ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 72436— 2025

Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА

Дистанционная защита линий электропередачи классом напряжения 110 кВ и выше, имеющих питание с двух и более сторон. Методика расчета и выбора параметров настройки

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2026

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 декабря 2025 г. № 1641-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2026

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 2
3 Термины и сокращения 2
4 Общие указания по расчету параметров настройки дистанционной защиты линий электропередачи 3
4.1 Состав и назначение ступеней 3
4.2 Селективность и чувствительность ДЗ ЛЭП в режимах КЗ 4
4.3 Отстройка от нагрузочных режимов работы энергосистем 23
4.4 Перечень исходных данных и последовательность расчета 26
5 Расчет и выбор параметров настройки дистанционной защиты одиночной линии электропередачи 27
5.1 Типовые схемы участков сети 27
5.2 Общие указания по расчету и перечень расчетных условий 28
5.3 Расчет параметров настройки ДЗ с круговыми характеристиками 29
5.4 Расчет параметров настройки ДЗ с полигональными характеристиками 40
6 Расчет и выбор параметров настройки дистанционной защиты параллельных линий электропередачи 48
6.1 Типовые схемы участков сети 48
6.2 Общие указания по расчету и перечень расчетных условий 49
6.3 Расчет параметров настройки ДЗ с круговыми характеристиками 50
6.4 Расчет параметров настройки ДЗ с полигональными характеристиками 53
7 Расчет и выбор параметров настройки дистанционной защиты линий электропередачи при наличии ответвлений 56
7.1 Типовые схемы участков сети 56
7.2 Общие указания по расчету и перечень расчетных условий 58
7.3 Расчет параметров настройки ДЗ с круговыми характеристиками 60
7.4 Расчет параметров настройки ДЗ с полигональными характеристиками 72
8 Расчет и выбор параметров настройки дистанционной защиты линии электропередачи, работающей по схеме блока трансформатор (автотрансформатор) — линия 76
8.1 Типовые схемы участков сети 76
8.2 Общие указания по расчету и перечень расчетных условий 77
8.3 Расчет параметров настройки ДЗ с круговыми характеристиками 80
8.4 Расчет параметров настройки ДЗ с полигональными характеристиками 86
9 Пусковые органы, токовый контроль и проверка чувствительности по току точной работы дистанционной защиты линий электропередачи 90
9.1 Расчет параметров настройки пусковых органов ДЗ 90
9.2 Проверка чувствительности по току точной работы 95
9.3 Токовый контроль ступеней ДЗ 96
10 Расчет параметров настройки устройств БК 96
10.1 Назначение и принципы выполнения устройств БК 96
10.2 Расчет параметров настройки устройств БК с пуском по напряжению обратной последовательности и току нулевой последовательности (КРБ-121, КРБ-123, КРБ-125) 97
10.3 Расчет параметров настройки устройств БК с пуском по току обратной и току нулевой последовательности (КРБ-122, КРБ-124, КРБ-126) 103
10.4 Расчет параметров настройки устройств БК с пуском по приращению токов прямой и обратной последовательности 115
10.5 Расчет параметров настройки устройств БК с контролем скорости изменения сопротивления 118
11 Расчет параметров настройки ускоряемых ступеней дистанционной защиты 123
11.1 Расчет параметров настройки оперативно ускоряемых ступеней ДЗ 123
11.2 Расчет параметров настройки автоматически ускоряемой ступени ДЗ 124
11.3 Расчет параметров настройки телеускоряемых ступеней ДЗ 125

12 Выбор параметров настройки ступеней дистанционной защиты для специальных условий применения 127
12.1 Резервирование ДЗШ 127
12.2 Резервирование защит Т (АТ) ответвительных ПС 127
12.3 Ступень ДЗ, направленная в шины, обеспечивающая дальнее резервирование 127
12.4 Дистанционная защита ЛЭП на проходной ПС со схемой «мостик» 128
13 Особенности расчета и выбора параметров настройки дистанционной защиты коротких линий электропередачи 129
Приложение А (справочное) Характеристики срабатывания органов дистанционной защиты в устройствах релейной защиты 131
Приложение Б (справочное) Дистанционная защита от всех видов коротких замыканий 136
Приложение В (справочное) Определение угла наклона (скоса) и активного сопротивления срабатывания полигональной характеристики 150
Приложение Г (рекомендуемое) Учет положений устройства регулирования напряжений под нагрузкой силовых трансформаторов (автотрансформаторов) при расчетах дистанционной защиты линий электропередачи 152
Приложение Д (рекомендуемое) Расчет переходных сопротивлений в месте короткого замыкания 154
Приложение Е (справочное) Вывод формул для согласования дистанционной защиты линий электропередачи с дистанционной защитой трансформатора (автотрансформатора) 158
Приложение Ж (рекомендуемое) Расчет сопротивления срабатывания дистанционной защиты линий электропередачи по условию отстройки от броска тока намагничивания трансформатора и автотрансформатора 165
Библиография 168

Введение

В соответствии с пунктами 146 и 147 правил [1] устройства релейной защиты должны обладать требуемой чувствительностью при всех видах коротких замыканий в защищаемой зоне при различных схемно-режимных ситуациях и обеспечивать селективное отключение только поврежденной линии электропередачи или оборудования, а в случае отказа в отключении поврежденных линий электропередачи или оборудования по любой причине устройства релейной защиты должны обеспечивать отключение смежных неповрежденных линий электропередачи или оборудования, через которые осуществляется подпитка места повреждения токами короткого замыкания.

Настоящий стандарт разработан в развитие указанных положений правил [1] и направлен на обеспечение единства методологических подходов при выполнении расчетов и выборе параметров настройки функции дистанционной защиты, реализованной в устройствах релейной защиты и автоматики линий электропередачи классом напряжения 110 кВ и выше, имеющих питание с двух и более сторон.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА

Дистанционная защита линий электропередачи классом напряжения 110 кВ и выше, имеющих питание с двух и более сторон. Методика расчета и выбора параметров настройки

United power system and isolated power systems. Relay protection and automation. Distance protection of power transmission lines at voltage class 110 kV and higher powered from two or more sides. The method of calculation and selection of settings

Дата введения — 2026—01—15

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает методологию проведения расчетов и выбора параметров настройки дистанционной защиты в устройствах релейной защиты воздушных, кабельных, кабельно-воздушных линий электропередачи классом напряжения 110 кВ и выше, имеющих питание с двух и более сторон, которые подлежат обязательному расчету и заданию в устройствах дистанционной защиты линий электропередачи для выполнения ими своих функций в энергосистеме, в том числе определяет особенности расчета параметров настройки дистанционной защиты одиночных и параллельных линий электропередачи, линий электропередачи при наличии ответвлений и линий электропередачи, работающих по схеме блока «трансформатор (автотрансформатор) — линия» для типовых конфигураций электрической сети.

Параметры настройки дистанционной защиты в устройствах релейной защиты линий электропередачи, не рассмотренные в настоящем стандарте, должны рассчитываться и задаваться на основании методик расчета и выбора параметров настройки и алгоритмов функционирования устройств релейной защиты и автоматики производителей соответствующих устройств.

1.2 Настоящий стандарт предназначен для применения субъектом оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике — системным оператором электроэнергетических систем России (далее — системный оператор), собственниками и иными законными владельцами объектов по производству электрической энергии, объектов электросетевого хозяйства и (или) энергопринимающих установок, входящих в состав Единой энергетической системы России или технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем или присоединяемых к ним, а также проектными организациями и производителями устройств релейной защиты и автоматики (далее — РЗА).

1.3 Требования настоящего стандарта следует соблюдать при проведении расчетов и выборе параметров настройки дистанционной защиты в устройствах релейной защиты линий электропередачи классом напряжения 110 кВ и выше, имеющих питание с двух и более сторон, при эксплуатации объектов электроэнергетики в составе электроэнергетической системы, а также при расчете и выборе проектных параметров настройки указанных устройств релейной защиты при строительстве, реконструкции, модернизации и техническом перевооружении объектов электроэнергетики, технологическом присоединении объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок потребителей электрической энергии к электрическим сетям, создании (модернизации) устройств РЗА.

1.4 Требования настоящего стандарта должны учитываться производителями устройств РЗА при разработке ими методик расчета и выбора параметров настройки (уставок) и алгоритмов функционирования устройств РЗА.

1.5 Предусмотренные настоящим стандартом методологические подходы к обеспечению селективности и чувствительности дистанционной защиты линий электропередачи должны также учитываться диспетчерскими центрами системного оператора при оценке возможности вывода линий электропередачи и оборудования, относящихся к объектам диспетчеризации, из эксплуатации и подготовке заключений о возможности (невозможности) вывода объектов диспетчеризации из эксплуатации.

Издание официальное

1.6 В настоящем стандарте не рассматриваются расчетные условия выбора параметров доаварийных нагрузочных режимов линий электропередачи (максимального рабочего тока, максимального угла нагрузочного режима).

1.7 В настоящем стандарте не рассматриваются расчетные условия выбора параметров настройки дистанционных фазоселективных органов устройств однофазного автоматического повторного включения линий электропередачи и условия отстройки дистанционных ступеней дистанционной защиты, действие которых разрешается в цикле однофазного автоматического повторного включения, от замеров в неполнофазных нагрузочных режимах.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7746—2015 Трансформаторы тока. Общие технические условия

ГОСТ Р 52719 Трансформаторы силовые. Общие технические условия

ГОСТ 12965 Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ. Технические условия

ГОСТ 17544 Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 220, 330, 500 и 750 кВ. Технические условия

ГОСТ Р 57114 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электроэнергетические системы. Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике и оперативно-технологическое управление. Термины и определения

ГОСТ Р 58886 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Дистанционная и токовые защиты линий электропередачи и оборудования классом напряжения 330 кВ и выше. Функциональные требования

ГОСТ Р 58887 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Дистанционная и токовые защиты линий электропередачи и оборудования классом напряжения 110—220 кВ. Функциональные требования

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и сокращения

3.1 В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 57114.

3.2 В настоящем стандарте использованы следующие сокращения:

АВР — автоматический ввод резерва;

АПВ — автоматическое повторное включение;

АТ — автотрансформатор;

АУ — автоматическое ускорение;

БК — блокировка при качаниях;

БТН — бросок тока намагничивания;

ВЛ — воздушная линия;

ВН — высшее напряжение;

ДО — дистанционный орган;

ДЗ — дистанционная защита;

ДЗШ — дифференциальная токовая защита шин;

КЗ — короткое замыкание;

ЛЭП — линия электропередачи;
МТЗ — максимальная токовая защита;
МФТО — междуфазная токовая отсечка;
НН — низшее напряжение;
ОАПВ — однофазное автоматическое повторное включение;
ОУ — оперативное ускорение;
ПС — подстанция;
РЗ — релейная защита;
РПН — устройство регулирования напряжения под нагрузкой силовых трансформаторов (автотрансформаторов);
РРС — реле реактивного сопротивления;
СВ — секционный выключатель;
СН — среднее напряжение;
Т — трансформатор;
ТН — измерительный трансформатор напряжения;
ТТ — измерительный трансформатор тока;
ТУ — телеускорение;
УРОВ — устройство резервирования при отказе выключателя;
ШСВ — шиносоединительный выключатель;
ЭДС — электродвижущая сила.

4 Общие указания по расчету параметров настройки дистанционной защиты линий электропередачи

4.1 Состав и назначение ступеней

Для ЛЭП классом напряжения 110 кВ и выше, имеющих питание с двух или более сторон, в качестве резервной защиты применяется ДЗ от междуфазных КЗ на электромеханической или микроэлектронной элементной базе или ДЗ от всех видов КЗ в составе микропроцессорных устройств РЗ.

ДЗ является защитой относительной селективности и включает несколько ступеней с различным охватом защищаемой ЛЭП и соответствующими выдержками времени.

Количество и функциональное назначение ступеней ДЗ ЛЭП определяются типом применяемого устройства РЗ.

Ступени ДЗ, действующие в пределах защищаемой ЛЭП, при наличии технической возможности рекомендуется выполнять от всех видов КЗ.

В разделах 5—8 приведены указания по расчету и выбору параметров настройки трехступенчатой ДЗ ЛЭП напряжением 110 кВ и выше для типовых конфигураций электрической сети со следующим функциональным назначением ступеней.

1) Первая ступень охватывает часть защищаемой ЛЭП, выполняется без выдержки времени, действует при междуфазных КЗ и КЗ на землю. Применение первой ступени ДЗ от всех видов КЗ особенно эффективно в тех случаях, когда первая ступень токовой защиты нулевой последовательности не используется (например, на коротких ЛЭП) или нечувствительна в ряде ремонтных схем прилегающей сети.

2) Вторая ступень предназначена для обеспечения надежной защиты (здесь и далее под понятием «надежная защита» понимается способность защиты реагировать на повреждения в пределах всей ЛЭП с нормативной чувствительностью) всей ЛЭП, действует при междуфазных КЗ с выдержкой времени.

3) Третья ступень предназначена для обеспечения резервных функций при КЗ на защищаемой ЛЭП или на смежных участках сети в случае отказа выключателя или защиты смежных сетевых элементов, действует при междуфазных КЗ с выдержкой времени.

Информация о характеристиках срабатывания органов ДЗ в устройствах РЗ приведена в приложении А.

В устройствах РЗ ЛЭП предусматривается ускорение действия отдельных ступеней ДЗ. Указания по расчету и выбору параметров настройки ускоряемых ступеней ДЗ приведены в разделе 11.

