисправностей во вторичных цепях ТН, в терминалах БМРЗ предусмотрен алгоритм «КЦН», схема которого приведена в РЭ на соответствующее исполнение терминала.

Алгоритм «КЦН» функционирует непрерывно. При обнаружении неисправности цепей напряжения алгоритм блокирует все ступени ДЗМФ и ДЗДВ и формирует выходной сигнал «НЦН».

Снижение всех пяти входных напряжений терминала (\dot{U}_{A0} , \dot{U}_{B0} , \dot{U}_{C0} , $\dot{U}_{\text{ни}}$ и $\dot{U}_{\text{ик}}$) ниже значения 5 В приводит к срабатыванию реле минимального напряжения и появлению выходного сигнала «РМН».

5.2. В терминале БМРЗ предусмотрена возможность выбора одного из трёх вариантов функционирования алгоритма «КЦН» при разных схемах включения ТН.

Вариант включения выбирает пользователь, задавая один из режимов работы:

- особая фаза³ А;
- особая фаза В;
- особая фаза С.

В терминалах БМРЗ предусмотрен выбор одного из двух значений уставки по номинальному напряжению дополнительной обмотки ТН $U_{\text{доп}}$ – 100 В и 100/3 В.

Возможность выбора уставки $U_{\text{доп}}$ позволяет обеспечить правильную работу

³ Под «особой фазой» понимают фазу, из соединённых в звезду фаз вторичных цепей ТН, вектор которой сонаправлен с вектором напряжения разомкнутого треугольника $\dot{U}_{\text{ни}}$.

алгоритма «КЦН» при использовании ТН с номинальным напряжением основной обмотки $100/\sqrt{3}$ и дополнительной обмотки 100 или $100/3$ В.

5.3 Информационным признаком, свидетельствующим о неисправности цепей напряжения, служит напряжение $\dot{U}_{\text{кцн}}$ (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Расчётные формулы для $\dot{U}_{\text{кцн}}$

Особая фаза	Номинальное напряжение дополнительной обмотки 100 В	Номинальное напряжение дополнительной обмотки 100/3 В
<i>A</i>	$\dot{U}_{\text{кцн}} = ((\dot{U}_{\text{B0}} + \dot{U}_{\text{C0}}) - \dot{U}_{\text{A0}}) + (\dot{U}_{\text{НИ}} - \dot{U}_{\text{ИК}}) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$	$\dot{U}_{\text{кцн}} = ((\dot{U}_{\text{B0}} + \dot{U}_{\text{C0}}) - \dot{U}_{\text{A0}}) + (\dot{U}_{\text{НИ}} - \dot{U}_{\text{ИК}}) \cdot \sqrt{3}$
<i>B</i>	$\dot{U}_{\text{кцн}} = ((\dot{U}_{\text{A0}} + \dot{U}_{\text{C0}}) - \dot{U}_{\text{B0}}) + (\dot{U}_{\text{НИ}} - \dot{U}_{\text{ИК}}) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$	$\dot{U}_{\text{кцн}} = ((\dot{U}_{\text{A0}} + \dot{U}_{\text{C0}}) - \dot{U}_{\text{B0}}) + (\dot{U}_{\text{НИ}} - \dot{U}_{\text{ИК}}) \cdot \sqrt{3}$
<i>C</i>	$\dot{U}_{\text{кцн}} = ((\dot{U}_{\text{A0}} + \dot{U}_{\text{B0}}) - \dot{U}_{\text{C0}}) + (\dot{U}_{\text{НИ}} - \dot{U}_{\text{ИК}}) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$	$\dot{U}_{\text{кцн}} = ((\dot{U}_{\text{A0}} + \dot{U}_{\text{B0}}) - \dot{U}_{\text{C0}}) + (\dot{U}_{\text{НИ}} - \dot{U}_{\text{ИК}}) \cdot \sqrt{3},$

где $\dot{U}_{\text{A0}}, \dot{U}_{\text{B0}}, \dot{U}_{\text{C0}}$ – векторы фазных напряжений;

$\dot{U}_{\text{НИ}}$ – вектор напряжения между выводами «Н» и «И» дополнительной обмотки ТН;

$\dot{U}_{\text{ИК}}$ – вектор напряжения между выводами «И» и «К» дополнительной обмотки ТН.

В условиях, когда действующее значение напряжения $\dot{U}_{\text{кцн}}$ превышает значение 10 В, алгоритм формирует сигнал «НЦН».

5.4. Сигнал «НЦН» вырабатывается также при отсутствии всех пяти входных напряжений⁴.

При этом блокирование всех ступеней ДЗМФ происходит по истечении промежутка времени, определяемого уставкой $T_{\text{НЦН}}$.

Для исключения ложного срабатывания ступеней ДЗМФ, не контролируемых алгоритмом «УБК», необходимо задавать уставку по времени $T_{\text{НЦН}}$, меньшую, чем время срабатывания данных ступеней на ступень селективности Δt . Значение $\Delta t = 0,3 \div 0,4$ с.

При близких КЗ также возможно исчезновение всех пяти напряжений, в связи с этим рекомендуется первые две ступени ДЗМФ всегда выполнять с контролем от алгоритма «УБК».

Уставку по времени $T_{\text{НЦН}}$ в данном случае необходимо задавать на ступень селективности Δt больше, чем время срабатывания данных ступеней. Значение $\Delta t = 0,3 \div 0,4$ с.

В случае обрыва нулевого провода корректная работа РС ДЗМФ сохраняется.

При появлении сигнала «НЦН» происходит блокирование РС и срабатывает вызывная сигнализация.

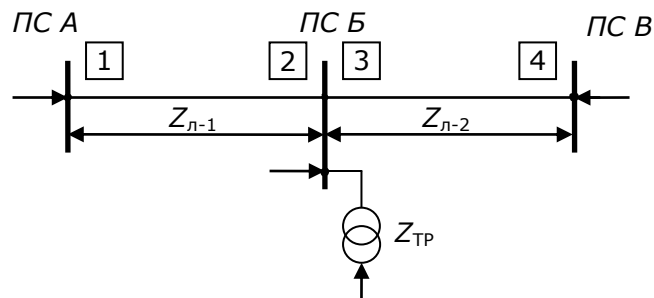
⁴ Ситуация возможна при обрывах контрольных кабелей, отключении автоматических выключателей или выгорании плавких вставок ТН.

6. Расчет ДЗ одиночных линий напряжением 35 - 220 кВ

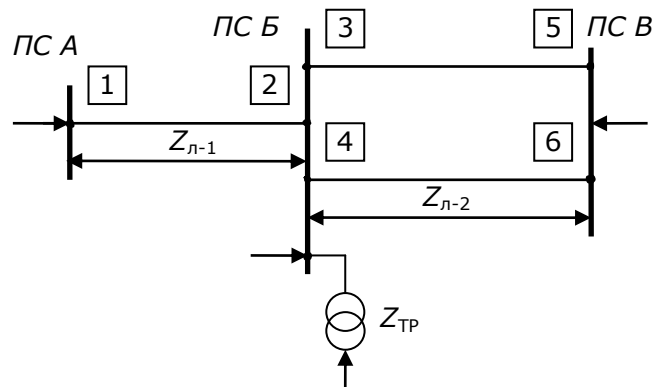
6.1. Особенность микропроцессорной защиты БМРЗ заключается в том, что уставки по полному сопротивлению, по углу линии и по активному сопротивлению задаются отдельно. Ниже приведена методика выбора уставок по полному сопротивлению. Выбор уставки по активному сопротивлению приведен в разделе 11.

Сопротивления срабатывания первой $Z_{C.3}^I$ и второй $Z_{C.3}^{II}$ ступеней ДЗ одиночных линий с двусторонним (рис. 6.1, а-г) и односторонним (рис. 6.1, д) питанием определяют для случаев металлических КЗ по выражениям, приведённым в табл. 6.1. Результаты расчётов соответствуют первичным значениям.

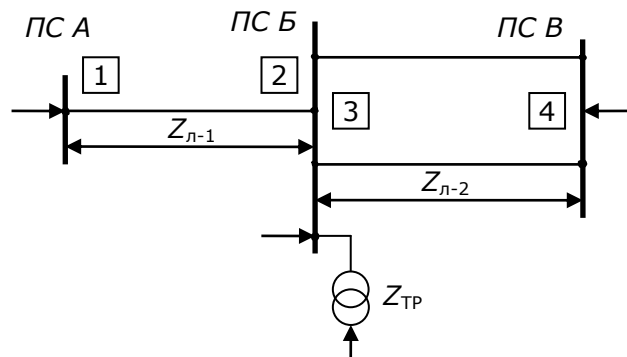
а)



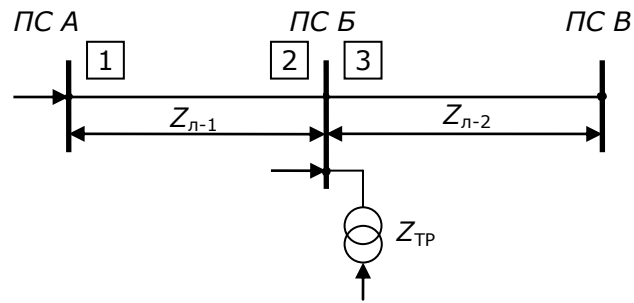
б)



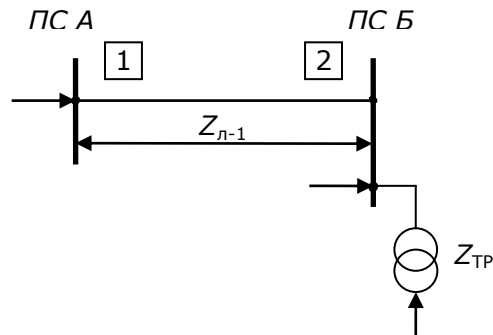
в)



з)



д)



$Z_{л-1}$, $Z_{л-2}$ – сопротивления линий, $Z_{ТР}$ – минимальное эквивалентное сопротивление параллельно работающих трансформаторов на ПС Б

Рис. 6.1. Примеры схем участков сети с одиночными линиями

В выражениях, приведенных в табл. 6.1, под первой ступенью защиты подразумевают ступень без выдержки времени, а под второй – ступень с выдержкой времени, равной ступени селективности Δt .

Выражения табл. 6.1 применяются при использовании ДЗ в качестве основной или резервной защиты.

В качестве сопротивления срабатывания для второй ступени принимают наименьшее из сопротивлений, полученных по приведённым расчётным условиям.

Таблица 6.1

Расчётные выражения для сопротивлений срабатывания I и II ступеней ДЗ одиночных линий

Ступень защиты	Вариант расчёта (исходные схемы)	Расчётное условие	Расчётное выражение для полного сопротивления		условие обеспечения чувствительности $Z''_{с.з.1} \geq 1,25Z_{л-1}$
			в общем виде	при принятых значениях коэффициентов (см. примечание 2)	
I	1 рис. 6.1, а–г	Отстройка от КЗ на шинах ПС, примыкающей к противоположному концу линии	$Z'_{с.з.1} \leq \frac{Z_{л-1}}{1 + \beta + \delta} \quad (1)$	$Z'_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot Z_{л-1} \quad (6)$	Не требует проверки
	2 рис. 6.1, д	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС Б	$Z'_{с.з.1} \leq \frac{Z_{л-1} + Z_{TP}}{1 + \beta + \delta} \quad (2)$	$Z'_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_{л-1} + Z_{TP}) \quad (7)$	$\frac{Z_{TP}}{Z_{л-1}} \geq 0,47$
II	3 рис. 6.1, а	Согласование с первой ступенью защиты 3	$Z''_{с.з.1} \leq \frac{Z_{л-1} + \frac{1-\alpha}{k_{Т.ИИ}} Z'_{с.з.3}}{1 + \beta + \delta} \quad (3)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot Z_{л-1} + \frac{0,66}{k_{Т.ИИ}} Z_{л-2} \quad (8)$	$\frac{Z_{л-2}}{Z_{л-1}} \geq 0,6k_{Т.ИИ}$
	4 рис. 6.1, г			$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot Z_{л-1} + \frac{0,78}{k_{Т.ИИ}} Z'_{с.з.3} \quad (9)$	$\frac{Z'_{с.з.3}}{Z_{л-1}} \geq 0,51k_{Т.ИИ}$
	5 рис. 6.1, б, в	Отстройка от КЗ на шинах ПС В при двух линиях на участке ПС Б – ПС В	$Z''_{с.з.1} \leq \frac{Z_{л-1} + \frac{1}{k_{Т.ИИ}} 0,5Z_{л-2}}{1 + \beta + \delta} \quad (4)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot Z_{л-1} + \frac{0,43}{k_{Т.ИИ}} Z_{л-2} \quad (10)$	$\frac{Z_{л-2}}{Z_{л-1}} \geq 0,93k_{Т.ИИ}$
	6 рис. 6.1, а–г	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС Б	$Z''_{с.з.1} \leq \frac{Z_{л-1} + \frac{Z_{TP}}{k_{Т.ТП}}}{1 + \beta + \delta} \quad (5)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_{л-1} + \frac{Z_{TP}}{k_{Т.ТП}}) \quad (11)$	$\frac{Z_{TP}}{Z_{л-1}} \geq 0,47k_{Т.ТП}$

Примечания:

1. Выражения даны для определения сопротивлений срабатывания первой $Z'_{с.з.1}$ и второй $Z''_{с.з.1}$ ступеней применительно к защите I одиночных линий по схемам на рис. 6.1.
2. Выражения (6) – (11) и соотношения, обеспечивающие требуемую чувствительность второй ступени, составлены для коэффициентов $\alpha = 0,1$; $\beta = 0,05$ и $\delta = 0,1$.
3. Расчётные выражения варианта расчёта 6 даны для случая равенства сопротивлений параллельных линий одного участка.

6.2. В выражениях для расчёта сопротивлений срабатывания (табл. 6.1) с помощью коэффициентов δ , α и β учитывают (см. рис. 6.2):

- погрешность, вызванную неточностью расчёта первичных электрических величин (влияет как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения защищаемой зоны), и необходимый запас. Значение коэффициента δ принимают равным $\delta = 0,1$;
- погрешности ТТ и ТН и релейной аппаратуры (α – в сторону уменьшения, β – в сторону увеличения защищаемой зоны).