В качестве автоматически или оперативно ускоряемой ступени ДЗ может применяться вторая (третья) ступень или отдельная ступень, обеспечивающая надежную защиту всей ЛЭП.

В качестве телеускоренной ступени может применяться первая ступень ДЗ с «неполным охватом», вторая или отдельная ступень ДЗ, обеспечивающая надежную защиту всей ЛЭП, специально

предназначенная для этой цели. При наличии технической возможности отдельная телеускоряемая ступень ДЗ выполняется от всех видов КЗ (например, четвертая ступень ДЗ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58886, ГОСТ Р 58887).

При определении необходимого количества ступеней в составе ДЗ ЛЭП необходимо учитывать, что в схемах ТУ с использованием ступени с «полным охватом» и передачей блокирующих или разрешающих сигналов необходимо применение обратнонаправленной ступени, параметры настройки которой должны быть согласованы по чувствительности с прямонаправленной телеускоряемой ступенью ДЗ на противоположном конце ЛЭП для исключения излишней работы защиты при внешних КЗ, а также при каскадном отключении КЗ на параллельной линии или обходной связи (например, пятая ступень ДЗ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58886, ГОСТ Р 58887).

Ненаправленная или обратнонаправленная ступень ДЗ по рекомендации производителя устройства РЗ может использоваться для правильного определения направления и выявления поврежденных фаз при близких КЗ.

Отдельная ступень ДЗ может использоваться в качестве дистанционного пускового органа защиты.

При наличии достаточного количества ступеней ДЗ в микропроцессорном устройстве РЗ в дополнение к ступеням, обеспечивающим надежную защиту ЛЭП и резервирование защит смежных сетевых элементов, могут использоваться ступени ДЗ для специальных условий их применения (например, шестая ступень ДЗ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58886, ГОСТ Р 58887).

В случаях, рассмотренных в разделе 12, отдельные ступени ДЗ могут применяться для резервирования защит Т (АТ), шин, использоваться в основной защите ЛЭП и т.д.

Особенности расчета и выбора параметров настройки ДЗ коротких ЛЭП приведены в разделе 13.

4.2 Селективность и чувствительность ДЗ ЛЭП в режимах КЗ

4.2.1 Учет погрешностей

Расчет и выбор параметров настройки ДЗ ЛЭП по условиям обеспечения селективности и чувствительности в режимах КЗ требуется выполнять с учетом возможного сокращения или расширения зоны охвата ступеней ДЗ из-за погрешностей измерительных ТТ и ТН, погрешностей расчета первичных величин и релейной аппаратуры (рисунок 4.1).

В выражениях для расчета сопротивлений срабатывания с помощью коэффициентов δ, α и β учитывают:

- коэффициент δ — погрешность, вызванную неточностью расчета первичных электрических величин (влияет как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения защищаемой зоны), и необходимый запас. Значение коэффициента принимают равным $\delta = 0{,}1$;

- коэффициенты α и β — суммарные погрешности ТТ, ТН и релейной аппаратуры, где α — суммарная погрешность, действующая в сторону уменьшения защищаемой зоны, β — суммарная погрешность, действующая в сторону увеличения защищаемой зоны. Погрешности ТТ действуют в основном в сторону уменьшения защищаемой зоны, а погрешности ТН и защиты — в сторону увеличения или уменьшения защищаемой зоны. Значения коэффициентов принимают равными: $\alpha = 0{,}1$; $\beta = 0{,}05$.

Приведенные ориентировочные значения коэффициентов α и β даны при условии работы ТТ и ТН с погрешностями, не превышающими значений, которые установлены действующими стандартами на измерительные трансформаторы для устройств РЗ.

4.2.2 Расчет сопротивления срабатывания ДО с круговыми и полигональными характеристиками по условию отстройки при внешних КЗ

Отстройка характеристик срабатывания ДО от замеров при КЗ вне зоны действия ступени ДЗ (например, начало смежного участка сети, конец зоны ступени ДЗ смежной ЛЭП и т.д.) проводится с необходимым запасом, определяемым коэффициентом отстройки.

Коэффициент отстройки $k_{отс}$ имеет значение меньше единицы и учитывает погрешность ТТ и ТН, релейной аппаратуры, а также погрешность, которая обусловлена возможным отличием действительных параметров защищаемой ЛЭП и прилегающей электрической сети от параметров схемы замещения математической модели:

$$k_{отс} = \frac{1}{(1+\beta+\delta)}. \qquad (4.1)$$

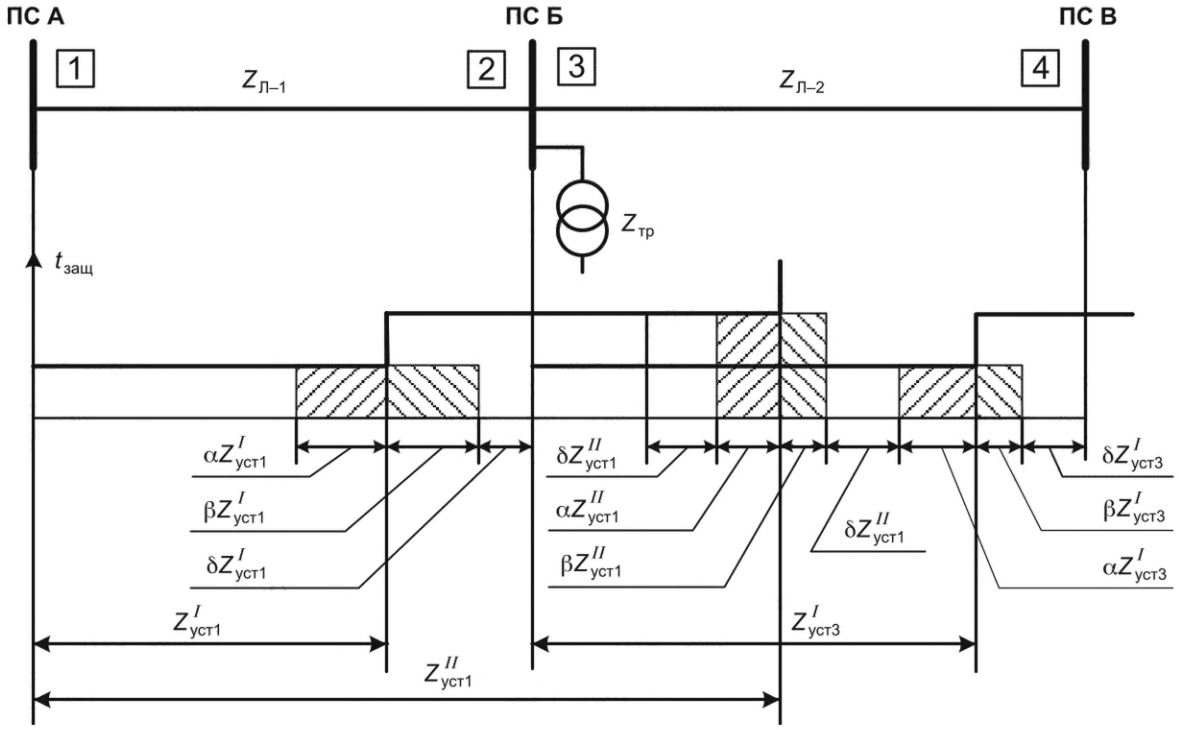


Рисунок 4.1 — Погрешности работы ДЗ

4.2.2.1 Отстройка ДО с круговыми характеристиками

Расчет сопротивления срабатывания $z_{уст}$ ДО с направленной круговой характеристикой, проходящей через начало координат, по условию отстройки (рисунок 4.2) проводится в соответствии с неравенством

$$z_{уст} \le k_{отс} \cdot |\underline{Z}_р| \cdot d; \quad (4.2)$$

$$d = \frac{1}{\cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_р\right)}, \quad (4.3)$$

где $|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного сопротивления;

$\varphi_{мч}$ — угол максимальной чувствительности круговой характеристики;

d — параметр, который учитывает возможное отличие угла $\varphi_{мч}$ направленной круговой характеристики и угла $\varphi_р$ расчетного сопротивления.

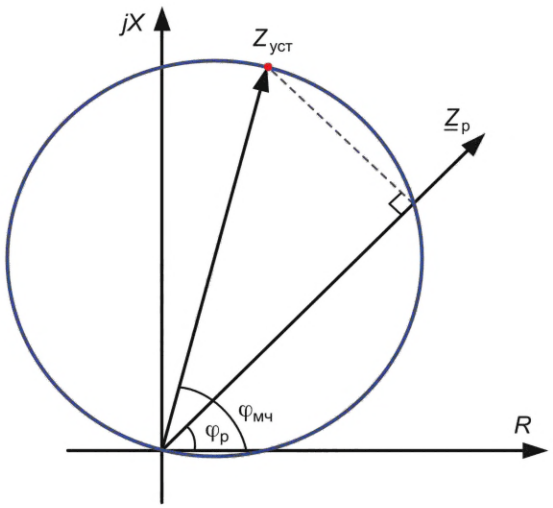


Рисунок 4.2 — Отстройка ДО с направленной круговой характеристикой, проходящей через начало координат

Отстройку характеристики срабатывания ДО от замеров при внешних КЗ для всей совокупности расчетных условий рекомендуется производить графическим способом. Отстройка осуществляется от зоны неопределенности вокруг конца вектора замера $\underline{Z}_р$ в виде окружности, радиус которой определяется по формуле

$$r_{окр} = |\underline{Z}_р| \cdot (1 - k_{отс}), \quad (4.4)$$

где $k_{отс}$ — требуемый коэффициент отстройки.

На рисунке 4.3 приведен пример отстройки круговой характеристики от замеров при внешних КЗ для случая, когда $\varphi_{мч} = 65°$, $\varphi_{л} = 79°$.

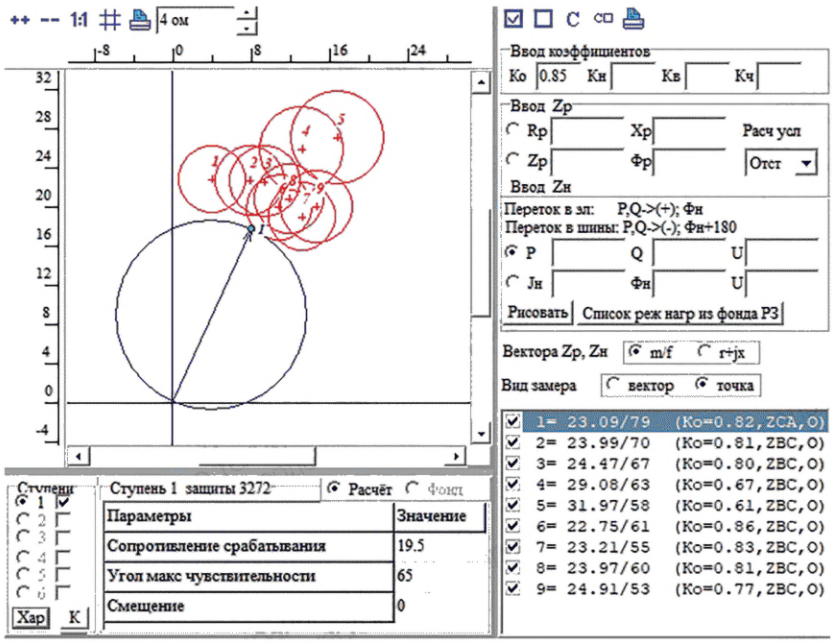


Рисунок 4.3 — Графический выбор параметров настройки ДО с круговой характеристикой

Для отстройки круговых характеристик от замеров при внешних КЗ через переходные сопротивления можно использовать изменение вида характеристики (эллипс, линза) и/или изменение угла наклона характеристики при наличии технической возможности (рисунок 4.4).

4.2.2.2 Отстройка ДО с полигональными характеристиками

Расчет сопротивления срабатывания ДО с полигональной характеристикой по условию отстройки от замера, когда вектор $\underline{Z}_р$ пересекает верхнюю грань характеристики (рисунок 4.5), проводится в соответствии с неравенствами:

- реактивное сопротивление срабатывания

$$X_{уст} \le k_{отс} \cdot |\underline{Z}_р| \cdot \sin\varphi_р; \quad (4.5)$$

- полное сопротивление срабатывания

$$Z_{уст} \le k_{отс} \cdot |\underline{Z}_р| \cdot d; \quad (4.6)$$

$$d = \frac{\sin\varphi_р}{\sin\varphi_{хар}}, \quad (4.7)$$

где $|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного полного сопротивления;

$\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики;

d — параметр, который учитывает возможное отличие угла наклона полигональной характеристики и угла расчетного сопротивления $\underline{Z}_р$.

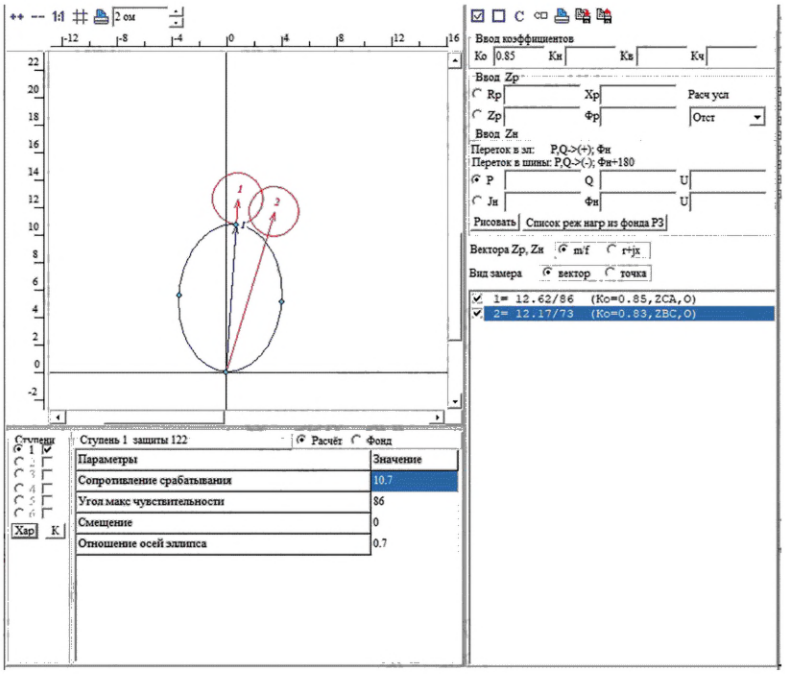


Рисунок 4.4 — Графический выбор параметров настройки ДО с характеристикой в виде эллипса

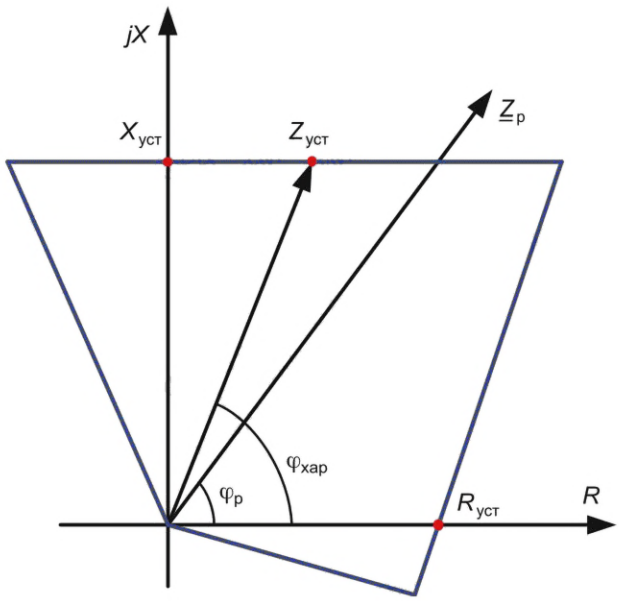


Рисунок 4.5 — Отстройка ДО с полигональной характеристикой

Влияние переходного сопротивления в месте КЗ на дистанционные замеры, влияние ряда других факторов, которые требуют учета при расчете и выборе параметров настройки ДЗ ЛЭП, рассмотрены в приложении Б.

При КЗ через переходные сопротивления дополнительным влияющим фактором является доаварийный переток мощности по ЛЭП. В этом случае для отстройки используется угол наклона (скоса) $\varphi_{ск}$ верхней границы характеристики (рисунок 4.6), а также отстройка с помощью активного сопротивления срабатывания $R_{уст}$ и/или изменения угла наклона правой боковой стороны характеристики (рисунок 4.7). При использовании $\varphi_{ск}$ обеспечивается требуемый охват линии при металлических КЗ и отстройка от внешних КЗ через переходное сопротивление.

Угол скоса для первой ступени ДЗ при выбранной уставке $X^{I}_{уст}$ определяется по формуле

$$\varphi_{ск} = \arcsin\frac{(1-k_{отс})\cdot\sqrt{R_р^2 + X_р^2}}{\sqrt{\left(R_р - R^{I}\right)^2 + \left(X_р - X^{I}_{уст}\right)^2}} - \operatorname{arctg}\frac{X_р - X^{I}_{уст}}{R_р - R^{I}}, \quad (4.8)$$

где $R_р$, $X_р$ — активная и реактивная составляющие расчетного сопротивления $\underline{Z}_р$;

$X^{I}_{уст}$ — реактивное сопротивление срабатывания первой ступени ДЗ;

R^{I} — активное сопротивление прямой последовательности участка ЛЭП, соответствующее концу зоны срабатывания $X^{I}_{уст}$ первой ступени ДЗ.

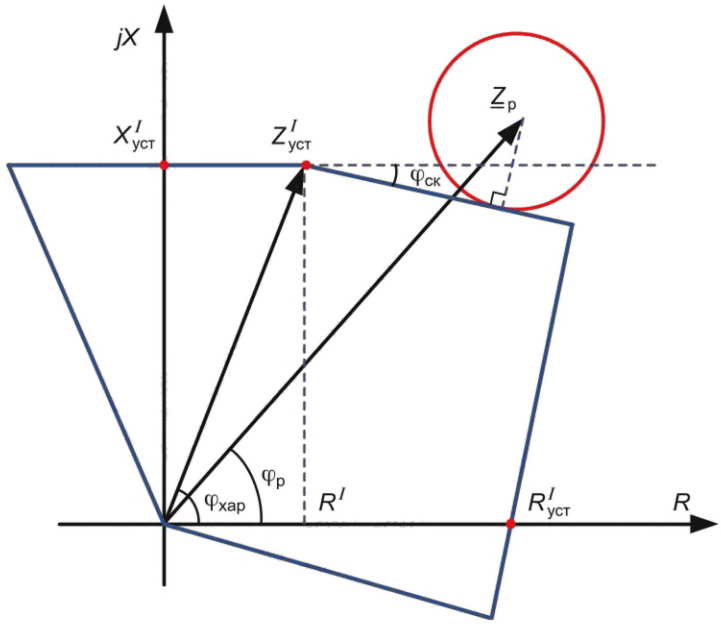


Рисунок 4.6 — Отстройка углом скоса верхней грани характеристики

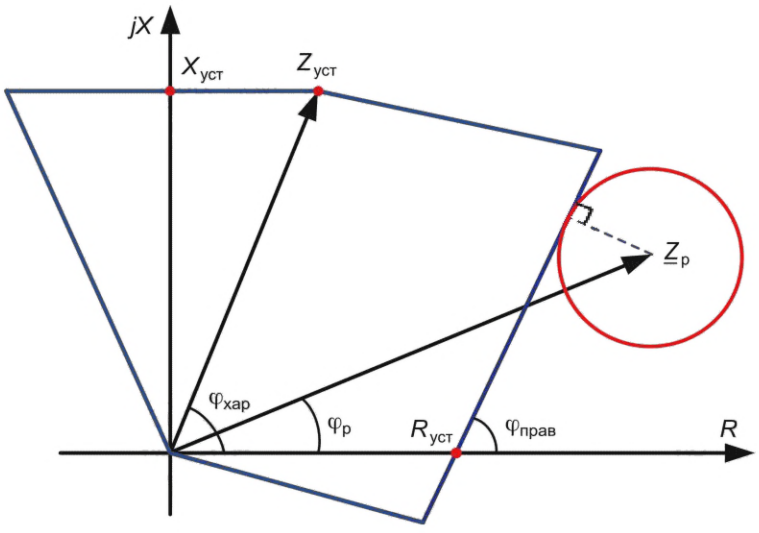


Рисунок 4.7 — Отстройка уставкой активного сопротивления и углом наклона правой боковой стороны характеристики

Если при внешних КЗ через переходное сопротивление вектор $\underline{Z}_р$ пересекает правую боковую сторону характеристики (рисунок 4.7), отстройка проводится уставкой по активному сопротивлению $R_{уст}$ при заданном угле наклона $\varphi_{прав}$ в соответствии с неравенством

$$R_{уст} \le \left|\underline{Z}_р\right| \cdot \frac{\sin\left(\varphi_{прав} - \varphi_р\right) - \left(1 - k_{отс}\right)}{\sin\varphi_{прав}}, \qquad (4.9)$$

где $|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного полного сопротивления;

$\varphi_{прав}$ — угол наклона правой боковой стороны характеристики.

Графические построения и вывод формулы (4.8) и неравенства (4.9) приведены в приложении В.

Отстройку полигональной характеристики от замеров при внешних КЗ для всей совокупности заданных расчетных условий рекомендуется проводить графическим способом (рисунок 4.8). Отстройка осуществляется от зоны неопределенности вокруг конца вектора замера $\underline{Z}_р$ в виде окружности, радиус которой определяется по формуле (4.4).

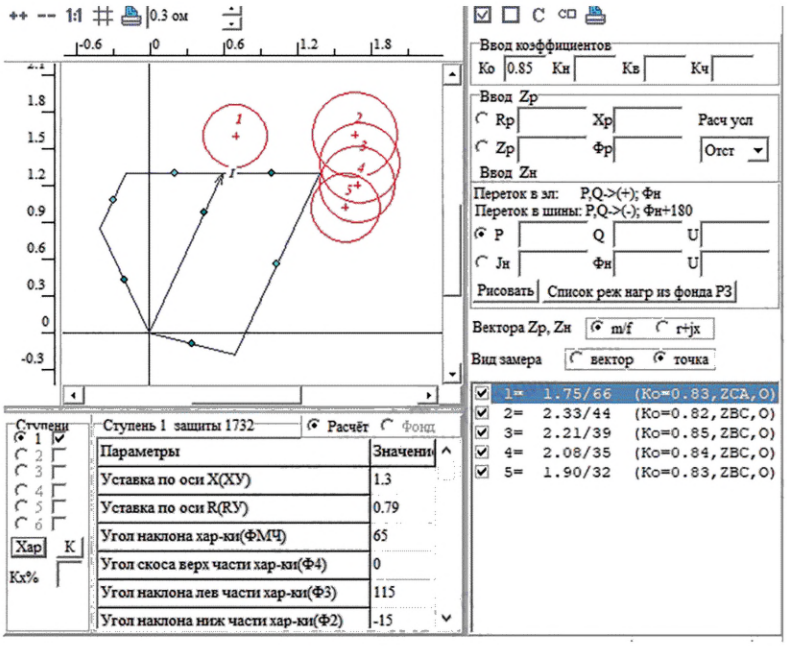


Рисунок 4.8 — Графический выбор параметров настройки ДО с полигональной характеристикой

Для обеспечения отстройки полигональной характеристики от замера $\underline{Z}_р$ достаточно выполнения одного из условий:

- отстройка $Z_{уст}(X_{уст})$ по формулам (4.5) — (4.8);
- отстройка $R_{уст}$ по неравенству (4.9).

Ниже приводятся указания по значениям коэффициентов отстройки применительно к расчетным условиям выбора сопротивлений срабатывания трехступенчатой ДЗ одиночных и параллельных ЛЭП, ЛЭП при наличии ответвлений.

4.2.2.3 Расчет сопротивления срабатывания первой ступени ДЗ по условию отстройки от замеров при КЗ на шинах ПС, примыкающей к противоположному концу ЛЭП

Для одиночных, параллельных ЛЭП и ЛЭП при наличии ответвлений коэффициент отстройки принимается:

- для защит с круговыми характеристиками $k_{отс}$ = 0,85—0,87;
- для защит с полигональными характеристиками $k_{отс}$ = 0,8—0,87.

Примечание — Здесь и далее коэффициент 0,87 принимается на основании формулы (4.1) для значений погрешностей β = 0,05, δ = 0,1. Значение коэффициента 0,85 дает дополнительный запас и повсеместно применяется в отечественной практике выбора параметров настройки ДЗ.

Для ДЗ с полигональными характеристиками минимальное значение коэффициента отстройки принимается в случае коротких ЛЭП (ориентировочные длины ЛЭП разных типов приведены в таблице А.1 приложения А) при соотношении выбранных уставок:

$$\frac{R_{уст}}{X_{уст}} \geq 1 \text{ или } \frac{R_{уст}}{Z_{уст}} \geq 1. \quad (4.10)$$

4.2.2.4 Расчет сопротивления срабатывания ступеней ДЗ ЛЭП при наличии ответвлений по условию отстройки от замеров при КЗ на шинах НН (СН) Т (АТ) ПС на ответвлениях

Коэффициент отстройки принимается:

- для защит с круговыми и полигональными характеристиками $k_{отс}$ = 0,85-0,87, если Т (АТ) ПС на ответвлениях, имеющие регулирование напряжения под нагрузкой, учтены в схеме замещения минимальными сопротивлениями, которые соответствуют крайним или возможным фактическим положениям РПН;
- для защит с круговыми и полигональными характеристиками $k_{отс}$ = 0,7-0,8, если Т (АТ) ПС на ответвлениях, имеющие регулирование напряжения под нагрузкой, учтены в схеме замещения сопротивлениями, которые соответствуют средним положениям РПН.

Указания по расчету реактивных сопротивлений Т (АТ) при наличии РПН приведены в приложении Г.

4.2.2.5 Расчет сопротивления срабатывания ступеней ДЗ ЛЭП по условию отстройки от замеров при междуфазных КЗ на шинах смежного напряжения Т (АТ) ПС, примыкающей к противоположному концу ЛЭП

Для одиночных, параллельных ЛЭП и ЛЭП при наличии ответвлений коэффициент отстройки принимается:

- для защит с круговыми и полигональными характеристиками $k_{отс}$ = 0,85-0,87, если Т (АТ), имеющие регулирование напряжения под нагрузкой, учтены в схеме замещения минимальными сопротивлениями, которые соответствуют крайним или возможным фактическим положениям РПН;
- для защит с круговыми и полигональными характеристиками $k_{отс}$ = 0,7-0,8, если Т (АТ), имеющие регулирование напряжения под нагрузкой, учтены в схеме замещения сопротивлениями, которые соответствуют средним положениям РПН.