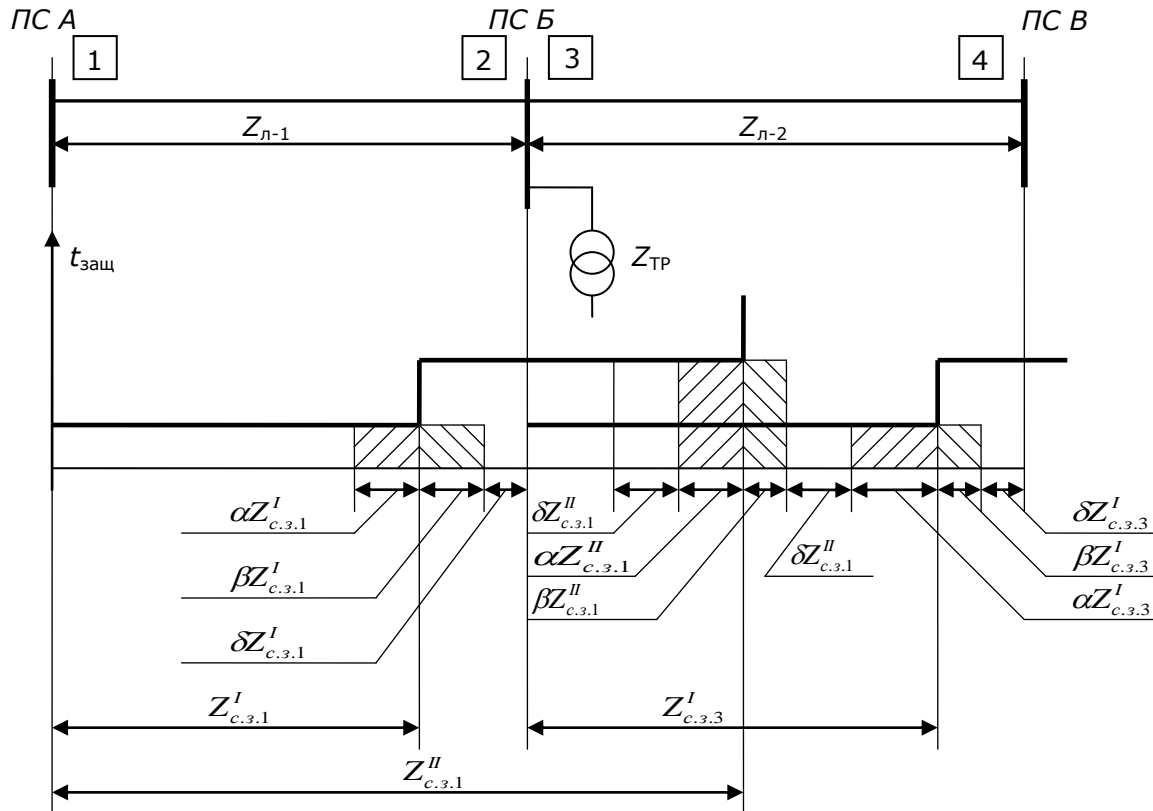


Рис. 6.2 Погрешности работы ДЗ

Погрешности ТТ действуют в сторону уменьшения защищаемой зоны, а ТН и реле (из-за разброса характеристик) – в сторону увеличения или уменьшения защищаемой зоны.

Коэффициент α должен быть больше коэффициента β .

Значения коэффициентов в табл. 6.1 принимают: $\alpha = 0,1$, $\beta = 0,05$. Приведенные здесь ориентировочные значения коэффициентов α и β могут быть уточнены при наладке защиты.

6.3. Для повышения чувствительности ДЗ тупиковых линий целесообразно выбирать сопротивление срабатывания первой ступени из условия отстройки от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения подстанции, примыкающей к противоположному (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу линии (табл. 6.1, вариант расчёта 2).

6.4. В выражениях (3)–(5) и (8)–(11) табл. 6.1 для выбора сопротивления второй ступени ДЗ необходимо учитывать коэффициент токораспределения k_T , который равен отношению первичного тока в защите к току в рассматриваемом участке (рис. 6.3).

Токи КЗ для определения расчётного значения коэффициента k_T можно рассчитывать для момента времени $t = 0$.

Расчётный коэффициент k_T соответствует наименьшему возможному значению сопротивления в месте установки рассматриваемой защиты.

На рис. 6.3 приведены формулы для определения значений коэффициента токораспределения k_T , входящего в расчётные выражения, используемые в табл. 6.1.

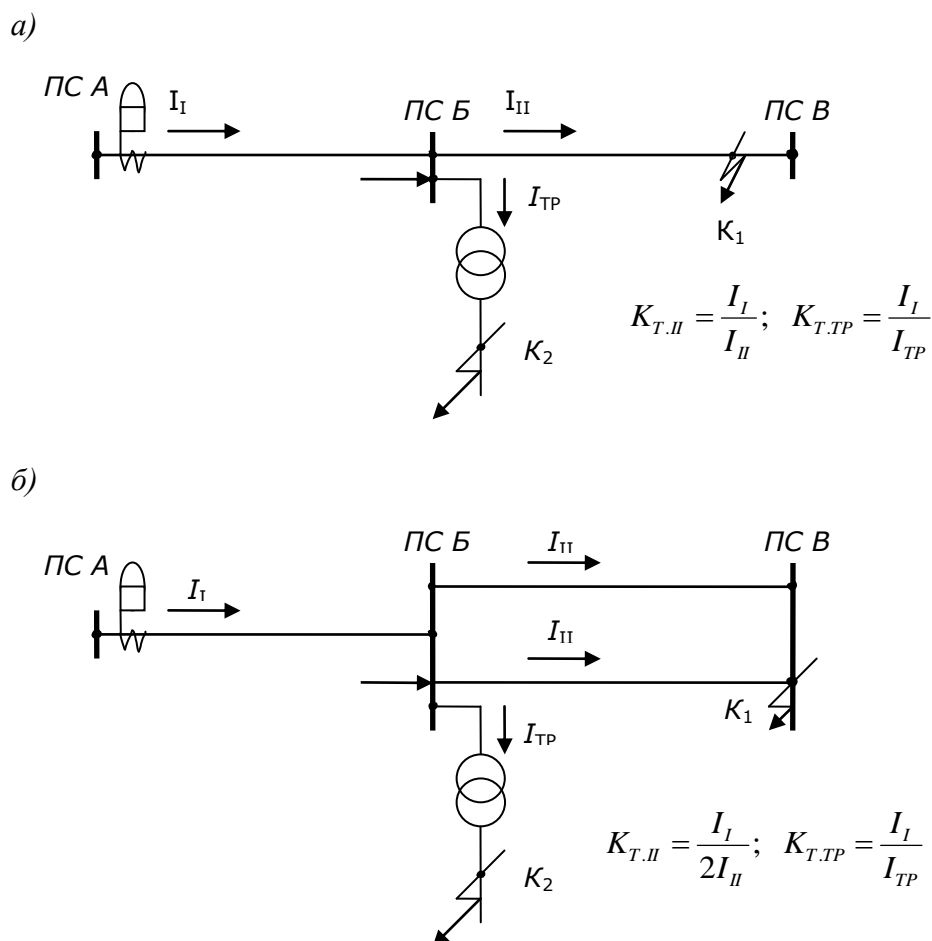


Рис. 6.3. Примеры определения коэффициента токораспределения k_T для одиночных линий

6.5. В схемах, аналогичных приведённым на рис. 6.1, б, в необходимо учитывать условие отстройки от КЗ на шинах ПС В (табл. 6.1, вариант расчёта 5), поскольку даже при наличии специальной защиты шин необходимо считаться с возможностью её вывода или отказа.

6.6. Расчёт сопротивления срабатывания второй ступени защиты по условию отстройки от КЗ на стороне низшего (среднего) напряжения трансформаторов (автотрансформаторов) подстанции, примыкающей к противоположному (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу защищаемого участка осуществляют в соответствии с вариантом расчёта 6 (табл. 6.1).

В данном случае необходимо учитывать наименьшее сопротивление этих трансформаторов (автотрансформаторов), которое может иметь место при регулировании напряжения изменением коэффициента трансформации.

При применении для защиты трансформаторов подстанции, примыкающей к противоположному концу защищаемого участка, токовой отсечки (а не дифференциальной защиты), вторую ступень рассматриваемой ДЗ целесообразно согласовывать с токовой отсечкой вместо отстройки от токов КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения подстанции.

Согласование с токовой отсечкой производят аналогично тому, как согласовывают уставку второй ступени ДЗ с уставкой токовой отсечки, являющейся первой ступенью защиты предыдущего участка линии (п. 6.7).

6.7. Согласование уставки второй ступени ДЗ с уставкой первой ступени защиты предыдущего участка (при выполнении последней с помощью токовой отсечки, отсечки по напряжению или комбинированной отсечки по току и напряжению) производят по выражению, аналогичному (3) табл. 6.1:

$$Z_{с.з.1}'' \leq \frac{Z_{л-1} + \frac{Z_{расч}}{k_T}}{1 + \beta + \delta} = 0,85 \cdot (Z_{л-1} + \frac{Z_{расч}}{k_T}), \quad (6.1)$$

где $Z_{л-1}$ – сопротивление участка, на котором установлена согласуемая защита;

$Z_{расч}$ – сопротивление зоны, охватываемой защитой, с которой производят согласование в расчётных для согласования условиях при металлическом КЗ⁵;

k_T – коэффициент токораспределения в расчётных для согласования условиях.

При выполнении первой ступени защиты предыдущего участка с комбинированной отсечкой по току и напряжению, уставка ДЗ должна быть согласована с уставками токового органа и органа напряжения комбинированной отсечки по отдельности.

Условию согласования будет удовлетворять меньшее из полученных сопротивлений, поскольку зона работы комбинированного органа определяется наименьшей из зон срабатывания токового органа и органа напряжения.

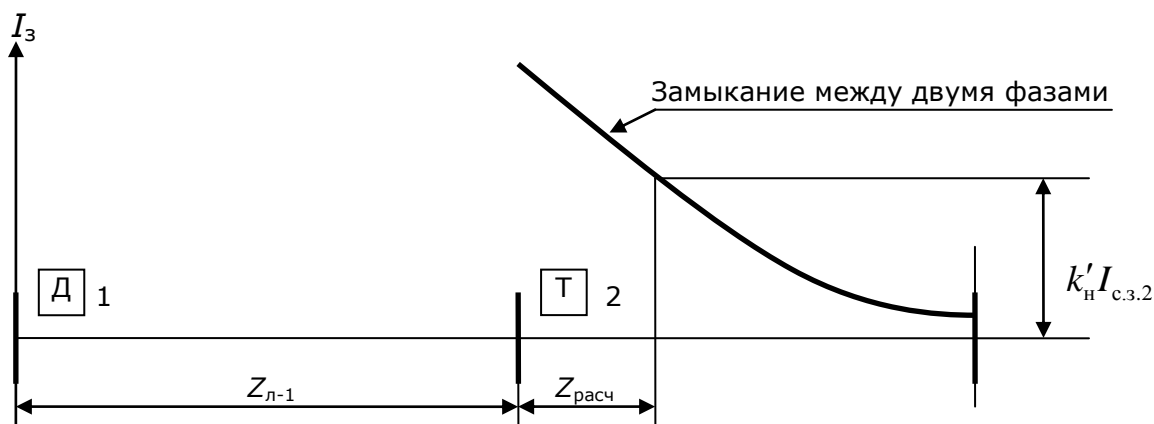
Сопротивление $Z_{расч}$, входящее в выражение (6.1), в общем случае может быть определено графически по кривым изменения:

- токов в защите при КЗ (рис. 6.4, а) – для согласования с уставкой токовой отсечки или токового органа комбинированной отсечки по току и напряжению;
- напряжений в месте установки защиты при КЗ (рис. 6.4, б) – для согласования с уставкой отсечки по напряжению или уставкой органа напряжения комбинированной отсечки по току и напряжению.

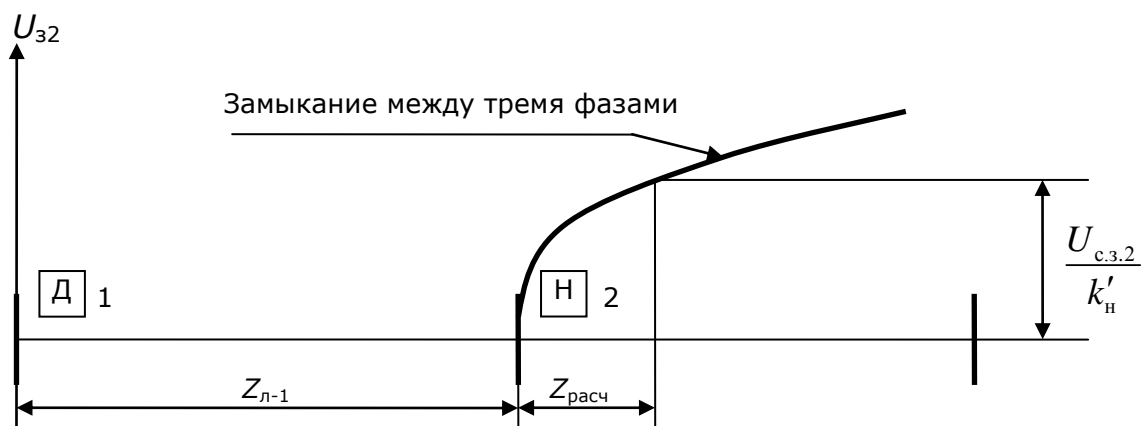
⁵ При этом коэффициент надёжности $k'_H = 1,1$.

Обе кривые построены для случая металлического КЗ в расчётных условиях, которым соответствует наименьшее из возможных значений отношения $Z_{\text{расч}}/k_T$.

а)



б)



Д – ДЗ;

Т – токовая отсечка или токовый орган комбинированной отсечки по току и напряжению;

Н – отсечка по напряжению или орган напряжения комбинированной отсечки по току и напряжению;

I_{32} и U_{32} – соответственно ток и напряжение в месте установки защиты 2 при металлическом КЗ в расчётных для согласования условиях;

$I_{сз2}$ и $U_{сз2}$ – соответственно ток и напряжение срабатывания защиты 2;

k'_H – коэффициент, учитывающий погрешность реле защиты 2 и погрешность в расчёте тока КЗ.

Рис. 6.4. Графическое определение $Z_{\text{расч}}$ для согласования уставок ДЗ с уставками токовой отсечки или токового органа комбинированной отсечки по току и напряжению (а) и уставками отсечки по напряжению или органа напряжения комбинированной отсечки по току и напряжению (б)

Согласование уставок ДЗ с уставками токовой отсечки или токового органа комбинированной отсечки по току и напряжению выполняют для КЗ между двумя фазами.

Вызвано это тем, что при данном КЗ ток обычно меньше, чем при других многофазных КЗ, а следовательно, меньше и сопротивление зоны, контролируемой токовым реле.

Расчётный режим работы сети:

- ток в месте установки защиты, с уставкой которой производят согласование, наименьший;
- ток в месте установки согласуемой защиты – по возможности наибольший.

Согласование уставок ДЗ с уставками отсечки по напряжению или органа напряжения комбинированной отсечки по току и напряжению выполняют для любого многофазного КЗ.

Сопротивление зоны, надёжно контролируемой реле напряжения, не зависит от вида многофазного КЗ.

Расчётный режим работы сети – ток в месте установки согласуемой ДЗ наибольший.

6.8. Выдержку времени второй ступени ДЗ при выборе сопротивления срабатывания по указанным выше условиям (п. 6.4–6.7) принимают на ступень Δt больше выдержки времени:

- быстродействующей защиты предыдущего участка, с которой производят согласование;
- защит без выдержки времени, установленных на трансформаторах подстанции, примыкающей к противоположному (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу защищаемого участка.

6.9. Коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}$ второй ступени ДЗ необходимо проверять для металлическом КЗ в конце защищаемого участка.

Минимальное значение коэффициента чувствительности может быть:

- 1,25 – при использовании двух либо трёх ступеней ДЗ, применяемой в качестве резервной;
- 1,50 – при использовании двух либо трёх ступеней ДЗ, применяемой в качестве основной.

6.10. В тех случаях, когда коэффициент чувствительности второй ступени ДЗ, выбранной в соответствии с указаниями, приведёнными в табл. 6.1 и в п. 6.5–6.8, меньше требуемого, сопротивление срабатывания и выдержку времени ДЗ необходимо уточнить, учитывая изложенное ниже.

6.10.1. Если сопротивление срабатывания согласовывали с первой ступенью защиты предыдущего участка (табл. 6.1, варианты расчёта 3 и 4), то необходимо согласовать его со второй ступенью этой же защиты.

6.10.2. Если сопротивление срабатывания выбирали по условиям отстройки от токов КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения подстанции, примыкающей к противоположному (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу защищаемого участка (табл. 6.1, вариант расчёта 6), то необходимо его согласовать с уставкой быстродействующей защиты элементов стороны низшего (среднего) напряжения рассматриваемой подстанции.

6.10.3. Если сопротивление срабатывания выбирали, исходя из отстройки от токов КЗ на шинах подстанции, примыкающей к дальнему (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу предыдущего участка (табл. 6.1, вариант расчёта 5), то его необходимо согласовать со второй ступенью защиты предыдущего участка как при включении защиты на ток одной линии (рис. 6.1, б), так и на сумму токов двух параллельных линий (рис. 6.1, в).

Если и в этом случае уставка не удовлетворяет требованию чувствительности

или, если вторая ступень защиты предыдущего участка имеет большую выдержку времени и, следовательно, согласование с ней приведёт к чрезмерному увеличению времени действия второй ступени защищаемого участка, то при наличии специальной защиты шин условие отстройки от токов КЗ на шинах подстанции, примыкающей к дальнему концу предыдущего участка, допустимо не учитывать.

В этом случае сопротивление срабатывания рассматриваемой ступени защиты принимают исходя из условия обеспечения минимального значения коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$ в соответствии с п. 6.9.

При этом вторая ступень рассматриваемой защиты в схеме (рис. 6.1, б) должна быть согласована с первой ступенью защиты 3 при каскадном отключении КЗ на участке ПС Б – ПС В.

При таком согласовании должен быть учтён коэффициент возврата ДО второй ступени защиты 1, так как ДО может сработать до начала каскадного отключения.

Согласование производят по выражениям (3) и (8) табл. 6.1, а знаменатель правой части выражений должен быть умножен на коэффициент возврата $k_{\text{в}}$.

В схеме, приведенной на рис. 6.1, в, должно быть произведено аналогичное согласование, но в режиме работы одной линии на участке ПС Б – ПС В. Так как только в этом случае вводится в действие первая ступень суммарной защиты 3; то согласование производится по выражениям (3) и (8) табл. 6.1.

Кроме того, выдержка времени второй ступени защиты 1 (в схеме на рис. 6.1, в) должна быть выбрана с учётом возможности каскадного действия поперечной дифференциальной направленной защиты (которая предполагается установленной на параллельных линиях участка ПС Б – ПС В).

Если же вторая ступень защиты 1 (с учётом коэффициента возврата) окажется отстроенной от КЗ на границе зоны каскадного действия поперечной дифференциальной направленной защиты со стороны ПС В, каскадное действие защиты можно не учитывать.

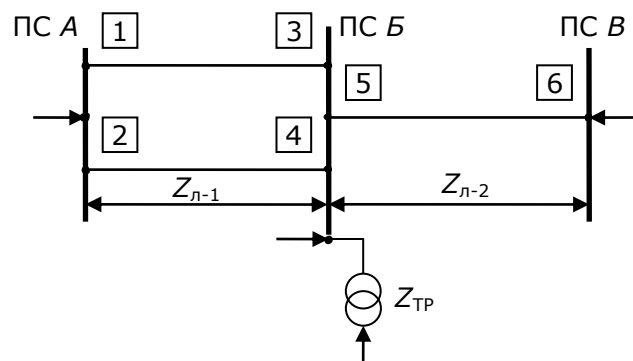
6.11. При согласовании с первой ступенью защиты предыдущего участка (табл. 6.1, вариант расчёта 3) может потребоваться учёт коэффициента возврата, когда из-за влияния коэффициента токораспределения защита недопустимо загрубляется.

7. Расчет ДЗ для двух параллельных линий напряжением 35–220 кВ

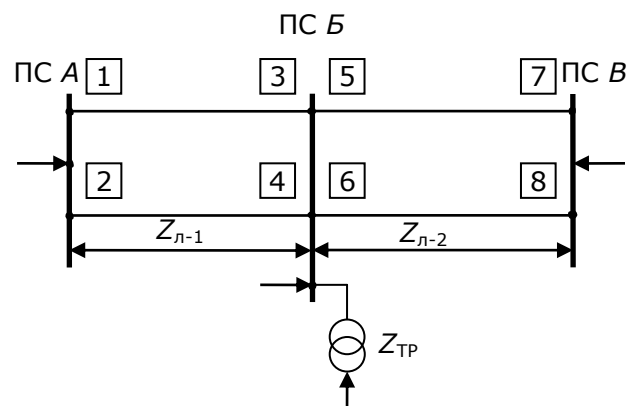
7.1. Сопротивление срабатывания $Z_{\text{с.з}}^I$ первой ступени ДЗ (выполненной без выдержки времени) параллельных линий с двусторонним (рис. 7.1, а–е) и односторонним питанием, кроме тупиковых, определяют, как и для защиты одиночных линий, по выражениям (1) и (6) табл. 6.1.

В случае включения рассматриваемой ДЗ на сумму токов двух линий (рис. 7.1, г – е) данный расчёт корректен, поскольку на рассматриваемых линиях первая ступень суммарной ДЗ вводится в действие только при отключении одной из параллельных линий.

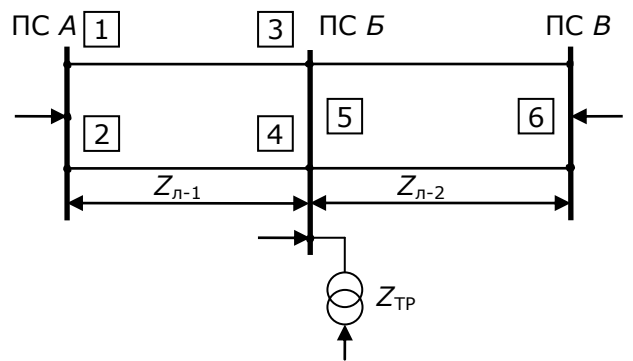
a)



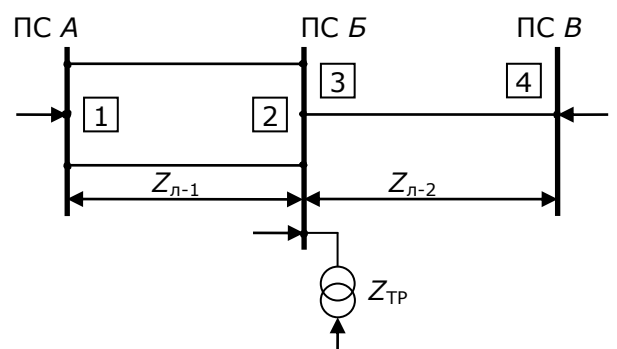
б)



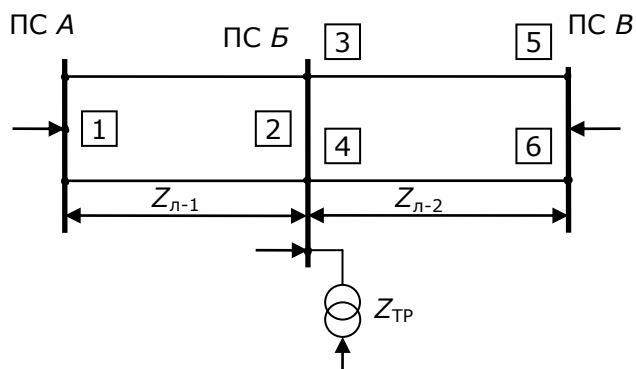
в)



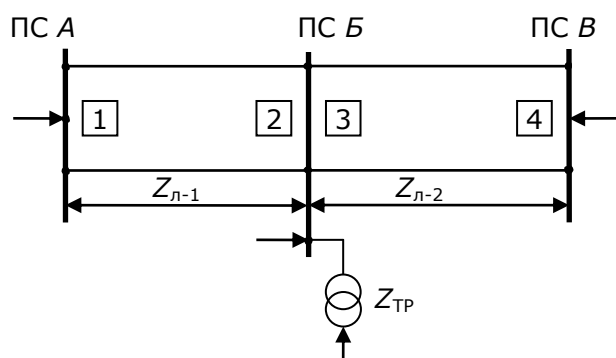
г)



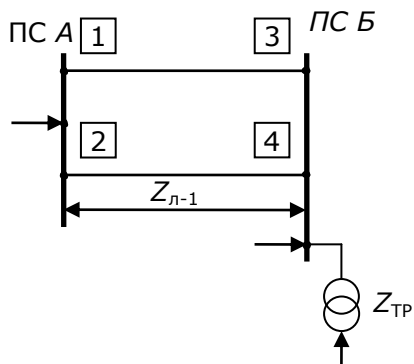
д)



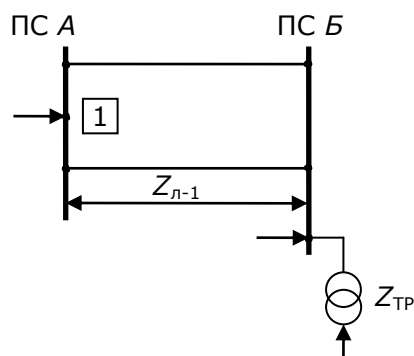
е)



ж)



з)



$Z_{л-1}$, $Z_{л-2}$ – сопротивления линий; $Z_{ТР}$ – минимальное эквивалентное сопротивление параллельно работающих трансформаторов на ПС Б

Рис. 7.1. Примеры схем участков сети с параллельными линиями

Сопротивление срабатывания $Z_{с.з}^I$ первой ступени ДЗ тупиковых параллельных линий определяют:

- по выражениям (1) и (6) из табл. 6.1 – при включении защиты на ток одной линии (рис. 7.1, *ж*);
- по выражениям (7) и (14) из табл. 7.1 – при включении защиты на сумму токов двух линий (рис. 7.1, *з*).

В последнем случае первую ступень защиты выполняют с выдержкой времени, равной ступени селективности. Уставки данной ступени защиты отстраивают от токов КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения приёмной подстанции аналогично тому, как отстраивают уставки второй ступени защиты.

7.2. Сопротивление срабатывания $Z_{с.з}^{II}$ второй ступени ДЗ параллельных линий с двусторонним (рис. 7.1, *а–е*) и односторонним (рис. 7.1 *ж, з*) питанием, выполненной с выдержкой времени, равной ступени селективности, определяют для случаев металлических КЗ по выражениям, приведённым в табл. 7.1.

В тех случаях, когда участок линии от ПС *Б* до ПС *В* для схем рисунка 7.1, *а, г* является тупиковым, согласование уставок второй ступени ДЗ с уставками первой ступени защиты 5 или 3 может производиться по выражениям (1) и (5), приведенным в табл. 7.1.

При этом сопротивление срабатывания защиты 5 или 3 должно определяться вариантом расчёта 2 по табл. 6.1.

Выражения, приведенные в табл. 7.1, действительны при использовании защиты в качестве:

- основной или резервной при работе одной или двух линий (ДЗ включена на ток одной линии);
- резервной при работе двух линий и основной или резервной при работе одной линии (ДЗ включена на сумму токов двух параллельных линий).

На рис. 7.2 приведены формулы для определения значений коэффициента токораспределения k_T , входящего в расчётные выражения, используемые в табл. 7.1.

В качестве расчётного значения коэффициента токораспределения k_T выбирают его наибольшее значение из полученных для всех реально возможных режимов работы (см. ниже п. 7.3 и 7.4).

В качестве сопротивления уставки для второй ступени ДЗ принимают наименьшее из сопротивлений, полученных по приведённым в табл. 7.1 расчётным условиям.

7.3. Выбор сопротивления срабатывания второй ступени ДЗ, включенной на ток одной линии (рис. 7.1, *а – в*).

7.3.1. В схеме на рис. 7.1, *а* необходимо согласовать уставку этой ступени с уставкой первой ступени защиты 5 (табл. 7.1, вариант расчёта 1) при отключении второй параллельной линии на участке ПС *А* – ПС *Б*.

7.3.2. В схемах на рис. 7.1, *б, в* необходимо отстроиться от токов КЗ на шинах ПС *В* для режима, когда на рассматриваемом участке ПС *А* – ПС *Б* работает одна линия, а на предыдущем участке ПС *Б* – ПС *В* – две линии в соответствии с вариантом расчёта 2 табл. 7.1 (учитывается случай выведения из действия предусмотренной для шин специальной защиты, её отказ или отсутствие).

Если вторая ступень рассматриваемой ДЗ не удовлетворяет требованию чувствительности к КЗ в конце защищаемого участка (коэффициент чувствительности не соответствует указанному в п. 6.9), то при наличии специальной защиты шин указанный режим допустимо не учитывать.

В этом случае, отстройка от токов КЗ на шинах производится для режима, когда

на участках ПС A – ПС B и ПС B – ПС B работают обе линии.

В схеме на рис. 7.1, б должно быть произведено также согласование рассматриваемой второй ступени защиты I с первой ступенью защиты 5 при каскадном отключении КЗ на линии ПС B – ПС B в режиме отключения параллельной линии на участке ПС A – ПС B .

При согласовании должен быть учтён коэффициент возврата ДО второй ступени защиты I , поскольку ДО может сработать до начала каскадного отключения. Согласование производится по выражениям (3) и (8) табл. 6.1, но знаменатель правой части выражений должен быть умножен на коэффициент возврата k_B .