Указания по расчету реактивных сопротивлений Т (АТ) при наличии РПН приведены в приложении Г.

4.2.2.6 Расчет сопротивления срабатывания ступеней ДЗ ЛЭП по условию отстройки от замеров при междуфазных КЗ на шинах ПС, примыкающей к участку, смежному с защищаемой ЛЭП, при наличии на смежном участке параллельных ЛЭП.

Для одиночных, параллельных ЛЭП и ЛЭП при наличии ответвлений коэффициент отстройки принимается:

- для защит с круговыми характеристиками $k_{отс}$ = 0,85-0,87;
- для защит с полигональными характеристиками $k_{отс}$ = 0,8-0,87.

Для ДЗ с полигональными характеристиками минимальное значение коэффициента отстройки принимается в случае коротких ЛЭП при соотношении выбранных уставок $R_{уст} / X_{уст} \geq 1$.

4.2.2.7 Расчет сопротивления срабатывания ступеней ДЗ ЛЭП по условию согласования с ДЗ смежной ЛЭП (отстройка от конца зоны действия ступени ДЗ смежной ЛЭП).

Для одиночных, параллельных ЛЭП и ЛЭП при наличии ответвлений коэффициент отстройки принимается:

- при согласовании ступеней ДЗ с однотипными характеристиками $k_{отс}$ = 0,85-0,87;
- при согласовании ступеней ДЗ с разнотипными характеристиками $k_{отс}$ = 0,8.

4.2.2.8 Расчет сопротивления срабатывания ступеней ДЗ ЛЭП по условию согласования с ДЗ Т (АТ) ПС, примыкающей к противоположному концу защищаемой ЛЭП, или ПС на ответвлениях

Для одиночных, параллельных ЛЭП и ЛЭП при наличии ответвлений коэффициент отстройки принимается:

- при согласовании ДЗ с однотипными характеристиками $k_{отс}$ = 0,85-0,87;
- при согласовании ДЗ с разнотипными характеристиками $k_{отс}$ = 0,8, если Т (АТ), имеющие регулирование напряжения под нагрузкой, учтены в схеме замещения минимальными сопротивлениями, которые соответствуют крайним или возможным фактическим положениям РПН.

Если сопротивления Т (АТ) в схеме замещения соответствуют средним положениям РПН, коэффициент отстройки принимается:

- при согласовании ступеней ДЗ с однотипными характеристиками $k_{отс}$ = 0,8;
- при согласовании ступеней ДЗ с разнотипными характеристиками $k_{отс}$ = 0,7.

4.2.2.9 При существенном различии характеристических углов линий смежных ЛЭП (например, воздушная и кабельная линия), при наличии на смежных участках сети ДЗ с разнотипными характеристиками срабатывания существует повышенный риск неселективной работы защит, особенно в случае КЗ через переходное сопротивление.

Для уменьшения вероятности неселективного действия ДЗ смежных сетевых элементов с разнотипными характеристиками срабатывания рекомендуется:

- согласование полигональной характеристики с круговой по параметру R проводить с вписанной полигональной характеристикой в круговую характеристику ступени ДЗ, с которой проводится согласование;
- согласование круговой характеристики с полигональной проводить с вписанной круговой характеристикой в полигональную характеристику ступени ДЗ, с которой проводится согласование.

В случае выполнения рекомендации коэффициенты отстройки допускается принимать как при согласовании ДЗ с однотипными характеристиками.

4.2.3 Коэффициент сокращения зоны ДЗ смежных сетевых элементов

Согласование ДЗ ЛЭП с ДЗ смежных сетевых элементов проводится методом поиска конца зоны действия ступени, с которой проводится согласование. При этом необходимо учитывать возможное сокращение зоны защиты, с которой ведется согласование, из-за погрешностей ТТ и ТН и релейной аппаратуры.

Возможное сокращение зоны ДЗ с круговыми и полигональными характеристиками учитывается коэффициентом сокращения:

$$k_{\text{сокр}} = (1 - \alpha). \tag{4.11}$$

Значение коэффициента α принимается с учетом класса точности ТТ и ТН и допускаемой погрешности характеристики срабатывания ДЗ относительно заданных параметров настройки по техническим данным конкретного устройства РЗ.

Для ТТ класса точности 10Р и ТН класса точности 3Р ориентировочное значение α принимается равным 0,1.

4.2.4 Согласование ДЗ ЛЭП с токовыми защитами сетевых элементов предыдущих участков сети

В качестве токовых защит, с которыми проводится согласование ступеней ДЗ ЛЭП от междуфазных КЗ, могут рассматриваться резервные токовые защиты от междуфазных КЗ смежных ЛЭП, Т (АТ) или присоединений стороны смежного напряжения Т (АТ) ПС, примыкающей к противоположному концу защищаемой ЛЭП, и ПС на ответвлениях.

Расчет сопротивления срабатывания ступени ДЗ по согласованию с резервной токовой защитой сетевого элемента предыдущего участка сети проводится методом поиска конца зоны, надежно охватываемой токовой защитой, с которой проводится согласование, и отстройкой от полученного расчетного сопротивления в соответствии с неравенством

$$\underline{Z}^{N}_{\text{уст}} \le k_{\text{отс}} \cdot \left| \underline{Z}_{1\text{л}} + \frac{\underline{Z}_{\text{расч}}}{k_{\text{т}}} \right| \cdot d, \tag{4.12}$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки;

$\underline{Z}^{N}_{\text{уст}}$ — сопротивление срабатывания N-й согласуемой ступени защиты;

$\underline{Z}_{1\text{л}}$ — сопротивление прямой последовательности участка сети между местом установки ДЗ ЛЭП и защиты, с которой проводится согласование;

$\underline{Z}_{\text{расч}}$ — сопротивление зоны, надежно (с коэффициентом надежности $k_{\text{н}}$, равным 1,1) охватываемой токовой защитой, с которой проводится согласование в расчетных для согласования условиях при металлическом КЗ;

$k_{\text{т}}$ — коэффициент токораспределения, равный отношению тока, протекающего в месте установки ДЗ ЛЭП, к току в месте установки защиты, с которой проводится согласование в расчетных для согласования условиях при металлическом КЗ;

d — параметр, который учитывает возможное отличие угла расчетного сопротивления от угла максимальной чувствительности круговой характеристики или угла наклона полигональной характеристики рассматриваемой ступени ДЗ ЛЭП, определяется по формулам (4.3) или (4.7) соответственно.

Коэффициент отстройки определяется по формуле (4.1), ниже приводятся рекомендации по значениям $k_{\text{отс}}$ применительно к расчетным условиям выбора сопротивлений срабатывания ДЗ ЛЭП по условию согласования с резервными токовыми защитами сетевых элементов предыдущего участка сети.

При выполнении защиты сетевого элемента предыдущего участка сети комбинированной защитой по току и напряжению ДЗ ЛЭП должна быть согласована отдельно с токовым органом и органом напряжения комбинированной защиты. За сопротивление срабатывания принимается значение, удовлетворяющее всем расчетным условиям, меньшее из полученных значений.

При согласовании ДЗ ЛЭП с МТЗ или токовым органом комбинированной защиты по току и напряжению смежной ЛЭП расчетным видом повреждения является двухфазное КЗ, поскольку при этом виде повреждения ток меньше, чем при трехфазном КЗ, а, следовательно, меньше и сопротивление зоны, надежно отхватываемой токовой защитой.

При согласовании ДЗ ЛЭП с органом напряжения комбинированной защиты по току и напряжению смежной ЛЭП за расчетный вид повреждения может быть принято любое металлическое междуфазное КЗ, поскольку сопротивление зоны, надежно охватываемой органом напряжения, не изменится.

Согласование ДЗ ЛЭП с МТЗ или комбинированной защитой по току и напряжению Т ПС противоположного конца ЛЭП (ПС на ответвлениях ЛЭП) при подключении резервной защиты к ТТ (ТН), установленным на стороне ВН Т, проводится при трехфазных и двухфазных КЗ, в случае двухфазных КЗ необходимо учитывать схему соединения обмоток силовых Т Y/Δ.

Сопротивление $\underline{Z}_{расч}$, входящее в неравенство (4.12), допускается определять графически по кривой изменения тока при согласовании с МТЗ (токовым органом комбинированной защиты по току и напряжению) — рисунок 4.9, а) или по кривой изменения напряжения при согласовании с органом напряжения комбинированной защиты по току и напряжению — рисунок 4.9, б) в месте установки защиты, с которой проводится согласование.

Ниже приводятся указания по значениям коэффициента отстройки при согласовании ступеней ДЗ с токовыми защитами сетевых элементов предыдущих участков сети для одиночных и параллельных ЛЭП, ЛЭП при наличии ответвлений и ЛЭП, работающих по схеме блока Т (АТ) — линия.

4.2.4.1 При согласовании ступени ДЗ ЛЭП с резервной токовой защитой или комбинированной защитой по току и напряжению смежной ЛЭП коэффициент отстройки принимается:

- для ДЗ одиночных, параллельных ЛЭП и ЛЭП при наличии ответвлений $k_{отс}$ = 0,85-0,87;
- для ДЗ ЛЭП, работающих по схеме блока Т (АТ) — линия, при подключении ДЗ к ТН на стороне НН (СН) Т (АТ) блока $k_{отс}$ = 0,85-0,87, если Т (АТ) блока, имеющий регулирование напряжения под нагрузкой, учтен в схеме замещения минимальными сопротивлениями, которые соответствуют крайним или возможным фактическим положениям РПН;
- $k_{отс}$ = 0,7-0,8, если Т (АТ) блока, имеющий регулирование напряжения под нагрузкой, учтен в схеме замещения расчетными сопротивлениями, которые соответствуют средним положениям РПН.

4.2.4.2 При согласовании ступени ДЗ ЛЭП с резервными токовыми защитами или комбинированными защитами по току и напряжению Т (АТ) или присоединений стороны смежного напряжения Т (АТ) ПС противоположного конца ЛЭП (ПС на ответвлениях ЛЭП) коэффициент отстройки принимается:

- $k_{отс}$ = 0,85-0,87, если Т (АТ), имеющие регулирование напряжения под нагрузкой, учтены в схеме замещения минимальными сопротивлениями, которые соответствуют крайним или возможным фактическим положениям РПН;
- $k_{отс}$ = 0,7-0,8, если Т (АТ), имеющие регулирование напряжения под нагрузкой, учтены в схеме замещения сопротивлениями, которые соответствуют средним положениям РПН.

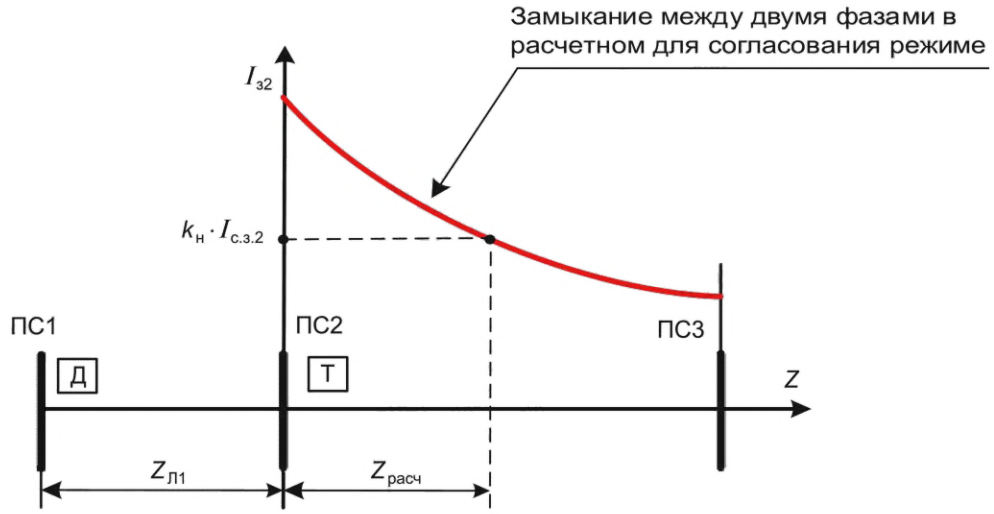
4.2.5 Проверка чувствительности ДО с круговыми и полигональными характеристиками

Оценка надежности работы ДО при КЗ в защищаемой зоне проводится с помощью коэффициента чувствительности, который должен обеспечить требуемый запас охвата дистанционного замера характеристикой срабатывания. При этом следует учитывать погрешность ТТ и ТН, погрешность из-за неточности расчета первичных электрических величин и допускаемое отклонение характеристики срабатывания ДО относительно заданных параметров настройки согласно техническим данным для конкретного устройства РЗ.

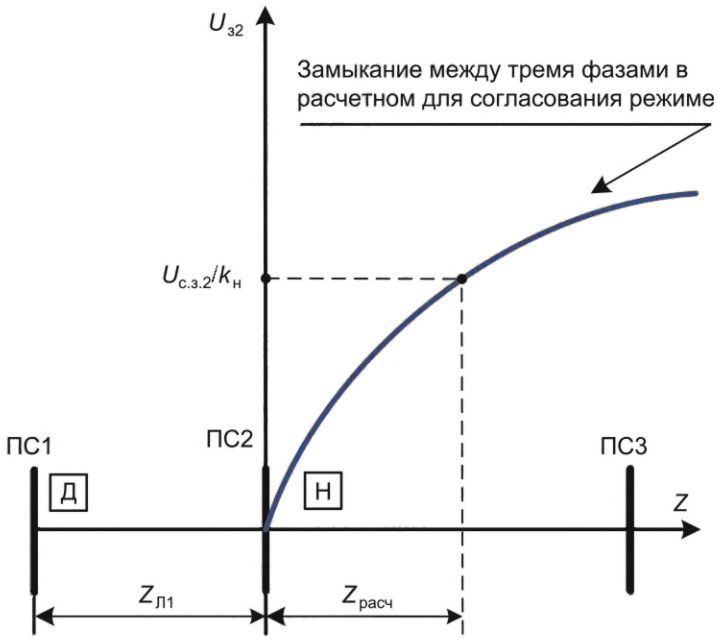
Надежная работа защиты обеспечивается в определенном диапазоне токов КЗ, рекомендации по проверке чувствительности ступеней ДЗ по току точной работы приведены в 9.2.