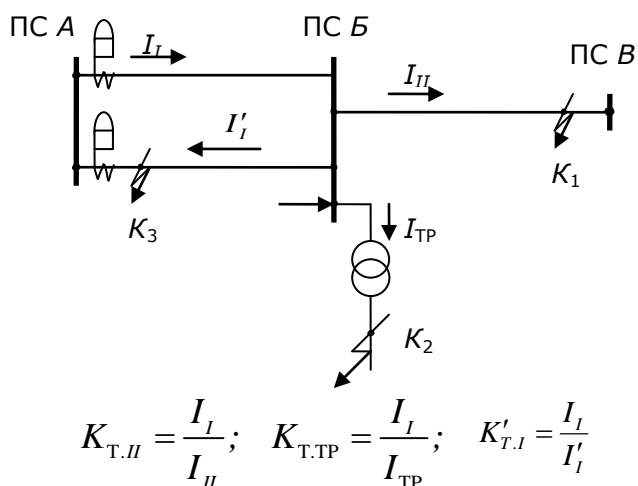
Таблица 7.1

Выражения для определения сопротивлений срабатывания второй ступени ДЗ параллельных линий

Включение защиты	Вариант расчёта (исходные схемы)	Расчётное условие	Расчётное число линий на участке ПС А–ПС В	Расчётное выражение		Условие обеспечения чувствительности $Z''_{с.з.1} \geq 1,25Z_{л-1}$
				в общем виде	при принятых значениях коэффициентов (примечание 2)	
На ток одной линии	1 рис. 7.1, а	Согласование с первой ступенью защиты предыдущего участка 5	Одна	$Z'_{с.з.1} \leq \frac{Z_{л-1} + \frac{1-\alpha}{k_{Т.И}} \cdot Z'_{с.з.5}}{1 + \beta + \delta} \quad (1)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot Z_{л-1} + \frac{0,66}{k_{Т.И}} Z_{л-2} \quad (8)$	$\frac{Z_{л-2}}{Z_{л-1}} \geq 0,6k_{Т.И}$
	2 рис. 7.1, б, в	Отстройка от КЗ на шинах ПС В при двух линиях на участке ПС В – ПС В		$Z''_{с.з.1} \leq \frac{Z_{л-1} + \frac{1}{k_{Т.И}} 0,5Z_{л-2}}{1 + \beta + \delta} \quad (2)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot Z_{л-1} + \frac{0,43}{k_{Т.И}} Z_{л-2} \quad (9)$	$\frac{Z_{л-2}}{Z_{л-1}} \geq 0,93k_{Т.И}$
	3 рис. 7.1, а, б, в, ж	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС В		$Z''_{с.з.1} \leq \frac{Z_{л-1} + \frac{Z_{Т.П}}{k_{Т.П}}}{1 + \beta + \delta} \quad (3)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_{л-1} + \frac{Z_{Т.П}}{k_{Т.П}}) \quad (10)$	$\frac{Z_{л-2}}{Z_{л-1}} \geq 0,47k_{Т.П}$
	4 рис. 7.1, а, б, в, ж	Согласование с первой ступенью защиты 4 при каскадном отключении КЗ на параллельной линии	Две	$Z''_{с.з.1} \leq \frac{Z_{л-1} + \frac{1-\alpha}{k'_{Т.И}} Z'_{с.з.4}}{1 + \beta + \delta} \quad (4)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot Z_{л-1} + \frac{0,66}{k'_{Т.И}} Z_{л-1} \quad (11)$	$k'_{Т.И} \leq 1,66$
На сумму токов двух линий	5 рис. 7.1, з	Согласование с первой ступенью защиты 3		$Z''_{с.з.1} \leq \frac{0,5 \cdot Z_{л-1} + \frac{1-\alpha}{k_{Т.И}} Z'_{с.з.3}}{1 + \beta + \delta} \quad (5)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,43 \cdot Z_{л-1} + \frac{0,66}{k_{Т.И}} Z_{л-2} \quad (12)$	$\frac{Z_{л-2}}{Z_{л-1}} \geq 1,25k_{Т.И}$
	6 рис. 7.1 д, е	Отстройка от КЗ на шинах ПС В при двух линиях на участке ПС В – ПС В		$Z''_{с.з.1} \leq \frac{0,5 \cdot Z_{л-1} + \frac{1}{k_{Т.И}} \cdot 0,5 \cdot Z_{л-2}}{1 + \beta + \delta} \quad (6)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,43 \cdot (Z_{л-1} + \frac{Z_{л-2}}{k_{Т.И}}) \quad (13)$	$\frac{Z_{л-2}}{Z_{л-1}} \geq 1,91k_{Т.И}$

	7 рис. 7.1, <i>з</i> , <i>д</i> , <i>е</i> , <i>з</i>	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС <i>Б</i>	$Z_{с.з.1}'' \leq \frac{0,5 \cdot Z_{л-1} + \frac{Z_{TP}}{k_{T,TP}}}{1 + \beta + \delta} \quad (7)$	$Z_{с.з.1}'' \lesssim 0,43 \cdot Z_{л-1} + \frac{0,85}{k_{T,TP}} Z_{TP} \quad (14)$	$\frac{Z_{TP}}{Z_{л-1}} \geq 0,97 k_{T,TP}$
<p>Примечания:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. В таблице даны выражения для определения сопротивлений срабатывания применительно к защите <i>1</i> по схемам на рис. 7.1. 2. Значения коэффициентов даны в примечании 2 к табл. 6.1. 3. Расчётные выражения даны для случая равенства сопротивлений параллельных линий одного участка. 4. Соотношение, обеспечивающее требуемую чувствительность второй ступени защиты, включенной на сумму токов параллельных линий, при КЗ в конце линии $Z_{с.з.1}'' \geq 1,25 Z_{л-1}$ приведено для случая отключения одной из параллельных линий. 					

а)



б)

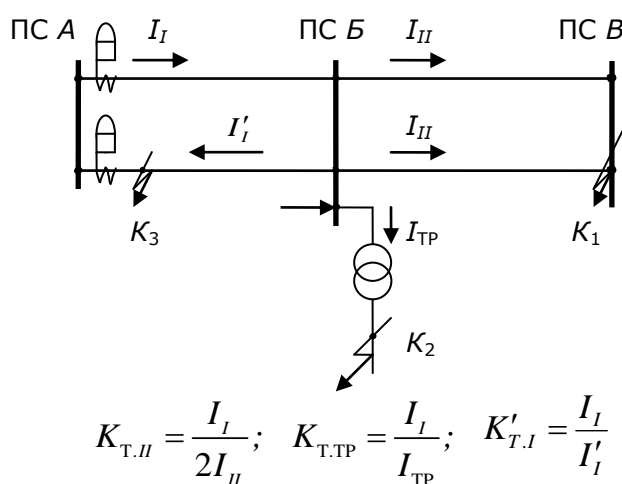


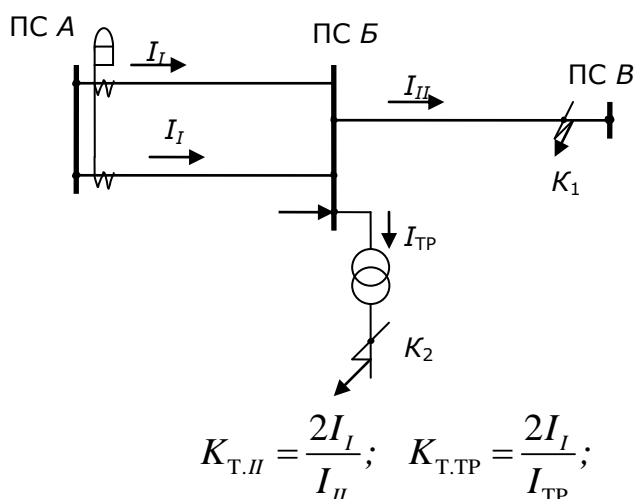
Рис. 7.2, а, б. Примеры определения коэффициента токораспределения k_T для параллельных линий

Для схемы рис. 7.1, в аналогичного согласования в этом случае не требуется, поскольку не следует рассматривать режим работы одной линией одновременно на участках ПС А – ПС Б и ПС Б – ПС В⁶.

Выдержка времени второй ступени защиты I должна быть выбрана с учётом возможности каскадного действия поперечной дифференциальной направленной защиты, которая предполагается установленной на параллельных линиях участка ПС Б – ПС В.

⁶ Первая ступень защиты 5 вводится в действие только при отключении одной из линий на участке ПС Б – ПС В.

в)



в)

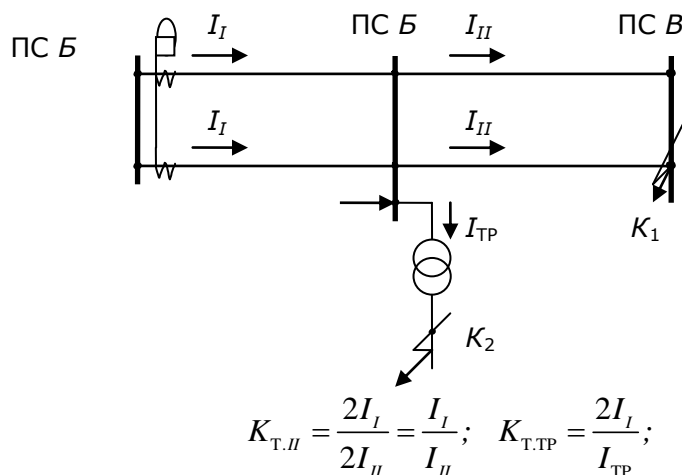


Рис. 7.2, в,г. Примеры определения коэффициента токораспределения k_T для параллельных линий

7.3.3. В схемах на рис. 7.1, а–в, ж необходимо отстроиться от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС Б в соответствии с вариантом расчёта 3 табл. 7.1 в режиме, когда на рассматриваемом участке ПС А – ПС Б работает одна линия. В схемах на рис. 7.1, б, в, кроме указанного, должен рассматриваться также режим работы одной линии на участке ПС Б – ПС В; расчётным явится тот режим, которому будет соответствовать большее значение коэффициента токораспределения k_T .

7.3.4. В схемах на рис. 7.1, а–в, ж необходимо согласовать уставку данной ступени с уставкой первой ступени защиты 4 (вариант расчёта 4 табл. 7.1) для случая замыкания на параллельной линии и каскадном её отключении.

7.3.5. В тех случаях, когда вторая ступень ДЗ, выбранная в соответствии с п. 7.3.1–7.3.3, не удовлетворяет требованию чувствительности, целесообразно её сопротивление срабатывания и выдержку времени выбирать в соответствии с указаниями раздела 6, п. 10.

7.4. Выбор сопротивления срабатывания второй ступени ДЗ, включенной на сумму токов параллельных линий (рис. 7.1, $г-е, з$)

7.4.1. В схеме на рис. 7.1, $г$ необходимо согласовать уставку данной ступени с уставкой первой ступени защиты 3 (табл. 7.1, вариант расчёта 5) в режиме работы обеих линий на участке ПС А – ПС Б.

7.4.2. В схемах на рис. 7.1, $д, е$ необходимо отстроиться от КЗ на шинах ПС В в соответствии с вариантом расчёта 6 табл. 7.1 в режиме работы обеих линий на участке ПС А – ПС Б и ПС Б – ПС В (учитывается случай выведения из действия предусмотренной для шин специальной защиты, её отказ или отсутствие последней).

7.4.3. В схемах на рис. 7.1, $г-е, з$ необходимо отстроиться от токов КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС Б в режиме, когда на участке ПС А – ПС Б работают обе линии, а на участке ПС Б – ПС В – одна линия.

7.4.4. В тех случаях, когда уставка второй ступени ДЗ, выбранная по условиям селективности в режиме работы обеих линий на участке ПС А – ПС Б (табл. 7.1, варианты расчёта 5–7), не удовлетворяет требованию чувствительности к КЗ в конце защищаемого участка при работе одной линии на участке ПС А – ПС Б, необходимо отдельно рассчитать уставку второй ступени для данного режима работы.

При изменении режима необходимо произвести смену программ уставок. При этом сопротивление срабатывания второй ступени, на которое переключается защита после отключения параллельной линии, рассчитывается аналогично вариантам расчёта 3 – 6 табл. 6.1 для расчёта защит одиночных линий.

Области, в которых защита, выбранная по условиям селективности в режиме работы обеих линий на участке ПС А – ПС Б, удовлетворяет требованию чувствительности к КЗ в конце защищаемого участка и при работе одной линии на участке ПС А – ПС Б, ограничены снизу линиями ①, ②, ③ (рис. 7.3).

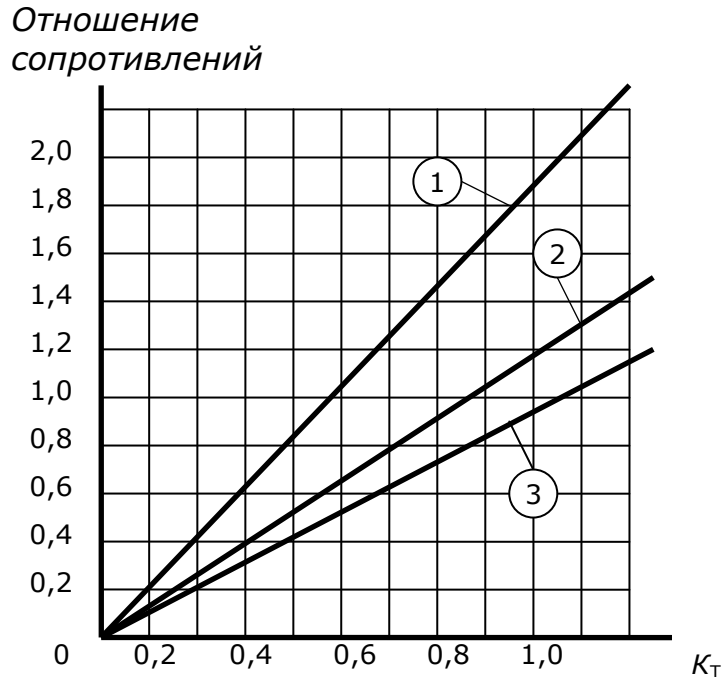
Линия ① соответствует случаю, когда уставка второй ступени суммарной ДЗ выбрана такой, которая обеспечивает отстройку от тока КЗ на шинах ПС В в схемах на рис. 7.1, $д, е$ ($\frac{Z_{л-2}}{Z_{л-1}} \geq 1,91k_T$, см. вариант расчёта 6 табл. 7.1).

Линия ② соответствует случаю, когда уставка второй ступени суммарной ДЗ согласована с уставкой защитой 3 в схеме рис. 7.1, $г$ ($\frac{Z_{л-2}}{Z_{л-1}} \geq 1,25k_T$, см. вариант расчёта 5 табл. 7.1).

Линия ③ соответствует случаю, когда уставка второй ступени суммарной ДЗ выбрана такой, которая обеспечивает отстройку от тока КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения трансформаторов ПС Б в схемах на рис. 7.1, $г-е$ ($\frac{Z_{ТР}}{Z_{л-1}} \geq 0,97k_T$, см. вариант расчёта 7 табл. 7.1).

7.5. Выдержку времени второй ступени ДЗ, включенной на сумму токов параллельных линий, необходимо отстроить от времени каскадного отключения одной из параллельных линий поперечной дифференциальной направленной защитой, если последняя использована в качестве основной защиты этих линий.

7.6. Проверка чувствительности второй ступени ДЗ и её согласование с защитами тока и напряжения, установленными на предыдущих участках производят так же, как для защиты одиночных линий (раздел 6), с тем только отличием, что для суммарной защиты определение чувствительности необходимо производить по режиму работы одной из параллельных линий рассматриваемого участка.



Отношение сопротивлений – $Z_{л-2} / Z_{л-1}$ или $Z_{ТР} / Z_{л-1}$;

Линия ① – $\frac{Z_{л-2}}{Z_{л-1}} \geq 1,91k_T$; Линия ② – $\frac{Z_{л-2}}{Z_{л-1}} \geq 1,25k_T$; Линия ③ – $\frac{Z_{ТР}}{Z_{л-1}} \geq 0,97k_T$;

k_T – коэффициент токораспределения.

Рис. 7.3. Области, в которых ДЗ отвечает требованиям чувствительности

8. Расчет ДЗ одиночных и параллельных линий напряжением 35 – 220 кВ с ответвлениями

8.1. Определение сопротивлений срабатывания первой $Z_{с.з}^I$ и второй $Z_{с.з}^{II}$ ступеней ДЗ линий с ответвлениями, а также определение коэффициентов чувствительности этой защиты следует производить с учётом токораспределения на отдельных участках линии.

При этом коэффициент токораспределения k_T следует выбирать:

- максимально возможный – для расчёта сопротивлений срабатывания;
- минимально возможный – для определения коэффициента чувствительности.

8.2. При определении сопротивлений срабатывания первой $Z_{с.з}^I$ и второй $Z_{с.з}^{II}$ ступеней ДЗ линий с ответвлениями в дополнение к расчётным условиям для защит линий без ответвлений необходимо проверить отстройку от токов КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения подстанции на ответвлении.

При этом должны рассматриваться КЗ за трансформаторами с наименьшими приведёнными реактивными сопротивлениями и расположенными ближе к месту установки рассматриваемой защиты.

8.3. Сопротивления срабатывания первой $Z_{с.з}^I$ и второй $Z_{с.з}^{II}$ ступеней ДЗ линий с ответвлениями определяют:

- по выражениям из табл. 8.1 – для одиночных линий с ответвлениями (схемы на рис. 8.1);
- по выражениям из табл. 8.2 – для параллельных линий с ответвлениями (схемы на рис. 8.3).

Выражения для определения значений коэффициентов токораспределения k_T , входящих в расчётные выражения табл. 8.1 и 8.2, приведены:

- на рис. 8.2 – для одиночных линий с ответвлениями (рис. 8.1);
- на рис. 8.4 – для параллельных линий с ответвлениями (рис. 8.3).

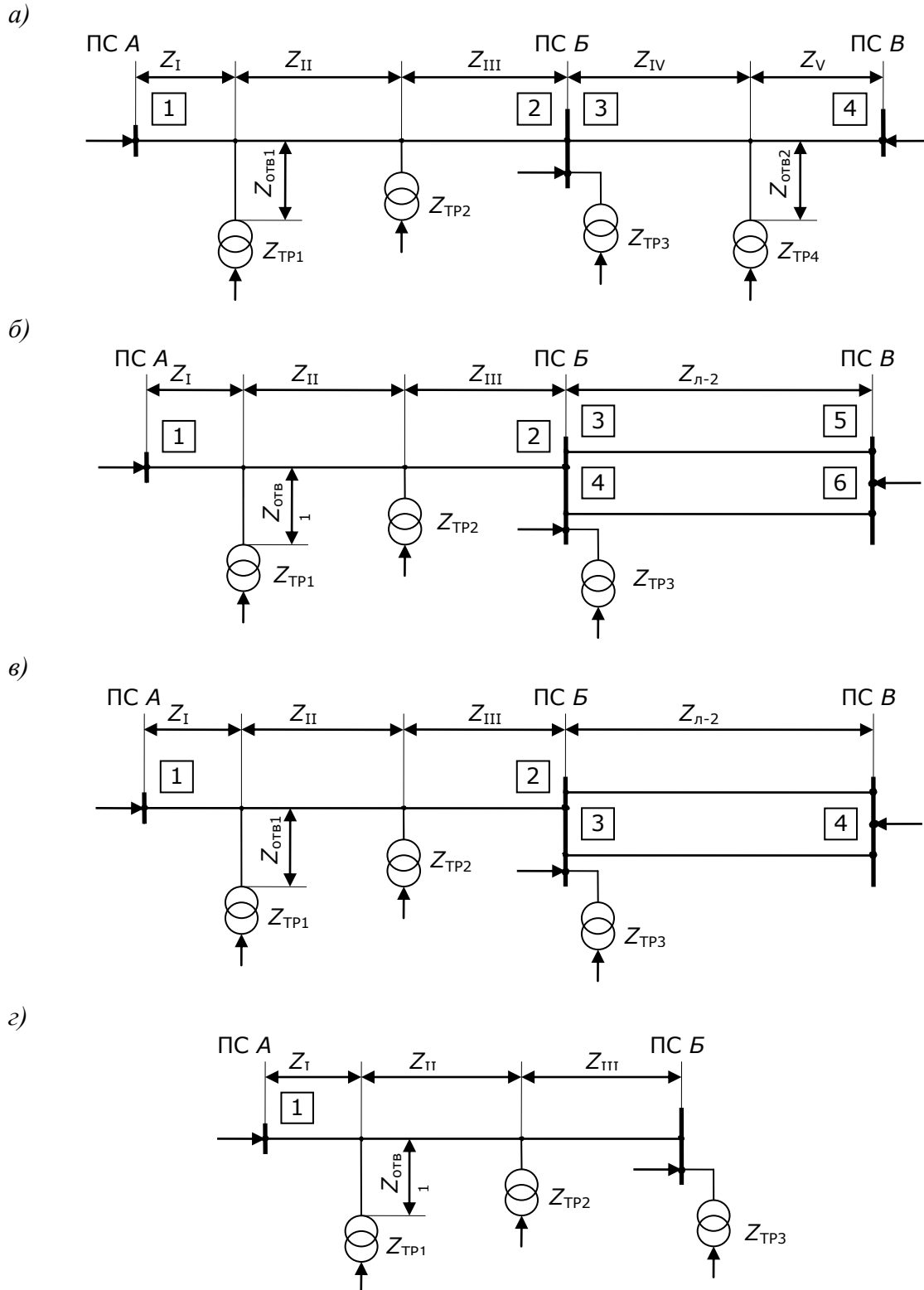
В качестве сопротивления срабатывания для первой и второй ступеней защиты принимаются наименьшие из сопротивлений, полученных по приведенным в табл. 8.1 и 8.2 расчётным условиям.

8.4. В схемах на рис. 8.1, *а–г* и 8.3, *а* отстройку от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения подстанций на ответвлениях необходимо производить в соответствии со следующими вариантами расчёта:

- варианты расчёта 3 и 4 табл. 8.1 – для схем по рис. 8.1, *а–г*;
- варианты расчёта 2 и 3 табл. 8.2 – для схемы по рис. 8.3, *а*.

8.4.1. При этом необходимо рассматривать следующие режимы работы:

- часть подстанций на ответвлениях отключена, на других включено минимальное возможное число источников питания;
- защищаемая линия отключена со стороны, противоположной месту установки рассматриваемой защиты. Указанный режим должен учитываться в тех случаях, когда на подстанции, примыкающей к противоположному (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу линии, отсутствует обходной выключатель.



Z_{TP1} , Z_{TP2} , Z_{TP3} , Z_{TP4} – минимальное эквивалентное сопротивление параллельно работающих трансформаторов; Z_I , Z_{II} , Z_{III} , Z_{IV} , Z_V – сопротивление отдельных участков защищаемой и предыдущей линий; Z_{OTB1} , Z_{OTB2} – сопротивления ответвлений; $Z_{л-2}$ – сопротивление предыдущей линии.

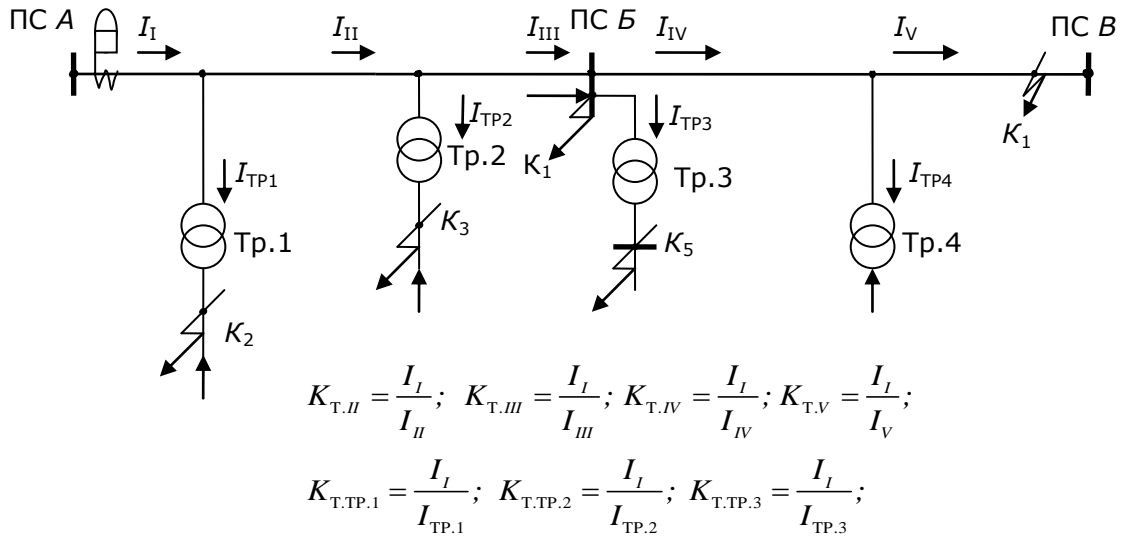
Рис. 8.1. Примеры схем одиночных линий с ответвлениями

Выражения для определения сопротивлений срабатывания ДЗ одиночных линий с ответвлениями

Ступень защиты	Вариант расчёта (исходные схемы)	Расчётное условие	Расчётное выражение	
			в общем виде	при принятых значениях коэффициентов (примечание 2)
I	1 рис. 8.1, а-в	Отстройка от КЗ на шинах ПС, примыкающей к противоположному концу линии	$Z'_{с.3.1} \leq \frac{Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}}}{1 + \beta + \delta} \quad (1)$	$Z'_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}}) \quad (8)$
	2 рис. 8.1, г	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС В	$Z'_{с.3.1} \leq \frac{Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}} + \frac{Z_{TP.3}}{k_{T,III}}}{1 + \beta + \delta} \quad (2)$	$Z'_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III} + Z_{TP.3}}{k_{T,III}}) \quad (9)$
I и II	3 рис. 8.1, а-г	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС на ответвлениях	$Z_{с.3.1} \leq \frac{Z_I + \frac{Z_{отвл} + Z_{TP.1}}{k_{T,TP.1}}}{1 + \beta + \delta} \quad (3)$	$Z_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_I + \frac{Z_{отвл} + Z_{TP.1}}{k_{T,TP.1}}) \quad (10)$
	4 рис. 8.1, а-г	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС на ответвлениях	$Z_{с.3.1} \leq \frac{Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{TP.2}}{k_{T,TP.2}}}{1 + \beta + \delta} \quad (4)$	$Z_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{TP.2}}{k_{T,TP.2}}) \quad (11)$
II	5 рис. 8.1, а	Согласование с первой ступенью защиты 3	$Z''_{с.3.1} \leq \frac{Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}} + \frac{1-\alpha}{k_{T,IV}} \cdot Z_{IV} + \frac{1-\alpha}{k_{T,V}} \cdot (Z'_{с.3.3} - Z_{IV})}{1 + \beta + \delta} \quad (5)$	$Z''_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}}) + 0,78 \cdot (\frac{Z_{IV}}{k_{T,IV}} + \frac{Z'_{с.3.3}}{k_{T,V}} - \frac{Z_{IV}}{k_{T,V}}) \quad (12)$
II	6 рис. 8.1, б-в	Отстройка от КЗ на шинах ПС В при двух линиях на участке ПС Б – ПС В	$Z''_{с.3.1} \leq \frac{Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}} + \frac{0,5 \cdot Z_{л-2}}{k_{T,IV}}}{1 + \beta + \delta} \quad (6)$	$Z''_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}}) + \frac{0,43}{k_{T,IV}} \cdot Z_{л-2} \quad (13)$

	7 рис. 8.1, а–в	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС Б	$Z_{с.з.1}'' \leq \frac{Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{Т.И}} + \frac{Z_{III}}{k_{Т.ИИ}} + \frac{Z_{ТР.3}}{k_{Т.ТР.3}}}{1 + \beta + \delta} \quad (7)$	$Z_{с.з.1}'' \lesssim 0,85 \cdot (Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{Т.И}} + \frac{Z_{III}}{k_{Т.ИИ}} + \frac{Z_{ТР.3}}{k_{Т.ТР.3}}) \quad (14)$
<p>Примечания:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. В таблице даны выражения для определения сопротивлений срабатывания применительно к защите 1 одиночных линий с ответвлениями по схеме на рис. 8.1. 2. Принятые обозначения и значения коэффициентов даны на рис. 8.1 и в примечании 2 к табл. 6.1. 3. Выражения п. 6 даны для случая равенства сопротивлений параллельных линий предыдущего участка. 				

a)



б)