4.2.5.1 Проверка чувствительности ДО с круговыми и полигональными характеристиками при КЗ в защищаемой зоне

Чувствительность ДО с направленной круговой характеристикой, проходящей через начало координат (рисунок 4.10), определяется как отношение сопротивления срабатывания $Z_{ср}$ к модулю расчетного сопротивления, при этом в качестве $Z_{ср}$ принимается расстояние от начала координат до точки на границе характеристики срабатывания при угле, равном углу расчетного сопротивления $\varphi_р$.



а)



б)

а) — согласование с МТЗ или токовым органом комбинированной защиты по току и напряжению;
б) — согласование с органом напряжения комбинированной защиты по току и напряжению

Д — дистанционная защита; Т — максимальная токовая защита или токовый орган комбинированной защиты по току и напряжению; Н — орган напряжения комбинированной защиты по току и напряжению; $I_{з2}$, $U_{з2}$ — ток и напряжение в месте установки защиты, с которой проводится согласование; $I_{с.з.2}$, $U_{с.з.2}$ — ток и напряжение срабатывания (уставки) защиты, с которой проводится согласование; $k_н$ — коэффициент надежности

Рисунок 4.9 — Графическое определение $Z_{расч}$ при согласовании ДЗ с защитами тока и напряжения

Коэффициент чувствительности определяется по формуле

$$k_{чZ} = \frac{Z_{ср}}{|\underline{Z}_р|} = \frac{Z_{уст} \cdot \cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_р\right)}{|\underline{Z}_р|}, \quad (4.13)$$

где $k_{чZ}$ — коэффициент чувствительности по полному сопротивлению;
$Z_{уст}$ — полное сопротивление срабатывания ступени ДЗ;
$|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного сопротивления;
$\varphi_{мч}$ — угол максимальной чувствительности круговой характеристики.

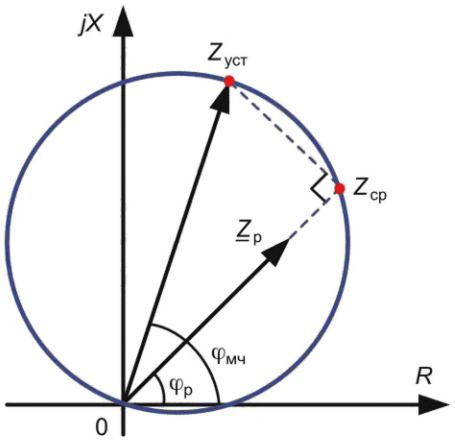


Рисунок 4.10 — Проверка чувствительности ДО с направленной круговой характеристикой, проходящей через начало координат

ДО с направленной круговой характеристикой со смещением в первый квадрант комплексной плоскости (рисунок 4.11) имеет две точки пересечения прямой по направлению вектора $\underline{Z}_р$ с характеристикой срабатывания. В этом случае для проверки чувствительности ДО используются следующие способы.

1) Проверка чувствительности по отношению к началу координат.

В качестве сопротивления срабатывания $Z_{ср}$ так же, как в случае круговой характеристики без смещения, принимается расстояние от начала координат до точки на границе характеристики при угле, равном углу расчетного сопротивления $\varphi_р$.

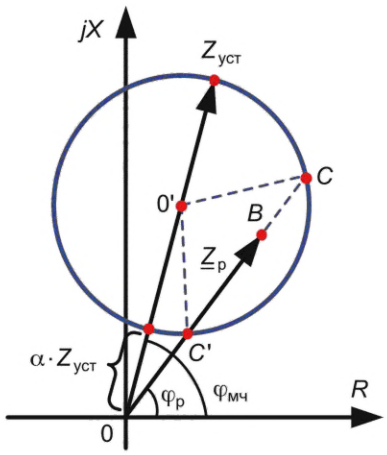


Рисунок 4.11 — Определение чувствительности ДО с круговой характеристикой со смещением по отношению к началу координат

Коэффициент чувствительности для верхней точки C пересечения рассматриваемой прямой с границей характеристики срабатывания определяется как отношение сопротивления срабатывания $Z_{ср}$ к модулю расчетного сопротивления $\underline{Z}_р$:

$$k_ч = \frac{Z_{ср}}{|\underline{Z}_р|} = \frac{OC}{|\underline{Z}_р|}. \quad (4.14)$$

Коэффициент чувствительности для нижней точки C' пересечения рассматриваемой прямой с границей характеристики определяется как отношение модуля расчетного сопротивления $\underline{Z}_р$ к сопротивлению срабатывания $Z_{ср}$:

$$k_ч = \frac{|\underline{Z}_р|}{Z_{ср}} = \frac{|\underline{Z}_р|}{OC'}. \quad (4.15)$$

Для треугольника $OO'C$ справедливо равенство

$$OC^2 + OO'^2 - 2 \cdot OC \cdot OO' \cos(\varphi_{мч} - \varphi_р) = O'C^2. \quad (4.16)$$

Радиус окружности $O'C$ определяется по формуле

$$O'C = \frac{Z_{уст}}{2} \cdot (1 - a), \quad (4.17)$$

где a — смещение круговой характеристики в о.е. от $Z_{уст}$.

Отрезок OO' определяется по формуле

$$OO' = \frac{Z_{уст}}{2} \cdot (1 + a). \quad (4.18)$$

Выражение (4.18) можно представить в виде:

$$OC^2 - 2 \cdot OC \cdot OO' \cos(\varphi_{мч} - \varphi_р) + OO'^2 - O'C^2 = 0. \quad (4.19)$$

После подстановки формул (4.17) и (4.18) формула для определения OC принимает вид:

$$OC = \frac{Z_{уст}}{2}\left[(1+a)\cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_р\right) \pm \sqrt{(1+a)^2 \cos^2\left(\varphi_{мч} - \varphi_р\right) - 4a}\right]. \quad (4.20)$$

Значение OC со знаком «плюс» перед радикалом соответствует верхней точке C пересечения прямой по направлению вектора $\underline{Z}_р$ с характеристикой срабатывания. Коэффициент чувствительности в этом случае определяется по формуле

$$k_ч = \frac{Z_{уст} \cdot \left[(1+a)\cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_р\right) + \sqrt{(1+a)^2 \cos^2\left(\varphi_{мч} - \varphi_р\right) - 4a}\right]}{2 \cdot |\underline{Z}_р|}. \quad (4.21)$$

Значение OC со знаком «минус» перед радикалом соответствует нижней точке C' пересечения прямой по направлению вектора $\underline{Z}_р$ с характеристикой срабатывания. Коэффициент чувствительности в этом случае определяется по формуле

$$k_ч = \frac{2 \cdot |\underline{Z}_р|}{Z_{уст} \cdot \left[(1+a)\cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_р\right) - \sqrt{(1+a)^2 \cos^2\left(\varphi_{мч} - \varphi_р\right) - 4a}\right]}. \quad (4.22)$$

Расчетный коэффициент чувствительности принимается равным минимальному значению, рассчитанному по формуле (4.21) или (4.22).

Если конец вектора $\underline{Z}_р$ находится в центре окружности O', в этом случае $\underline{Z}_р = OO'$, коэффициент чувствительности с учетом (4.18) определяется по формулам:

$$k_ч = \frac{2}{1+a} \quad (4.23)$$

или

$$k_ч = \frac{1+a}{2a}. \quad (4.24)$$

2) Проверка чувствительности по отношению к центру круговой характеристики.

Определение коэффициента чувствительности по формулам (4.21) и (4.22) не отражает того факта, что для измерительного ДО, выполненного по схеме сравнения, наилучшие условия срабатывания соответствуют нахождению конца вектора $\underline{Z}_р$ в центре O' круговой характеристики.

В связи с этим чувствительность целесообразно определять не по отношению к началу координат, а по отношению к центру O' круговой характеристики (рисунок 4.12).

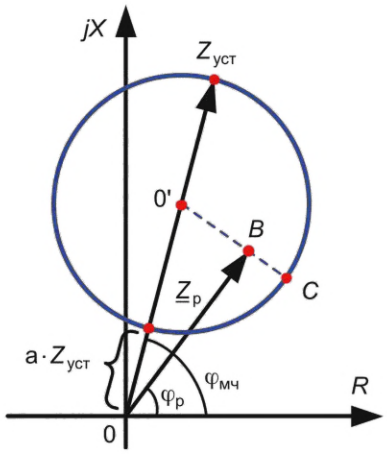


Рисунок 4.12 — Определение чувствительности ДО с круговой характеристикой со смещением по отношению к центру круговой характеристики

В этом случае коэффициент чувствительности определяется как отношение радиуса окружности $O'C$ к расстоянию от центра окружности до конца вектора $\underline{Z}_р$:

$$k_ч = \frac{O'C}{O'B}. \quad (4.25)$$

Радиус окружности $O'C$ определяется по формуле (4.17).

Для треугольника $OO'B$ справедливо равенство:

$$|\underline{Z}_р|^2 + OO'^2 - 2 \cdot |\underline{Z}_р| \cdot OO' \cos(\varphi_{мч} - \varphi_р) = O'B^2. \quad (4.26)$$

Отрезок OO' определяется по формуле (4.18), после подстановки отрезок $O'B$ равен:

$$O'B = \sqrt{|\underline{Z}_р|^2 + \left(\frac{Z_{уст}}{2} \cdot (1+a)\right)^2 - |\underline{Z}_р| \cdot Z_{уст}(1+a)\cos(\varphi_{мч} - \varphi_р)}. \quad (4.27)$$

Коэффициент чувствительности определяется по формуле

$$k_ч = \frac{Z_{уст} \cdot (1-a)}{2 \cdot \sqrt{|\underline{Z}_р|^2 + \left(\frac{Z_{уст}}{2} \cdot (1+a)\right)^2 - |\underline{Z}_р| \cdot Z_{уст}(1+a)\cos(\varphi_{мч} - \varphi_р)}}. \quad (4.28)$$

3) Проверка чувствительности графическим способом.

На рисунке 4.13 представлен графический способ проверки чувствительности. Минимальное расстояние от конца вектора $\underline{Z}_р$ до характеристики срабатывания, определенное по прямой, соединяющей центр окружности O' и точку на границе характеристики срабатывания, должно обеспечить запас по чувствительности, определяемый коэффициентом $k_ч$.

Зона неопределенности вокруг конца вектора $\underline{Z}_р$, обусловленная погрешностями, идеализированно представляется в виде окружности, радиус которой определяется по формуле

$$r = |\underline{Z}_р| \cdot (k_ч - 1), \quad (4.29)$$

где $k_ч$ — требуемый коэффициент чувствительности.

Расчетный коэффициент чувствительности может быть определен по формуле

$$k_ч = 1 + \frac{r}{|\underline{Z}_р|} = 1 + \frac{BC}{|\underline{Z}_р|} = 1 + \frac{O'C - O'B}{|\underline{Z}_р|}, \quad (4.30)$$

где радиус окружности $O'C$ определяется по формуле (4.17), расстояние от центра окружности до конца вектора $\underline{Z}_р$ $O'B$ определяется по формуле (4.27).

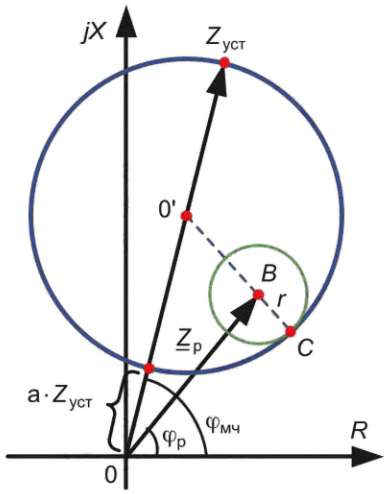


Рисунок 4.13 — Графический метод проверки чувствительности ДО с круговой характеристикой

Если конец вектора $\underline{Z}_р$ находится в центре окружности O', в этом случае $\underline{Z}_р = OO'$, подставив формулу (4.18) для OO', можно определить коэффициент чувствительности:

$$k_ч = 1 + \frac{O'C}{|\underline{Z}_р|} = 1 + \frac{1-a}{1+a} = \frac{2}{1+a}. \quad (4.31)$$

4) Проверка зацепления круговых характеристик при наличии смещения.

Смещение круговой характеристики в первый квадрант комплексной плоскости может применяться для третьей ступени ДЗ в целях отстройки от нагрузочных режимов работы энергосистемы. В этом случае зоны, охватываемые второй и третьей ступенями, должны перекрываться для обеспечения отключения КЗ на защищаемой ЛЭП. Проверка зацепления характеристик проводится с учетом возможного отклонения сопротивления срабатывания относительно заданных параметров настройки и с учетом необходимого запаса.

При одинаковых углах максимальной чувствительности характеристик второй и третьей ступеней ДЗ $\varphi^{II}_{мч} = \varphi^{III}_{мч}$ (рисунок 4.14) надежное зацепление характеристик обеспечивается, если удовлетворяется неравенство

$$Z^{II}_{уст} - a^{III} \cdot Z^{III}_{уст} \geq k_с \cdot \left(r^{II} + r^{III}\right), \quad (4.32)$$

где $Z^{II}_{уст}$, $Z^{III}_{уст}$ — сопротивление срабатывания второй и третьей ступеней;

a^{III} — смещение характеристики третьей ступени в о.е. от $Z^{III}_{уст}$;

$k_с$ — коэффициент, учитывающий возможное сокращение характеристик срабатывания и необходимый запас, принимается равным 0,1-0,2;

r^{II}, r^{III} — радиусы характеристик срабатывания второй и третьей ступеней ДЗ, соответственно, рассчитываются по формулам:

$$r^{II} = \frac{Z^{II}_{уст}}{2} \cdot \left(1 + a^{II}\right); \quad r^{III} = \frac{Z^{III}_{уст}}{2} \cdot \left(1 - a^{III}\right), \quad (4.33)$$

где a^{II} — смещение характеристики второй ступени в о.е. от $Z^{II}_{уст}$.

При различных углах максимальной чувствительности второй и третьей ступеней $\varphi^{II}_{мч} \neq \varphi^{III}_{мч}$ неравенство (4.32) использовать некорректно, проверку зацепления характеристик в этом случае следует выполнить графическим способом.

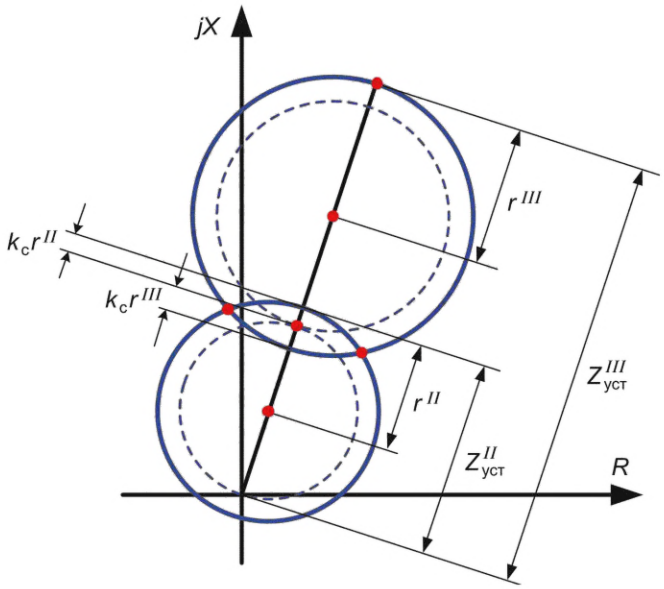


Рисунок 4.14 — Проверка зацепления ДО с круговыми характеристиками при наличии смещения

4.2.5.2 Проверка чувствительности ДО с полигональной характеристикой срабатывания

Проверка чувствительности ДО с полигональной характеристикой (рисунок 4.15) при КЗ в защищаемой зоне проводится отдельно по полному или реактивному и активному сопротивлениям срабатывания по следующим формулам:

$$k_{чZ} = \frac{Z_{уст}}{OB} = \frac{Z_{уст} \cdot \sin\varphi_{хар}}{|\underline{Z}_р| \cdot \sin\varphi_р}, \quad (4.34)$$

$$k_{чX} = \frac{X_{уст}}{OA} = \frac{X_{уст}}{|\underline{Z}_р| \cdot \sin\varphi_р}, \quad (4.35)$$

$$k_{чR} = \frac{R_{уст}}{OC} = \frac{R_{уст} \cdot \sin\varphi_{прав}}{|\underline{Z}_р| \cdot \sin(\varphi_{прав} - \varphi_р)}, \quad (4.36)$$

где $k_{чZ}$ — коэффициент чувствительности по полному сопротивлению;
$k_{чX}$ — коэффициент чувствительности по реактивному сопротивлению;
$k_{чR}$ — коэффициент чувствительности по активному сопротивлению;
$Z_{уст}$ — полное сопротивление срабатывания ступени ДЗ;
$X_{уст}$ — реактивное сопротивление срабатывания ступени ДЗ;
$R_{уст}$ — активное сопротивление срабатывания ступени ДЗ;
$\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики;
$\varphi_{прав}$ — угол наклона правой боковой грани характеристики;
$|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного сопротивления.

Надежная работа ДО с полигональной характеристикой обеспечивается, если оба коэффициента чувствительности $k_{чZ}$ или ($k_{чX}$ и $k_{чR}$) больше требуемых значений.

Проверку чувствительности по активному сопротивлению срабатывания допустимо определить графически по минимальному расстоянию r от конца вектора $\underline{Z}_р$ до правой боковой стороны характеристики срабатывания (рисунок 4.16):

$$r = |\underline{Z}_р| \cdot (k_ч - 1), \quad (4.37)$$

где $k_ч$ — требуемый коэффициент чувствительности.

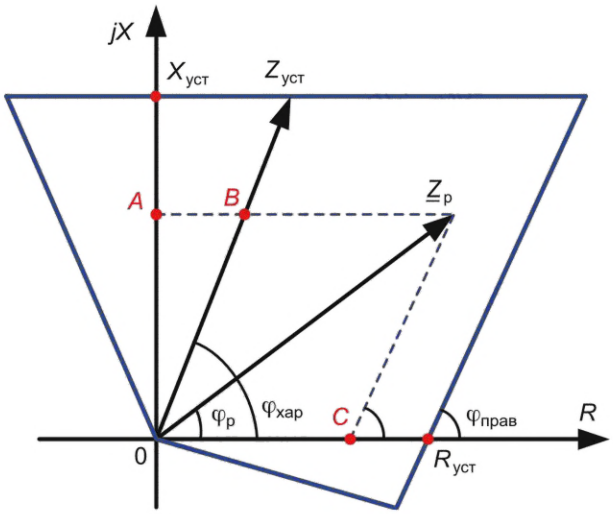


Рисунок 4.15 — Проверка чувствительности ДО с полигональной характеристикой

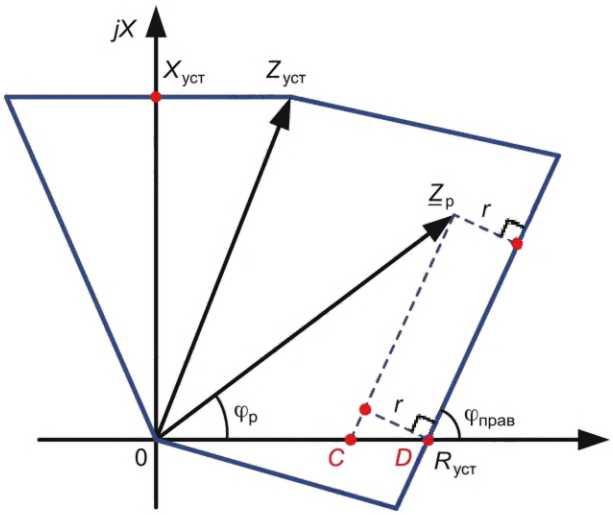


Рисунок 4.16 — Обеспечение чувствительности по активному сопротивлению срабатывания $R_{уст}$

Из геометрических построений следует:

$$CD = \frac{\left|\underline{Z}_р\right| \cdot \left(k_ч - 1\right)}{\sin \varphi_{прав}}. \tag{4.38}$$

Из формулы (4.36) можно определить:

$$OC = \frac{\left|\underline{Z}_р\right| \cdot \sin\left(\varphi_{прав} - \varphi_р\right)}{\sin \varphi_{прав}}. \tag{4.39}$$

Неравенство для расчета активного сопротивления срабатывания по условию обеспечения чувствительности определяется из формул (4.38) и (4.39):

$$R_{уст} \geq \left|\underline{Z}_р\right| \cdot \frac{\sin\left(\varphi_{прав} - \varphi_р\right) + \left(k_ч - 1\right)}{\sin \varphi_{прав}}. \tag{4.40}$$

Проверку чувствительности допускается проводить графическим способом (рисунок 4.17). Зона неопределенности вокруг конца вектора $\underline{Z}_р$, обусловленная погрешностями, идеализированно представляется в виде окружности, радиус r которой определяется по формуле (4.37) и обеспечивает

требуемое по условию обеспечения чувствительности минимальное расстояние от конца вектора $\underline{Z}_р$ до границ характеристики срабатывания.

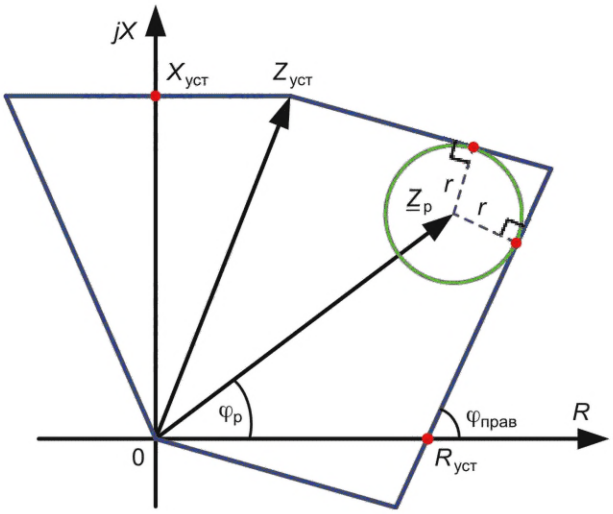


Рисунок 4.17 — Графический метод проверки чувствительности ДО с полигональной характеристикой

Углы ограничения характеристики во втором и четвертом квадрантах комплексной плоскости (рисунок 4.18) определяются исходя из обеспечения чувствительности при КЗ через переходные сопротивления:

- угол φ_{IV} при КЗ в начале защищаемой ЛЭП;
- угол φ_{II} при КЗ в конце защищаемой ЛЭП или зоне дальнего резервирования.

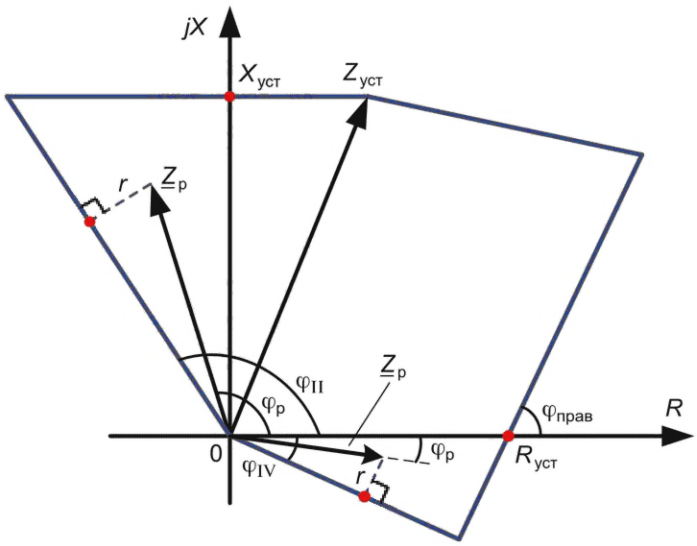


Рисунок 4.18 — Определение углов ограничения характеристики во втором и четвертом квадранте

При расчетах необходимо учитывать доаварийные нагрузочные режимы:

− при выборе угла φ_{IV} нагрузочные режимы с прямым перетоком мощности по защищаемой ЛЭП, когда замер $\underline{Z}_р$ может оказаться в четвертом квадранте комплексной плоскости;

− при выборе угла φ_{II} нагрузочные режимы со встречным перетоком мощности по защищаемой ЛЭП, когда замер $\underline{Z}_р$ может оказаться во втором квадранте комплексной плоскости.

Минимальное расстояние r от конца вектора $\underline{Z}_р$ до характеристики срабатывания определяется по формуле

$$r = |\underline{Z}_р| \cdot (k_ч - 1), \quad (4.41)$$

где $k_ч$ — требуемый коэффициент чувствительности.

Углы ограничения полигональной характеристики определяются графическим способом или по неравенствам:

$$\varphi_{II} \geq \arcsin(k_ч - 1) + \varphi_р, \quad (4.42)$$

$$\varphi_{IV} \geq \arcsin(k_ч - 1) - \varphi_р, \quad (4.43)$$

где $\varphi_р$ — угол расчетного сопротивления $\underline{Z}_р$, положительное или отрицательное значение угла определяется в зависимости от положения замера на комплексной плоскости. Если $\underline{Z}_р$ находится в первом квадранте и значение $\varphi_р \geq \arcsin(k_ч - 1)$, значение угла φ_{IV} принимается любым из располагаемого диапазона регулирования параметра.

На рисунке 4.19 приведена сравнительная проверка чувствительности ДО с круговой и полигональной характеристикой с одинаковым сопротивлением срабатывания $Z_{уст}$ для случая КЗ через переходное сопротивление в зоне дальнего резервирования при встречном перетоке мощности по защищаемой ЛЭП. В этом случае дистанционный замер может находиться во втором квадранте комплексной плоскости.

Для обеспечения чувствительности ДО с полигональной характеристикой может потребоваться активное сопротивление срабатывания $R_{уст2}$ большее, чем $R_{уст1}$, равное $Z_{уст}$ / 2, и угол ограничения характеристики во втором квадранте, превышающий обычно принимаемое значение 115°.