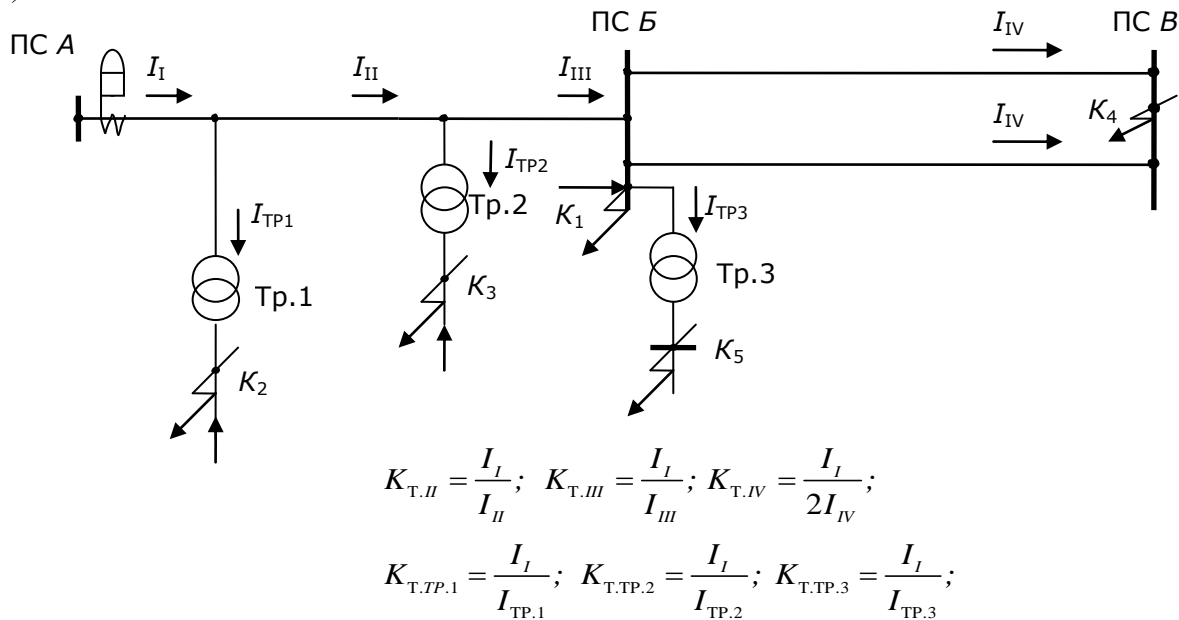
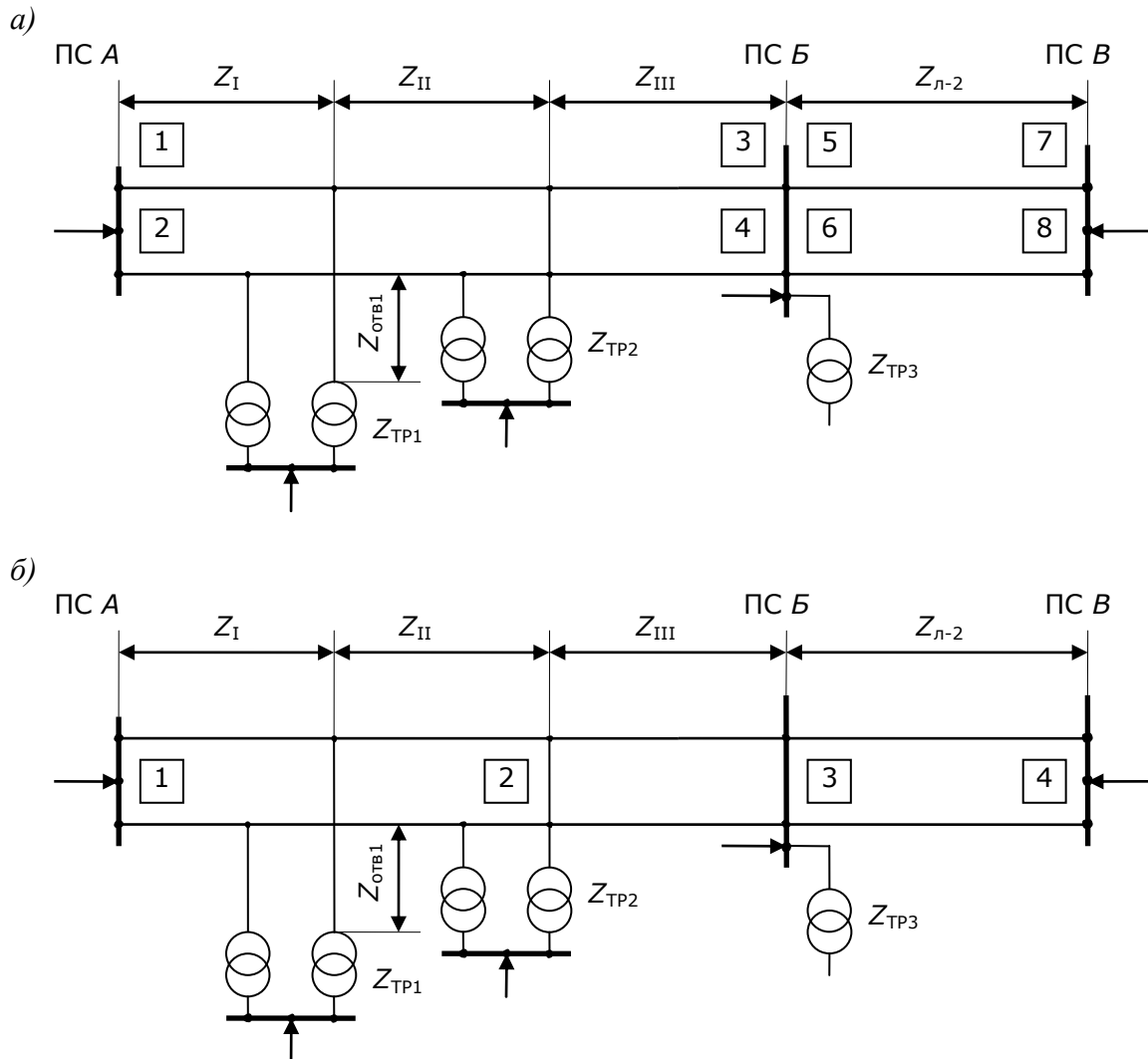


Рис. 8.2. Примеры определения коэффициента токораспределения k_T для одиночных линий с ответвлениями

8.4.3. Для схемы на рис. 8.3, а в случае параллельной работы трансформаторов подстанций на ответвлениях на стороне низшего (среднего) напряжения дополнительно необходимо рассматривать такой режим, когда параллельная линия отключена, а трансформаторы подстанций на ответвлениях переведены на питание от защищаемой линии.



$Z_{ТР1}$, $Z_{ТР2}$, $Z_{ТР3}$, $Z_{ТР4}$ – минимальное эквивалентное сопротивление параллельно работающим трансформаторов; Z_I , Z_{II} , Z_{III} , Z_{IV} , Z_V – сопротивление отдельных участков защищаемой и предыдущей линий; $Z_{отв1}$, $Z_{отв2}$ – сопротивления ответвлений; $Z_{л-2}$ – сопротивление предыдущей линии.

Рис. 8.3. Примеры схем параллельных линий с ответвлениями

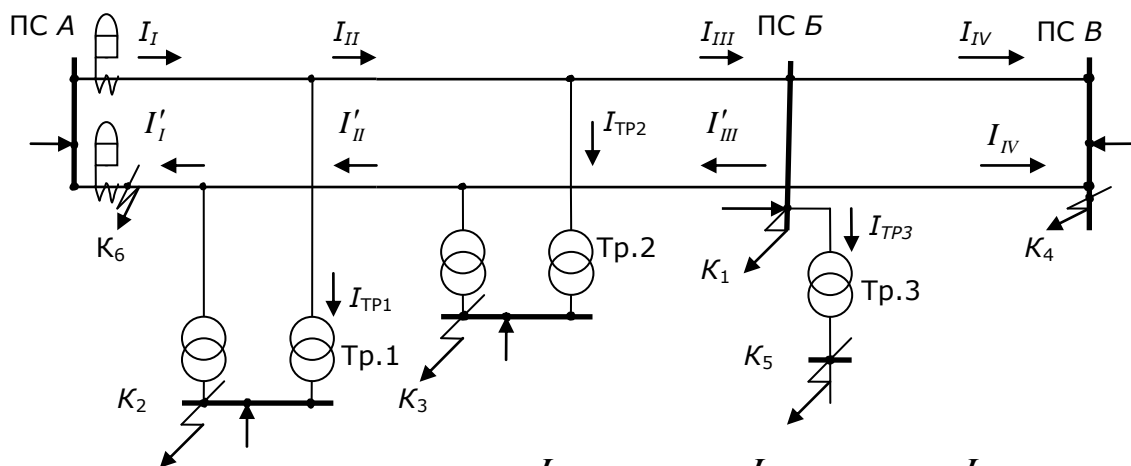
8.5. Для схемы на рис. 8.3, б отстройку от токов КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения подстанций на ответвлениях необходимо производить в соответствии с вариантами расчёта 2 и 3 табл. 8.2.

8.5.1. Отстройку первой ступени защиты необходимо производить при отключении одной из параллельных линий потому, что только в этом режиме первая ступень защиты вводится в действие.

Если трансформаторы подстанций на ответвлениях работают параллельно на стороне низшего (среднего) напряжения, необходимо учитывать случай, когда трансформаторы подстанций на ответвлениях, подключенные в нормальном режиме ко второй параллельной линии, переведены на питание от защищаемой линии.

8.5.2. Отстройку второй ступени защиты необходимо производить в режимах по п. 8.4.1. В случае параллельной работы трансформаторов подстанций на ответвлениях нужно рассматривать отключение (со стороны, противоположной месту установки рассматриваемой защиты) одной из защищаемых линий, а при раздельной работе этих трансформаторов – отключение (со стороны, противоположной месту установки рассматриваемой защиты) той линии, к которой присоединён трансформатор, на стороне низшего напряжения которого рассматриваемое КЗ.

а)

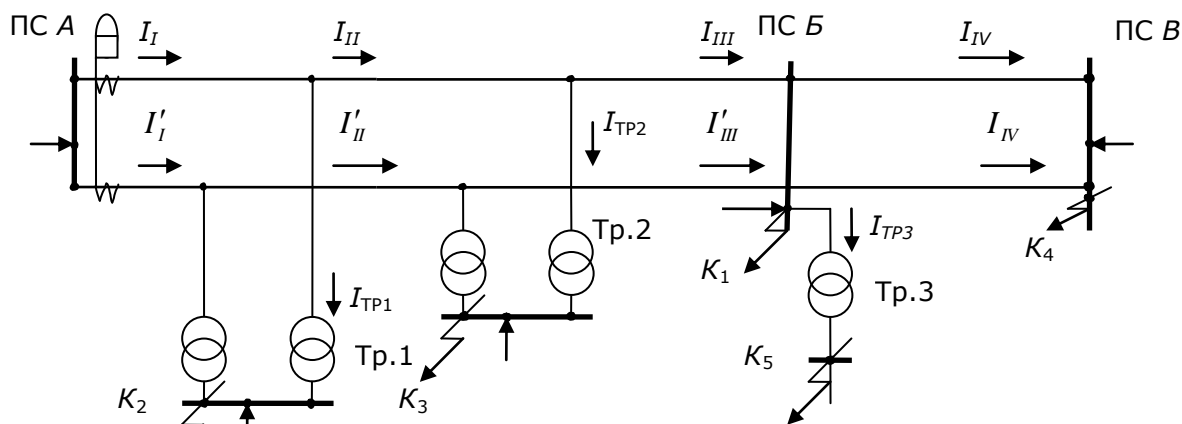


$$K_{T.I} = 1; K_{T.II} = \frac{I_I}{I_{II}}; K_{T.III} = \frac{I_I}{I_{III}}; K_{T.IV} = \frac{I_I}{2I_{IV}};$$

$$K_{T.TP.1} = \frac{I_I}{I_{TP.1}}; K_{T.TP.2} = \frac{I_I}{I_{TP.2}}; K_{T.TP.3} = \frac{I_I}{I_{TP.3}};$$

$$K'_{T.I} = \frac{I_I}{I'_I}; K'_{T.II} = \frac{I_I}{I'_{II}}; K'_{T.III} = \frac{I_I}{I'_{III}};$$

б)



$$K_{T.I} = \frac{I_I + I'_I}{I_I}; K_{T.II} = \frac{I_I + I'_I}{I_{II}}; K_{T.III} = \frac{I_I + I'_I}{I_{III}}; K_{T.IV} = \frac{I_I + I'_I}{2I_{IV}};$$

$$K_{T.TP.1} = \frac{I_I + I'_I}{I_{TP.1}}; K_{T.TP.2} = \frac{I_I + I'_I}{I_{TP.2}}; K_{T.TP.3} = \frac{I_I + I'_I}{I_{TP.3}};$$

Рис. 8.4. Примеры определения коэффициента токораспределения k_T для параллельных линий с ответвлениями

Таблица 8.2

Выражения для определения сопротивлений срабатывания ДЗ параллельных линий с ответвлениями

Ступень защиты	Вариант расчёта (исходные схемы)	Расчётное условие	Расчётное выражение	
			в общем виде	при принятых значениях коэффициентов (примечание 2)
I	1 рис. 8.3, а–б	Отстройка от КЗ на шинах противоположного конца линии	$Z'_{с.3.1} \leq \frac{Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}}}{1 + \beta + \delta} \quad (1)$	$Z'_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}}) \quad (7)$
I и II	2 рис. 8.3, а–б	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения	$Z_{с.3.1} \leq \frac{\frac{Z_I}{k_{T,I}} + \frac{Z_{отв}}{k_{T,отв}} + \frac{Z_{TP.1}}{k_{T,TP.1}}}{1 + \beta + \delta} \quad (2)$	$Z_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (\frac{Z_I}{k_{T,I}} + \frac{Z_{отв}}{k_{T,отв}} + \frac{Z_{TP.1}}{k_{T,TP.1}}) \quad (8)$
	3 рис. 8.3, а–б	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения	$Z_{с.3.1} \leq \frac{\frac{Z_I}{k_{T,I}} + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{TP.2}}{k_{T,TP.2}}}{1 + \beta + \delta} \quad (3)$	$Z_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (\frac{Z_I}{k_{T,I}} + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{TP.2}}{k_{T,TP.2}}) \quad (9)$
II	4 рис. 8.3, а–б	Отстройка от КЗ на шинах ПС В при двух линиях на участке ПС Б – ПС В	$Z''_{с.3.1} \leq \frac{\frac{Z_I}{k_{T,I}} + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}} + \frac{0,5 \cdot Z_{л-2}}{k_{T,IV}}}{1 + \beta + \delta} \quad (4)$	$Z''_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (\frac{Z_I}{k_{T,I}} + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}}) + \frac{0,43}{k_{T,IV}} \cdot Z_{л-2} \quad (10)$
	5 рис. 8.3, а–б	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС Б	$Z''_{с.3.1} \leq \frac{\frac{Z_I}{k_{T,I}} + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}} + \frac{Z_{TP.3}}{k_{T,TP.3}}}{1 + \beta + \delta} \quad (5)$	$Z''_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (\frac{Z_I}{k_{T,I}} + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}} + \frac{Z_{TP.3}}{k_{T,TP.3}}) \quad (11)$
	6 рис. 8.3, а	Согласование с первой ступенью защиты 4 при каскадном отключении КЗ на параллельной линии	$Z''_{с.3.1} \leq \frac{Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}} + \frac{1-\alpha}{k'_{T,III}} \cdot Z_{III} + \frac{1-\alpha}{k'_{T,II}} \cdot Z_{II} + \frac{1-\alpha}{k'_{T,I}} (Z'_{с.3.4} - Z_{II} - Z_{III})}{1 + \beta + \delta} \quad (6)$	$Z''_{с.3.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_I + \frac{Z_{II}}{k_{T,II}} + \frac{Z_{III}}{k_{T,III}}) + 0,78 \cdot (\frac{Z_{III}}{k'_{T,III}} + \frac{Z_{II}}{k'_{T,II}} + \frac{Z'_{с.3.4} - Z_{II} - Z_{III}}{k'_{T,I}}) \quad (12)$

Примечания:

1. В таблице даны выражения для определения сопротивлений срабатывания применительно к защите I параллельных линий с ответвлениями по схемам на рис. 8.3.
2. Принятые обозначения и значения коэффициентов даны на рис. 8.1 и в примечании 2 к табл. 6.1.
3. Расчётные выражения даны для случая равенства сопротивления параллельных линий одного участка.

8.6. При выборе сопротивлений срабатывания первой и второй ступеней защит линий по рис. 8.1 и 8.3 по другим условиям (табл. 8.1, варианты расчёта 1, 2, 5–7 и табл. 8.2, варианты расчёта 1, 4–6) нужно:

- учитывать рекомендации раздела 6, п. 6.4 и разд. 7, п. 7.3 и 7.4;
- рассматривать режим, в котором часть подстанций на ответвлениях отключена, а на других включено минимальное возможное число источников питания.

8.7. Если уставки второй ступени защиты одиночных линий (рис. 8.1), а также защиты, включённой на ток одной из двух параллельных линий (схема на рис. 8.3 *а*), рассчитанные по условиям соответственно табл. 8.1 и 8.2, не удовлетворяют требованиям чувствительности, их расчёт целесообразно произвести в соответствии с указаниями раздела 6, п. 6.10.

Указанное условие должно быть заменено согласованием с быстродействующей защитой элементов стороны низшего (среднего) напряжения рассматриваемой подстанции, если условие отстройки от токов КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения подстанции на ответвлении было определяющим для расчёта значения уставки.

8.8. В тех случаях, когда вторая ступень защиты, включенной на сумму токов двух параллельных линий (рис. 8.3, *б*), выбранная по условиям селективности в режиме работы обеих линий на участке ПС *А* – ПС *Б* (варианты расчёта 2–5 табл. 8.2) не удовлетворяет требованию чувствительности к КЗ в конце защищаемого участка при работе одной линии на участке ПС *А* – ПС *Б*, необходимо отдельно рассчитать уставку второй ступени для данного режима работы.