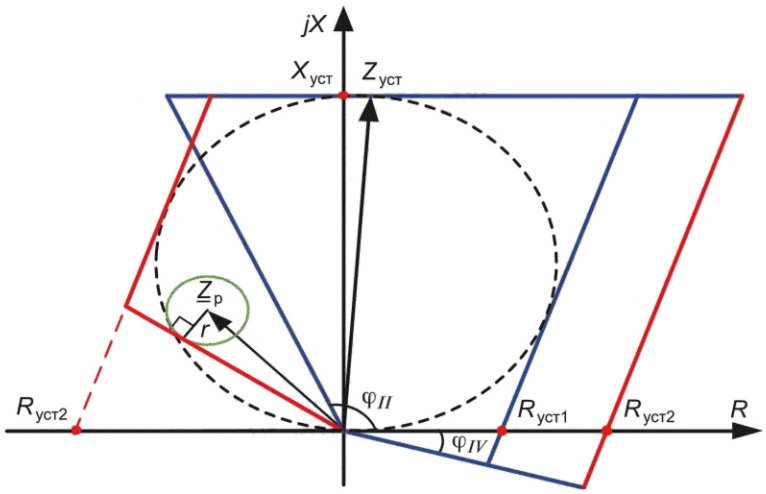


Рисунок 4.19 — Сравнительная проверка чувствительности ДО с полигональной и круговой характеристикой при КЗ в зоне дальнего резервирования

4.2.5.3 Нормативные требования по обеспечению чувствительности ДЗ ЛЭП

В соответствии с пунктом 11 требований [2] при оценке выполнения нормативных требований к чувствительности резервных защит ЛЭП в качестве расчетного случая принимается металлическое КЗ.

Расчет и выбор сопротивлений срабатывания ступеней ДЗ ЛЭП по чувствительности к металлическим КЗ в зоне следует проводить с учетом базовых значений коэффициентов чувствительности.

В соответствии с пунктом 14 требований [2] базовые значения коэффициентов чувствительности для ступеней ДЗ, предназначенных для действия в пределах всей защищаемой ЛЭП, должны приниматься равными не менее:

- 1,5 — для пусковых измерительных органов любого типа;
- 1,5 — для ДО по сопротивлению срабатывания при отсутствии резервной ступени, обеспечивающей коэффициент чувствительности 1,5;
- 1,25 — для ДО по сопротивлению срабатывания при наличии резервной ступени, обеспечивающей коэффициент чувствительности 1,5.

В соответствии с пунктом 15 требований [2] базовые значения коэффициентов чувствительности для ступеней ДЗ, выполняющих функции дальнего резервирования, должны приниматься равными не менее:

- 1,2 — для ДО по сопротивлению срабатывания.

4.2.5.4 Указания по проверке чувствительности трехступенчатой ДЗ ЛЭП

Чувствительность ДО ступеней ДЗ ЛЭП при металлических КЗ необходимо обеспечить в соответствии с нормативными требованиями по чувствительности, указанными в 4.2.5.3.

Наличие переходного сопротивления в месте КЗ может оказать существенное влияние на чувствительность ДО защиты.

Указания по расчету переходных сопротивлений при междуфазных КЗ и при КЗ на землю приведены в приложении Д.

Проверку чувствительности быстродействующих ступеней ДЗ (ступеней ДЗ без выдержки времени, телеускоряемых ступеней ДЗ) следует проводить при металлических КЗ и при КЗ через переходные сопротивления в нормальной и ремонтных схемах сети при нулевом перетоке мощности по защищаемой ЛЭП, а также при доаварийных перетоках мощности, характерных для рассматриваемых схем сети.

Проверку чувствительности ступеней ДЗ с выдержками времени следует проводить при металлических КЗ и при КЗ через переходные сопротивления в нормальной и ремонтных схемах сети.

Указания по значениям коэффициентов чувствительности приводятся ниже применительно к расчетным условиям выбора сопротивлений срабатывания трехступенчатой ДЗ одиночных и параллельных ЛЭП, ЛЭП при наличии ответвлений и ЛЭП, работающих по схеме блока Т (АТ) — линия.

1) Проверка чувствительности ДО первой ступени ДЗ с неполным охватом защищаемой ЛЭП.

Для обеспечения надежного перекрытия зон действия первых ступеней ДЗ с двух сторон защищаемой ЛЭП необходимо создать зону охвата ДО первых ступеней с круговыми и полигональными характеристиками не менее (0,65—0,75) от полного сопротивления линии при металлических КЗ.

Проверка чувствительности первой ступени ДЗ от всех видов КЗ с полигональной характеристикой выполняется при КЗ через переходные сопротивления в начале защищаемой ЛЭП и в конце зоны охвата по сопротивлению срабатывания $Z_{уст}$ или $X_{уст}$ при соответствующих видах повреждений. Если полигональная характеристика имеет наклон (скос) верхней грани, зона охвата определяется с учетом скоса (рисунок 4.20).

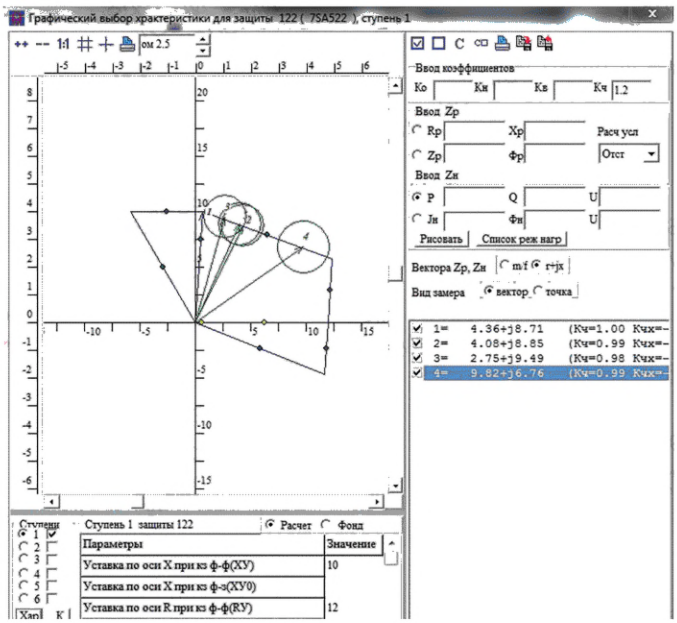


Рисунок 4.20 — Проверка обеспечения чувствительности при КЗ в конце зоны охвата по сопротивлению $Z_{уст}$ или $X_{уст}$

Рекомендуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности для ДО с полигональными характеристиками срабатывания.

По активному сопротивлению срабатывания $k_{чR}(k_ч)$ и углу ограничения характеристики в четвертом квадранте $k_ч$:

- 1,25-1,5 при КЗ в начале ЛЭП.

По активному сопротивлению срабатывания $k_{чR}(k_ч)$:

- 1,1-1,2 при КЗ в конце зоны срабатывания, определяемой уставками $Z_{уст}$ или $X_{уст}$ в режиме транзита;

- 1,2-1,5 при КЗ в конце зоны срабатывания, определяемой уставками $Z_{уст}$ или $X_{уст}$, и каскадном отключении повреждения с противоположной стороны ЛЭП.

2) Проверка чувствительности ДО второй ступени ДЗ с охватом всей защищаемой ЛЭП.

Проверка чувствительности ДО второй ступени ДЗ проводится при междуфазных КЗ в конце защищаемой ЛЭП. Для ЛЭП при наличии ответвлений проверка чувствительности проводится при междуфазных КЗ на каждом конце ЛЭП, противоположному месту установки рассматриваемой защиты.

При металлических КЗ требуется обеспечить базовые значения коэффициентов чувствительности $k_{чZ}$ или $k_{чX}$ и $k_{чR}(k_ч)$, соответственно, для ДО с круговыми и полигональными характеристиками срабатывания:

- 1,25 (в случае, если ДО третьей ступени обеспечивает коэффициент чувствительности 1,5 при КЗ в конце ЛЭП или на каждом конце ЛЭП с ответвлениями);
- 1,5 (в случае, если ДО третьей ступени не обеспечивает коэффициент чувствительности 1,5 при КЗ в конце ЛЭП или на каждом конце ЛЭП с ответвлениями).

При КЗ через переходные сопротивления рекомендуется обеспечить следующие значения коэффициентов чувствительности $k_{чZ}$ или $k_{чX}$ и $k_{чR}(k_ч)$, соответственно, для ДО с круговыми и полигональными характеристиками:

- 1,1-1,2 при КЗ в конце ЛЭП в режиме транзита;
- 1,2-1,5 при КЗ в конце ЛЭП и одностороннем отключении повреждения с противоположной стороны ЛЭП.

3) Проверка чувствительности ДО третьей ступени ДЗ, выполняющей функции резервирования защит своей ЛЭП и защит смежных сетевых элементов.

Проверка чувствительности ДО третьей ступени ДЗ проводится при металлическом междуфазном КЗ и междуфазных КЗ через переходные сопротивления в конце защищаемой ЛЭП и в конце зоны резервирования.

При металлических КЗ требуется обеспечить базовые значения коэффициентов чувствительности $k_{чZ}$ или $k_{чX}$ и $k_{чR}(k_ч)$,соответственно, для ДО с круговыми и полигональными характеристиками срабатывания:

- 1,5 — при КЗ в конце защищаемой ЛЭП;
- 1,2 — при КЗ в конце зоны резервирования.

При КЗ через переходные сопротивления рекомендуется обеспечить следующие значения коэффициентов чувствительности $k_{чZ}$ или $k_{чX}$ и $k_{чR}(k_ч)$,соответственно, для ДО с круговыми и полигональными характеристиками срабатывания:

- 1,2-1,5 — при КЗ в конце защищаемой ЛЭП;
- 1,1-1,2 — при КЗ в конце зоны резервирования.

4.3 Отстройка от нагрузочных режимов работы энергосистем

Отстройка характеристик срабатывания ДЗ ЛЭП от замеров в полнофазных нагрузочных режимах работы энергосистем проводится в целях исключения ложной работы защиты при отсутствии повреждения.

Сопротивление, измеряемое ДО в нагрузочных режимах, рассчитывается с учетом схем подключения защиты по цепям переменного тока и напряжения.

В случае подключения ДЗ к ТТ и ТН в месте установки защиты расчет выполняется по формулам:

$$\left|\underline{Z}_{нагр}\right| = \frac{\left|\underline{U}_{нагр}\right|}{\sqrt{3}\cdot\left|\underline{I}_{нагр}\right|}, \tag{4.44}$$

$$\left|\underline{Z}_{нагр}\right| = \frac{\left|\underline{U}_{нагр}\right|^2}{\sqrt{P_{нагр}^2 + Q_{нагр}^2}}, \tag{4.45}$$

$$\varphi_{нагр} = \operatorname{arctg}\left(\frac{Q_{нагр}}{P_{нагр}}\right), \tag{4.46}$$

где $|\underline{Z}_{нагр}|$ и $\varphi_{нагр}$ — модуль и угол расчетного сопротивления в нагрузочном режиме;

$\underline{U}_{нагр}$ — междуфазное напряжение в месте установки защиты в нагрузочном режиме;

$\underline{I}_{нагр}$, $P_{нагр}$ и $Q_{нагр}$ — фазный ток, активная и реактивная мощность в месте установки защиты в нагрузочном режиме.

Отстройка характеристик срабатывания ДЗ ЛЭП проводится от нагрузочных режимов, при этом следует учитывать условие возврата ДО в послеаварийных нагрузочных режимах после отключения внешнего КЗ.

Для ЛЭП при наличии ответвлений следует учитывать режим самозапуска двигателей нагрузки ПС, питающихся от защищаемой ЛЭП, при успешном АПВ со стороны, где установлена рассматриваемая защита.

Режим самозапуска является более тяжелым режимом, чем нормальный пуск отдельных двигателей, и характеризуется значительным снижением напряжения и увеличением тока, что обусловлено одновременным разворотом большого числа двигателей, а также наличием подключенной нагрузки. Характер протекания режима самозапуска зависит от длительности перерыва питания, типа двигателей (синхронные, асинхронные), количественного содержания двигательной нагрузки и состава потребителей промышленного энергорайона.

Сопротивление в режиме самозапуска двигательной нагрузки рассчитывается по формуле

$$\left|\underline{Z}_{\text{нагр сз}}\right| = \frac{\left|\underline{U}_{\text{мин сз}}\right|}{\sqrt{3}\cdot k_{\text{сз}}\cdot\left|\underline{I}_{\Sigma\ \text{нагр}}\right|}. \tag{4.47}$$

Угол расчетного сопротивления в режиме самозапуска определяется исходя из предположения, что подключенная нагрузка на ПС ответвлений осталась равной номинальной:

$$\varphi_{\text{нагр сз}} = \arccos\left(\frac{P_{\Sigma\ \text{нагр}}}{\sqrt{3}\cdot\left|\underline{U}_{\text{мин сз}}\right|\cdot k_{\text{сз}}\cdot\left|\underline{I}_{\Sigma\ \text{нагр}}\right|}\right), \tag{4.48}$$

где $|\underline{Z}_{\text{нагр сз}}|$ и $\varphi_{\text{нагр сз}}$ — модуль и угол расчетного сопротивления в режиме самозапуска;

$\underline{U}_{\text{мин сз}}$ — минимальное междуфазное напряжение в месте установки защиты в режиме самозапуска, принимается равным 0,8-0,9 от минимального рабочего напряжения;

$\underline{I}_{\Sigma\ \text{нагр}}$ — ток, равный сумме фазных токов нагрузки ПС, питающихся от защищаемой ЛЭП;

$P_{\Sigma\ \text{нагр}}$ — суммарная активная мощность нагрузки ПС ответвлений, рассчитанная при $\cos\varphi_{\text{нагр}}$, равном 0,8-0,85;

$k_{\text{сз}}$ — коэффициент, учитывающий увеличение фазного тока в режиме самозапуска, принимается равным 1,5-2,0.