При этом необходимо иметь еще одну программу уставок для режима работы одной линии на участке ПС *А* – ПС *Б*. После изменения режима на указанный необходимо произвести смену программ уставок.

Сопротивление срабатывания второй ступени второй программы уставок, на которую переключается защита после отключения параллельной линии, рассчитывают в соответствии с вариантами расчёта 3–7 из табл. 8.1 для защит одиночных линий с ответвлениями.

8.9. Определение сопротивлений срабатывания защиты в сетях сложной топологии, выражения из табл. 8.1 и 8.2 к которым неприменимы, можно производить непосредственно через напряжения и токи в месте установки защиты в расчётных по селективности условиях, по общим выражениям или с помощью специализированных программ.

8.10. Во всём остальном (проверка чувствительности второй ступени защиты, согласование второй ступени ДЗ с защитами тока и напряжения, установленными на предыдущих линиях, выбор выдержки времени второй ступени защиты, включенной на сумму токов двух параллельных линий и т.д.) расчёт производится так же, как и для защит соответственно одиночных и параллельных линий без ответвлений (разделы 6 и 7).

9. Расчет ДЗ блока трансформатор (автотрансформатор) – линия напряжением 35 - 220 кВ

9.1. Ниже рассматриваются особенности расчёта ДЗ, установленной со стороны трансформатора (автотрансформатора) с соединением обмоток $Y/\Delta-11$ на линиях 35–220 кВ, работающих в составе блока «двухобмоточный трансформатор (автотрансформатор) – линия» (рис. 9.1).

9.2. Использование для ДЗ линии ТН, установленных на стороне низшего или среднего напряжения Т блока, и включение в связи с этим Т блока в зону защиты приводит к:

- сокращению доли линии, контролируемой первой (без выдержки времени) ступенью защиты;

- снижению чувствительности второй и третьей ступеней.

Это обусловлено тем, что:

- незащищённая первой ступенью часть блока Т – линия, расположенная в конце линии и равная $k \cdot (Z_{\text{ТР}} + Z_{\text{л}})$, больше, чем незащищённая часть линии $k \cdot Z_{\text{л}}$, при применении для последней отдельной защиты;

- сопротивление на «зажимах» реле при КЗ в конце линии увеличивается в большей степени, чем увеличивается сопротивление срабатывания второй ступени ДЗ в случае замены защиты линии защитой блока;

- сопротивление срабатывания третьей ступени защиты блока и отдельной защиты линии практически одинаковы;

- при наличии на Т блока встроенного регулирования напряжения под нагрузкой при определении сопротивления срабатывания используют коэффициент трансформации отличный от того, для которого рассчитывают коэффициент чувствительности.

9.3. Для блоков с Т, имеющими встроенное регулирование напряжения под нагрузкой, сопротивление срабатывания защиты, приведённое к стороне высшего напряжения блока, рассчитывают с учётом наименьшего возможного при регулировании сопротивления Т.

Вторичное значение сопротивления срабатывания реле определяют в целях упрощения расчёта по формулам (9.1) – (9.3) при наибольшем значении коэффициента трансформации Т блока.

Расчёт чувствительности уставок второй ступени ДЗ производят по вторичным величинам, определяемым в соответствии или по аналогии с формулами (9.1) – (9.3). При этом учитывают наибольшее возможное при регулировании сопротивление и наименьший коэффициент трансформации Т блока.

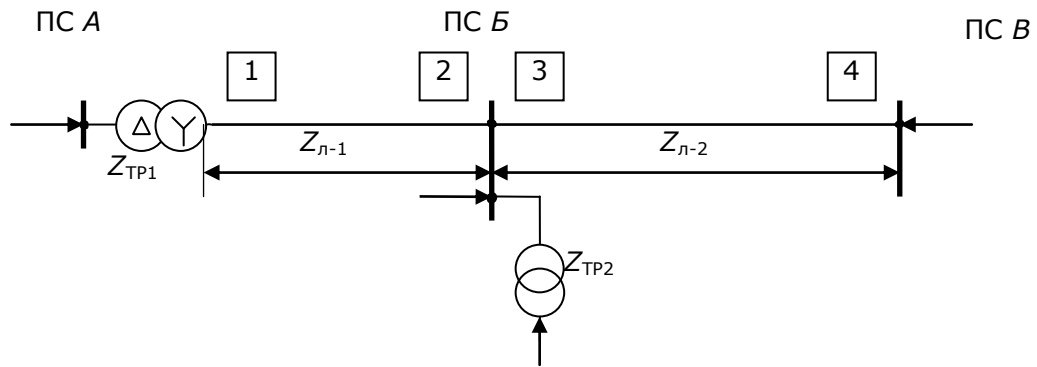
В случаях, когда указанный метод расчёта приводит к недопустимому заглублению защиты, необходимо произвести более точные расчёты, учитывающие возможные при регулировании напряжения сочетания значений сопротивления и коэффициента трансформации Т блока.

В расчётах используют сочетания, обеспечивающие:

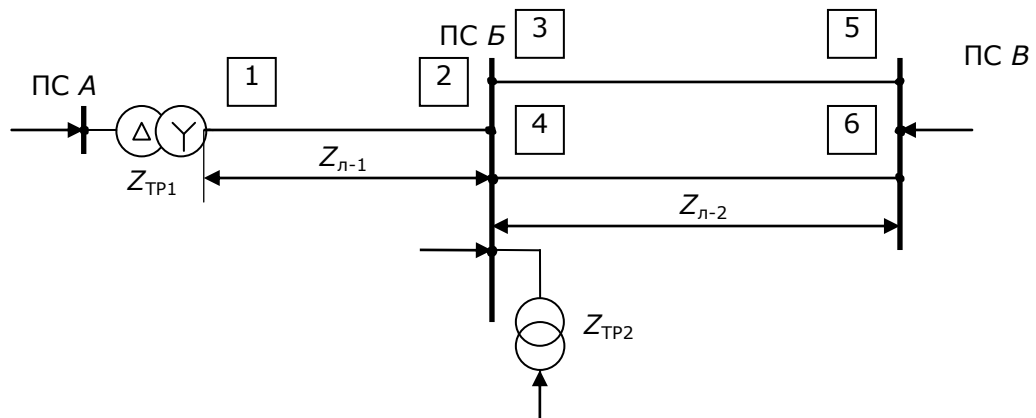
- наименьшее значение вторичного сопротивления на реле в условиях, расчётных по селективности;

- наибольшее значение этого сопротивления в условиях, расчётных по чувствительности.

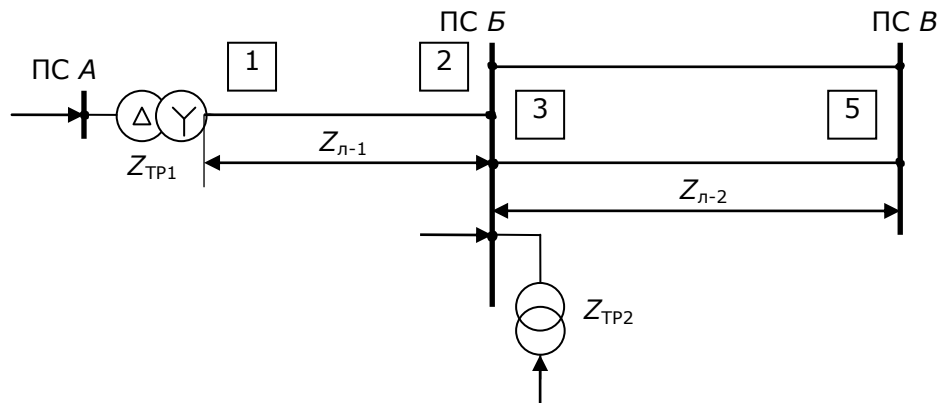
а)



б)



в)



$Z_{Л-1}$, $Z_{Л-2}$ – сопротивление линий; Z_{TP1} – сопротивление Т блока; Z_{TP2} – минимальное эквивалентное сопротивление параллельно работающих трансформаторов на ПС Б.

Рис. 9.1. Примеры схем сети с блоком «трансформатор – линия»

9.4. Формулы для определения сопротивлений срабатывания первой $Z_{с.3}^I$ и второй $Z_{с.3}^{II}$ ступеней ДЗ линий, работающих в составе блока «Т – линия» приведены в табл. 9.1. Значения коэффициентов токораспределения k_T определяют аналогично тому, как в защите одиночных линий (рис. 6.3).

Выражения для сопротивлений срабатывания ДЗ линий, работающих в составе блока «Т – линия»

Ступень защиты	Вариант расчёта (исходные схемы)	Расчётное условие	Расчётное выражение	
			в общем виде	при принятых значениях коэффициентов (примечание 2)
I	1 рис. 9.1, а–в	Отстройка от КЗ на шинах противоположного конца линии	$Z'_{с.з.1} \leq \frac{Z_{ТП1} + Z_{л-1}}{1 + \beta + \delta} \quad (1)$	$Z'_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_{ТП1} + Z_{л-1}) \quad (5)$
II	2 рис. 9.1, а	Согласование с первой ступенью защиты 3	$Z''_{с.з.1} \leq \frac{Z_{ТП1} + Z_{л-1} + \frac{1-\alpha}{k_{Т.л}} \cdot Z'_{с.з.3}}{1 + \beta + \delta} \quad (2)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_{ТП1} + Z_{л-1}) + \frac{0,66}{k_{Т.л}} \cdot Z_{л-2} \quad (6)$
	3 рис. 9.1, б–в	Отстройка от КЗ на шинах ПС В при двух линиях на участке ПС В – ПС В	$Z''_{с.з.1} \leq \frac{Z_{ТП1} + Z_{л-1} + \frac{0,5}{k_{Т.л}} \cdot Z_{л-2}}{1 + \beta + \delta} \quad (3)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_{ТП1} + Z_{л-1}) + \frac{0,43}{k_{Т.л}} \cdot Z_{л-2} \quad (7)$
	4 рис. 9.1, а–в	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС В	$Z''_{с.з.1} \leq \frac{Z_{ТП1} + Z_{л-1} + \frac{1}{k_{Т.ТП.1}} \cdot Z_{ТП.2}}{1 + \beta + \delta} \quad (4)$	$Z''_{с.з.1} \lesssim 0,85 \cdot (Z_{ТП1} + Z_{л-1} + \frac{Z_{ТП.2}}{k_{Т.ТП.}}) \quad (8)$

Примечания:

1. В таблице даны выражения для определения сопротивлений срабатывания применительно к защите 1 линий, работающих в составе блока «Т – линия», в схемах на рис. 9.1.
2. $Z_{ТП1}$ – минимальное возможное при регулировании сопротивление Т между стороной его высшего напряжения (сторона защищаемой линии) и стороной, где установлены ТН, используемые для защиты; остальные обозначения и значения коэффициентов даны на рис. 9.1 и в примечании 2 к табл. 6.1.

В качестве сопротивления срабатывания второй ступени защиты принимают наименьшее сопротивление из полученных по приведённым расчётным условиям.

Выражения табл. 9.1 составлены для случаев:

- включения рассматриваемой защиты на ТН, установленные на стороне низшего напряжения трансформатора блока «двухобмоточный трансформатор – линия» или «трёхобмоточный Т – линия». В последнем случае – при отсутствии питания со стороны среднего напряжения или равенства нулю сопротивления его обмотки низшего напряжения;

- включения рассматриваемой защиты на ТН, установленные на стороне среднего напряжения трансформатора блока «трёхобмоточный Т – линия» при отсутствии питания со стороны низшего напряжения или равенства нулю сопротивления его обмотки среднего напряжения.

Выражения табл. 9.1 могут быть использованы также и для расчёта защиты линии блока «трёхобмоточный Т – линия» при трёхстороннем питании и неравенстве нулю сопротивления обмотки Т, со стороны которой установлены используемые для защиты ТН.

При этом защита выполняется с компенсацией падения напряжения в сопротивлении обмотки Т, на стороне которой установлены ТН, используемые для защиты. В этом случае под $Z_{\text{ТР1}}$ надо понимать сопротивление обмотки высшего напряжения Т блока.

В тех случаях, когда уставка второй ступени ДЗ, выбранная по указанным в табл. 9.1 условиям, не удовлетворяет требованию чувствительности, целесообразно её сопротивление срабатывания и выдержку времени выбирать в соответствии с указаниями раздела 6, п.6. 10.

9.5. Вторичные значения сопротивлений срабатывания $Z_{\text{с.р}}$ определяют исходя из первичных значений сопротивлений срабатывания $Z_{\text{с.з}}$, рассчитанных в соответствии с табл. 9.1, по следующим формулам:

- при включении защиты на ТТ и ТН, установленные со стороны низшего напряжения трансформатора блока,

$$Z_{\text{с.р}} = \frac{n_{\text{T}}^{(\text{H})}}{3 \cdot n_{\text{H}}^{(\text{H})} \cdot n_{\text{ТР}}^2} \cdot Z_{\text{с.з}}; \quad (9.1)$$

- при включении защиты на ТН, установленные со стороны низшего напряжения, и на ТТ, установленные со стороны высшего напряжения трансформатора (автотрансформатора) блока,

$$Z_{\text{с.р}} = \frac{n_{\text{T}}^{(\text{B})}}{\sqrt{3} \cdot n_{\text{H}}^{(\text{H})} \cdot n_{\text{ТР}}} \cdot Z_{\text{с.з}}; \quad (9.2)$$

- при включении защиты на ТН, установленные со стороны среднего напряжения, и на ТТ, установленные со стороны высшего напряжения трансформатора (автотрансформатора) блока,

$$Z_{\text{с.р}} = \frac{n_{\text{T}}^{(\text{B})}}{3 \cdot n_{\text{H}}^{(\text{C})} \cdot n_{\text{ТР}}} \cdot Z_{\text{с.з}}, \quad (9.3)$$

где $Z_{\text{с.з}}$ – сопротивление срабатывания защиты, Ом, рассчитанное по выражениям табл. 9.1;

$n_{\text{ТР}}$ – коэффициент трансформации трансформатора блока между стороной его

высшего напряжения (сторона защищаемой линии) и стороной установки ТН. В целях большей надёжности должен учитываться максимально возможный коэффициент трансформации, который может иметь место при регулировании напряжения;

$n_T^{(H)}$ и $n_T^{(B)}$ – коэффициенты трансформации ТТ, используемых для защиты и установленных соответственно на сторонах низшего и высшего напряжения Т блока;

$n_H^{(H)}$ и $n_H^{(C)}$ – коэффициенты трансформации ТН, используемых для защиты и установленных соответственно на сторонах низшего и среднего напряжения Т блока.

Формулы (9.1) – (9.3) составлены исходя из того, что защиту подключают:

- на фазные напряжения относительно нулевой точки системы при использовании для защиты ТН, установленных на стороне низшего напряжения Т блока;
- на междуфазные напряжения при использовании для защиты ТН, установленных на стороне среднего напряжения Т блока;
- на разность токов при использовании для защиты ТТ, установленных на стороне низшего напряжения Т блока и соединённых в треугольник;
- на разность фазных токов при использовании для защиты ТТ, установленных на стороне высшего напряжения Т блока.

9.6. Значение уставки угла линии φ_L в случае защиты блока Т – линия целесообразно принимать 75° , так как угол суммарного сопротивления Т и линии и соответственно угол сопротивления, подводимого к реле при КЗ в конце линии блока, близок к этому значению.

9.7. Во всех остальных случаях (согласование второй ступени ДЗ с защитами тока и напряжения, установленными на предыдущих участках, выбор выдержки времени второй ступени защиты, проверка чувствительности уставки второй ступени защиты и т.д.) расчёт необходимо производить так же, как для защиты одиночных линий (раздел 6).

10. Расчет третьей ступени ДЗ линий напряжением 35–220 кВ

10.1. Третья ступень ДЗ предназначена для резервирования защит присоединений (ЛЭП, трансформаторов), отходящих от шин противоположной подстанции.

ДО этой ступени должны действовать при КЗ в конце наиболее протяженной ЛЭП, отходящей от шин противоположной подстанции, и за подключенными к этим шинам трансформаторами.

Выбор уставок по полному сопротивлению срабатывания третьей ступени ДЗ следует осуществлять исходя из условия обеспечения требуемого коэффициента чувствительности.

10.2. Согласно [2], коэффициент чувствительности уставки третьей ступени ДЗ необходимо рассчитывать при металлическом КЗ в конце зоны резервирования. В соответствии с [1] при КЗ в конце зоны резервирования $k_q \geq 1,2$, а при КЗ в конце защищаемой линии – $k_q \geq 1,5$.

10.3. Сопротивление срабатывания третьей ступени $Z_{с.з}^{III}$, удовлетворяющее условию резервирования, обычно имеет большое значение.

В большинстве случаев угол сопротивления нагрузки много меньше угла сопротивления линии. В этом случае вектор сопротивления нагрузки имеет направление в сторону пересечения со стороной 2 четырехугольной характеристики ДО и может попасть в характеристику срабатывания.

Поэтому отстройка от тока нагрузки связана с выбором уставки по активному сопротивлению.

10.4. Выбор уставки по активному сопротивлению приведен в разделе 11.

11. Расчёт уставки ДЗ по активному сопротивлению

11.1. Уставку по активному сопротивлению $R_{уст}$ необходимо рассчитывать для случая неметаллического КЗ, когда к сопротивлению защищаемого участка добавляется переходное сопротивление. Сопротивление дуги R_d с приближением места КЗ к источнику питания уменьшается.

При междуфазном замыкании переходным сопротивлением является практически активное сопротивление электрической дуги.

Уставку по активному сопротивлению $R_{уст}$ рассчитывают по формуле

$$R_{уст} = k_H \cdot \frac{R_d}{k_T \cdot 2}, \quad (11.1)$$

где R_d – сопротивление дуги, Ом;

k_T – коэффициент токораспределения, равный отношению тока в месте установки защиты к току дуги;

k_H – коэффициент надёжности, равный 1,2.

11.2 Оценку активного сопротивления электрической дуги можно произвести следующим образом.

На основании рекомендаций, приведенных в [7] принимаем напряженность электрического поля дуги постоянной и равной 2500 В/м.

С учетом этого сопротивление электрической дуги R_d , соответствующее КЗ в конце защищаемого участка, можно оценить по формуле

$$R_d = \frac{2 \cdot l_d \cdot (Z_C + Z_{уст})}{\frac{U_{л}}{2500} - l_d}, \quad (11.2)$$

где l_d – длина дуги, м;

Z_C – полное сопротивление системы «за спиной», Ом;

$Z_{уст}$ – полное сопротивление срабатывания соответствующей ступени, Ом;

$U_{л}$ – действующее значение линейного напряжения системы, В.

Длина дуги изменяется во времени и через 0,5–1 с после возникновения может превысить расстояние между фазными проводами:

- в 2 раза – в безветренную погоду;
- в 3–4 раза – при небольшом ветре;
- в 8–10 раз – при сильном ветре.

Для первой ступени ДЗ время срабатывания $t^I \approx 0$ с. Длину дуги l_d при расчёте $R_{уст}$ первой ступени рекомендуется принимать равной расстоянию между проводами фаз.

При расчёте $R_{уст}$ второй ступени длину дуги l_d рекомендуется принимать равной от трех до пяти расстояний между проводами фаз.

При расчёте $R_{уст}$ третьей ступени длину дуги l_d рекомендуется принимать равной от семи до десяти расстояний между проводами фаз.

Для расчёта сопротивления дуги можно воспользоваться шаблоном модуля «ТКЗ» из программного комплекса «АРМ СРЗА».

11.3. Дополнительным условием выбора уставки по активному сопротивлению $R_{уст}$ является отстройка от нагрузочного режима и режима самозапуска электродвигателей.

Максимально допустимое значение уставки по активному сопротивлению $R_{уст. max}$, обеспечивающее условие возврата ДО в нагрузочном режиме и режиме самозапуска электродвигателей после отключения КЗ, рассчитывают с учётом коэффициента возврата k_B по формуле

$$R_{уст. max} = \frac{Z_{раб. min}}{k_H \cdot k_B} \cdot \left(\cos(\varphi_H) - \frac{\sin(\varphi_H)}{\operatorname{tg}(\varphi_L - 5^\circ)} \right), \quad (11.3)$$

где k_B – коэффициент возврата, равный 1,04;

k_H – коэффициент надёжности, равный 1,2;

φ_L – угол линии, град;

φ_H – угол нагрузки в рассматриваемом режиме, град.

$Z_{раб. min}$ – минимальное значение сопротивления в рабочем режиме, Ом.

Сопротивление $Z_{раб. min}$ рассчитывают по следующей формуле

$$Z_{раб. min} = \frac{U_{раб. min}}{\sqrt{3} \cdot I_{раб. max}}, \quad (11.4)$$

где $U_{раб. min}$ – минимальное напряжения в месте установки защиты, В;

$I_{раб. max}$ – максимальный рабочий тока в защищаемой линии, А.

В случае, когда допускается самозапуск электродвигателей формула (11.4) принимает следующий вид:

$$Z_{раб. min} = \frac{U_{раб. min. C3}}{\sqrt{3} \cdot k_{сзп} \cdot I_{раб. max}}, \quad (11.5)$$

где $U_{раб. min. C3}$ – минимальное напряжение в месте установки защиты в момент самозапуска. Значение определяют расчётным способом. Ориентировочное значение может быть принято равным 0,7–0,8 $U_{раб. min}$;

$k_{сзп}$ – коэффициент, учитывающий увеличение тока при самозапуске электродвигателей.

Если в нагрузке преобладают электродвигатели, то значение $k_{сзп}$ необходимо

принимать равным от 2 до 4.

При небольшой электродвигательной нагрузке значение $k_{\text{сзп}}$ принимают равным 1,5–2.

Если значение уставки по активному сопротивлению $R_{\text{уст}}$ превосходит максимально допустимое значение $R_{\text{уст. max}}$, в качестве уставки по активному сопротивлению соответствующей ступени необходимо принять значение $R_{\text{уст. max}}$. В этом случае для присоединений, для которых не выполняется требование по обеспечению дальнего резервирования, необходимо рассмотреть возможность усиления ближнего резервирования.

Другим способом обеспечения дальнего резервирования может быть применение треугольной характеристики ДО (см. рис. 4.4).

12. Расчёт уставок ДЗ для защиты от двойных замыканий на землю

12.1. Расчёт сопротивлений срабатывания первой и второй ступеней ДЗ с токовой компенсацией необходимо производить с учётом как междуфазных КЗ, так и двойных замыканий на землю в сетях напряжением 35 кВ.

В схемах с токовой компенсацией на участках, где имеется ток нулевой последовательности, сопротивление на зажимах защиты при двойном замыкании на землю, так же как и при междуфазных КЗ, пропорционально расстоянию от места установки защиты до места КЗ.

Таким образом, расчёт при двойном замыкании на землю в сетях напряжением 35 кВ необходимо производить исходя из тех же условий и выражений, что и при междуфазном КЗ:

- табл. 6.1 – для одиночных линий;
- табл. 7.1 – для параллельных линий;
- табл. 8.1 и 8.2 – для линий с ответвлениями;
- табл. 9.1 – для блока «Т – линия».

Расчётным видом КЗ является тот, которому соответствует наибольшее значение коэффициента токораспределения.

12.2. В терминалах БМРЗ фиксация двойного замыкания на землю на линиях 35 кВ происходит при превышении током нулевой последовательности $3I_0$ уставки ДЗ $I_{\text{СРАБ}}$.

Значение уставки $I_{\text{СРАБ}}$ рассчитывается по условию отстройки от максимального значения тока небаланса $I_{\text{НБ.РАСЧ}}$, возникающего при междуфазном КЗ в месте установки рассматриваемой защиты [2]:

$$I_{\text{СРАБ}} = k_{\text{Н}} \cdot I_{\text{НБ.РАСЧ}} = k_{\text{Н}} \cdot k_{\text{апер}} \cdot I_{\text{НБ.УСТ}}, \quad (12.1)$$

где $k_{\text{Н}} = 1,25$ – коэффициент надёжности;

$k_{\text{апер}} = 2,0$ – коэффициент, учитывающий наличие апериодической составляющей тока;

$I_{\text{НБ.УСТ}}$ – ток небаланса в нулевом проводе ТТ в установившемся режиме при металлическом трёхфазном КЗ в месте установки рассматриваемой защиты, А.

Для ТТ, удовлетворяющих требованиям обеспечения 10%-ной погрешности,

$I_{\text{НБ.УСТ}}$ может быть определён следующей формулой:

$$I_{\text{НБ.УСТ}} = k_{\text{ОДН}} \cdot f_i \cdot I_{\text{расч}}, \quad (12.2)$$

где $k_{\text{ОДН}}$ – коэффициент однотипности ТТ, который в зависимости от кратности токов КЗ и значения сопротивления вторичных цепей ТТ принимается равным от 0,5 до 1,0 (при использовании однотипных ТТ $k_{\text{ОДН}} = 0,5$. Для разнотипных ТТ – $k_{\text{ОДН}} = 1,0$);

f_i – максимально возможная относительная погрешность ТТ при КЗ в месте установки рассматриваемой защиты, может быть принята равной 0,1;

$I_{\text{расч}}$ – расчётный ток металлического трёхфазного КЗ в месте установки рассматриваемой защиты, А.

12.3. Сопротивления контуров Z_{A0} , Z_{B0} , Z_{C0} , на «зажимах» реле, рассчитывает ЦП терминала БМРЗ по формулам (4.7) – (4.9). При расчётах учитывается ток нулевой последовательности и коэффициент компенсации тока нулевой последовательности линии $k_{\text{КОМП}}$, рассчитываемый по формуле [8]:

$$k_{\text{КОМП}} = \frac{Z_0 - Z_1}{3 \cdot Z_1}, \quad (12.3)$$

где Z_1 и Z_0 – соответственно сопротивления прямой и нулевой последовательностей защищаемого участка, Ом.

Выдержку времени для второй ступени ДЗ от двойных замыканий на землю выбирать аналогично выдержке времени второй ступени ДЗ от междуфазных КЗ.

13. Пересчёт параметров срабатывания ДЗ во вторичные величины

13.1. Перед вводом уставок в терминал БМРЗ необходимо произвести их пересчёт из первичных значений во вторичные с учетом коэффициентов трансформации применяемых ТТ и ТН.

Пересчёт уставок по току производят по следующей формуле

$$I_{\text{С.Р}} = \frac{I_{\text{СЗ}}}{n_{\text{Т}}}, \quad (13-1)$$

где $I_{\text{С.Р}}$ – ток срабатывания реле (вторичное значение), А; $I_{\text{СЗ}}$ – расчётный ток срабатывания защиты (первичное значение), А; $n_{\text{Т}}$ – коэффициент трансформации ТТ.

13.2. Пересчёт уставок по напряжению производят по следующей формуле

$$U_{\text{С.Р}} = \frac{U_{\text{СЗ}}}{n_{\text{Н}}}, \quad (13-2)$$

где $U_{\text{С.Р}}$ – напряжение срабатывания реле (вторичное значение), В; $U_{\text{СЗ}}$ – расчётное

напряжение срабатывания защиты (первичное значение), В; n_H – коэффициент трансформации ТН.

13.3. Пересчёт уставок по сопротивлению производят по формуле:

$$Z_{C.P} = Z_{C.З} \frac{n_T}{n_H}, \quad (13.3)$$

где $Z_{C.P}$ – сопротивления срабатывания реле (вторичное значение), Ом; $Z_{C.З}$ – расчётное сопротивления срабатывания защиты (первичное значение), Ом; n_T – коэффициент трансформации ТТ; n_H – коэффициент трансформации ТН.

Для линий, работающих в составе блока «Т – линия» особенности пересчёта уставок по сопротивлению во вторичные значения приведены в п. 9.5.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. Шестое издание. – СПб.: Изд. ДЕКАН, 2005. – 464 с.
2. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7. Дистанционная защита линий 35-330 кВ. – М.: «Энергия», 1966. – 172 с.
3. РД 153-34.0-35.301-2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения.
4. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. – М.: «Энергия», 1976.
5. Чернобровов Н.В. Релейная защита. – М.: «Энергия», 1967.
6. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита. Принципы и применение. Пер. с англ. под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоиздат, 2005.
7. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007
8. Чернобровов Н.В. Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
9. Дони Н.А. Об использовании обмоток ТН, соединённых в разомкнутый треугольник. //Релейщик, №4(5), 2009, с. 73.
10. СТО ДИВГ-046-2011. Терминалы релейной защиты синхронных и асинхронных электродвигателей 6–10 кВ. Методические указания по расчёту уставок защит. СПб, НТЦ «Механотроника», 2011.

Содержание

1. Введение.....	3
2. Обозначения и сокращения.....	4
3. Общие сведения о ДЗ.....	5
4. Особенности выполнения ДЗ на терминалах БМРЗ.....	5
5. Контроль исправности измерительных цепей напряжения.....	14
6. Расчет ДЗ одиночных линий напряжением 35–220 кВ.....	16
7. Расчет ДЗ для двух параллельных линий напряжением 35–220 кВ.....	24
8. Расчет ДЗ одиночных и параллельных линий напряжением 35–220 кВ с ответвлениями.....	34
9. Расчет ДЗ трансформатор (автотрансформатор) – линия напряжением 35–220 кВ...	44
10. Расчет третьей ступени ДЗ линий напряжением 35–220 кВ.....	49
11. Расчёт уставки ДЗ по активному сопротивлению дуги.....	50
12. Расчёты уставок ДЗ для защиты от двойных замыканий на землю.....	52
13 Пересчёт параметров срабатывания ДЗ во вторичные величины.....	53
Литература.....	55

Учебное издание

**ГОНДУРОВ Сергей Александрович, ИЛЮХИН Евгений Владимирович,
ПИРОГОВ Михаил Геннадьевич, СОЛОВЬЁВ Александр Леонидович**

**Ступенчатые дистанционные защиты линий электропередачи
35–220 кВ**

Методика расчета

Редактор Е.Б. Никанорова

Ризограф. Объём печ. л. 2.3. Тираж 300 экз.

Заказ №

ПЭИПК, 196135, Санкт-Петербург, Авиационная ул., 23.