Расчет сопротивления срабатывания $Z_{\text{уст}}$ ДО с направленной круговой характеристикой, проходящей через начало координат, по условию отстройки от замеров в нагрузочных режимах проводится в соответствии с неравенством

$$Z_{\text{уст}} \le \frac{\left|\underline{Z}_{\text{нагр}}\right|}{k_{\text{н}}\cdot k_{\text{в}}\cdot\cos\left(\varphi_{\text{мч}} - \varphi_{\text{нагр}}\right)}, \tag{4.49}$$

где $|\underline{Z}_{\text{нагр}}|$ и $\varphi_{\text{нагр}}$ — модуль и угол расчетного сопротивления в нагрузочном режиме;

$k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, учитывает погрешность ТТ и ТН и релейной аппаратуры, принимается равным 1,2;

$k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата измерительного ДО, принимается по техническим данным конкретного устройства РЗ;

$\varphi_{\text{мч}}$ — угол максимальной чувствительности круговой характеристики.

Определяющими по условию отстройки являются нагрузочные режимы с минимальным значением $|\underline{Z}_{\text{нагр}}|$, а также режимы с максимальным значением угла расчетного сопротивления $\varphi_{\text{нагр}}$.

Расчет сопротивления срабатывания $Z_{\text{уст}}$ ДО с направленной круговой характеристикой, проходящей через начало координат, по отстройке от замеров в режимах самозапуска двигательной нагрузки проводится по неравенству (4.49).

Для отстройки от замеров в нагрузочных режимах работы энергосистем со значительным перетоком активной мощности по защищаемой ЛЭП можно использовать изменение вида круговой характеристики (эллипс, линза), а также смещение круговой характеристики в первый квадрант комплексной плоскости (при наличии технической возможности).

Расчет реактивного или полного сопротивления срабатывания ДО с полигональной характеристикой по условию отстройки от замеров в нагрузочных режимах со значительным перетоком реактивной мощности по защищаемой ЛЭП, когда вектор $\underline{Z}_{нагр}$ пересекает верхнюю границу характеристики, проводится в соответствии с неравенствами:

- реактивное сопротивление срабатывания

$$X_{уст} \le \frac{\left|\underline{Z}_{нагр}\right| \cdot \sin\varphi_{нагр}}{k_н \cdot k_в}; \tag{4.50}$$

- полное сопротивление срабатывания

$$Z_{уст} \le \frac{\left|\underline{Z}_{нагр}\right|}{k_н \cdot k_в} \cdot \frac{\sin\varphi_{нагр}}{\sin\varphi_{хар}}, \tag{4.51}$$

где $|\underline{Z}_{нагр}|$ и $\varphi_{нагр}$ — модуль и угол расчетного сопротивления в нагрузочном режиме;

$k_н$ — коэффициент надежности, учитывает погрешность ТТ и ТН и релейной аппаратуры, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным конкретного устройства РЗ;

$\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики.

Определяющими по условию отстройки являются нагрузочные режимы с минимальным значением расчетного сопротивления $|\underline{Z}_{нагр}|$, а также режимы с максимальным значением угла расчетного сопротивления $\varphi_{нагр}$.

Расчет активного сопротивления срабатывания $R_{уст}$ ДО с полигональной характеристикой по условию отстройки от замеров в нагрузочных режимах, когда вектор $\underline{Z}_{нагр\ мин}$ пересекает правую боковую сторону характеристики, проводится в соответствии с неравенством

$$R_{уст} \le \frac{\left|\underline{Z}_{нагр\ мин}\right|}{k_н \cdot k_в}\left(\cos\varphi_{нагр} - \sin\varphi_{нагр}\,\mathrm{ctg}\,\varphi_{прав}\right), \tag{4.52}$$

где $|\underline{Z}_{нагр}|$ и $\varphi_{нагр}$ — модуль и угол расчетного сопротивления в нагрузочном режиме;

$\varphi_{прав}$ — угол наклона правой боковой стороны характеристики.

Расчет сопротивлений срабатывания ДО с полигональной характеристикой по условию отстройки от замеров $\underline{Z}_{нагр\ сз}$ в режиме самозапуска проводится аналогично по неравенствам (4.50—4.52).

Для отстройки от замеров в нагрузочных режимах со значительным перетоком активной мощности используется вырез нагрузки (при наличии указанного параметра настройки).

Расчет активного сопротивления срабатывания $R_{уст\ нагр}$, которое определяет вырез в области нагрузочных режимов (рисунок 4.21), проводится по неравенству

$$R_{уст\ нагр} \le \frac{\left|\underline{Z}_{нагр}\right|}{k_н \cdot k_в} \cdot \cos\varphi_{нагр}. \tag{4.53}$$

Уставка по углу выреза нагрузки определяется по неравенству

$$\varphi_{уст\ нагр} \ge \varphi_{нагр\ макс} \pm \varphi_{зап}, \tag{4.54}$$

где $\varphi_{нагр\ макс}$ — максимальный угол расчетного сопротивления в нагрузочном режиме;

$\varphi_{зап}$ — угол, учитывающий погрешности измерений и необходимый запас, рассчитывается по формуле

$$\varphi_{зап} = \arcsin\left(1 - \frac{1}{k_н \cdot k_в}\right), \tag{4.55}$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, учитывает погрешность ТТ и ТН и релейной аппаратуры, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным конкретного устройства РЗ.

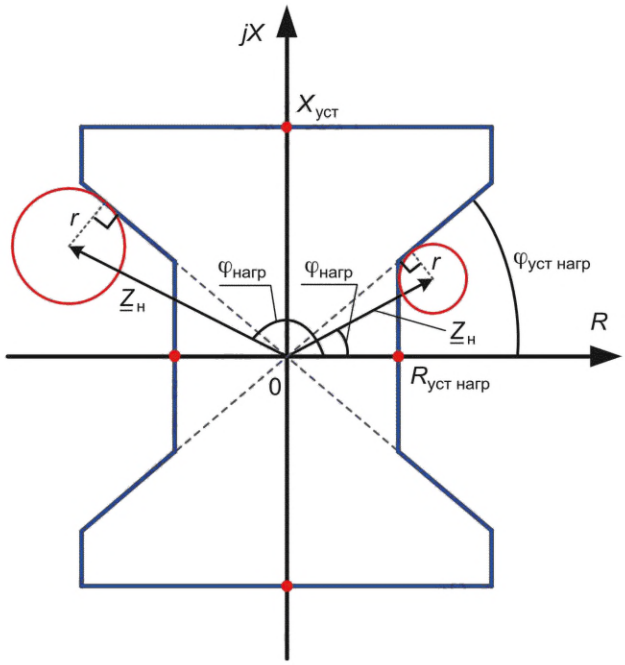


Рисунок 4.21 — Отстройка от нагрузочных режимов

Отстройку характеристики срабатывания ДО от замеров в нагрузочных режимах рекомендуется проводить графическим способом (рисунок 4.21). Отстройка осуществляется от зоны неопределенности вокруг конца вектора $\underline{Z}_{нагр}$ в виде окружности, радиус которой определяется по формуле

$$r_{окр} = \left|\underline{Z}_{нагр}\right|\left(1-\frac{1}{k_н \cdot k_в}\right), \quad (4.56)$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата измерительного ДО, принимается по техническим данным конкретного устройства РЗ.

4.4 Перечень исходных данных и последовательность расчета

4.4.1 Перечень исходных данных, необходимых для расчета и выбора параметров настройки ДЗ ЛЭП

4.4.1.1 Перечень ремонтных схем прилегающей сети, которые требуется учитывать в расчете.

4.4.1.2 Параметры максимальных нагрузочных режимов для отстройки характеристик срабатывания ДЗ.

4.4.1.3 Параметры нагрузочных режимов в нормальной схеме и в одиночных ремонтных схемах прилегающей сети для расчета параметров настройки ДЗ в режимах КЗ с учетом доаварийных нагрузочных режимов.

4.4.1.4 Параметры асинхронных режимов для выбора уставок БК.

4.4.1.5 Допустимое время отключения КЗ по условию обеспечения динамической устойчивости генерирующего оборудования для расчета выдержки времени оперативно ускоряемых ступеней ДЗ и первых ступеней ДЗ, выполняемых с выдержкой времени.

4.4.1.6 Схемы подключения ДЗ по цепям переменного тока и напряжения.

4.4.1.7 Технические данные ТТ и ТН.

4.4.2 Последовательность расчета ДЗ ЛЭП

4.4.2.1 Расчет коэффициента (коэффициентов) компенсации тока нулевой последовательности для ступеней ДЗ от КЗ на землю.

4.4.2.2 Расчет сопротивлений дуги при междуфазных КЗ и определение переходных сопротивлений при КЗ на землю.

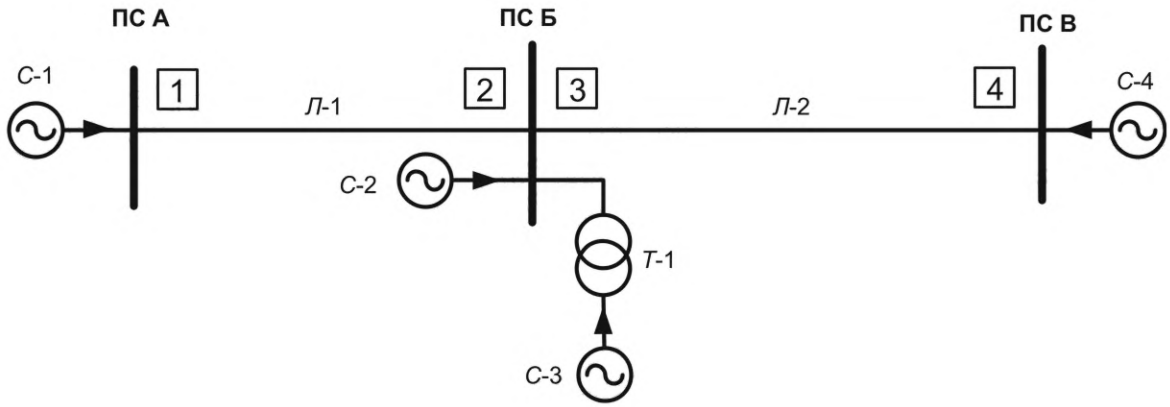
4.4.2.3 Расчет параметров настройки ДЗ по всем расчетным условиям с учетом конфигурации прилегающей сети.

4.4.2.4 Расчет параметров настройки ступеней ДЗ, используемых для реализации АУ, ОУ, ТУ.
4.4.2.5 Расчет параметров настройки дополнительных ступеней ДЗ (при необходимости).
4.4.2.6 Расчет параметров настройки пусковых органов ДЗ.
4.4.2.7 Отстройка характеристик ДО от максимальных нагрузочных режимов работы энергосистем.
4.4.2.8 Проверка чувствительности по току точной работы.
4.4.2.9 Расчет уставок токового контроля (при необходимости).
4.4.2.10 Расчет параметров настройки устройства БК.

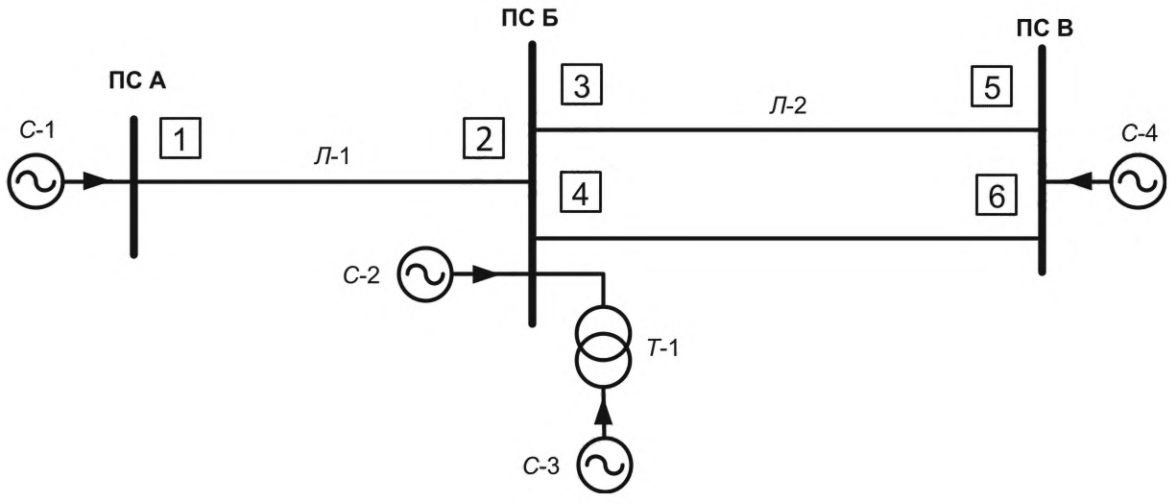
5 Расчет и выбор параметров настройки дистанционной защиты одиночной линии электропередачи

5.1 Типовые схемы участков сети

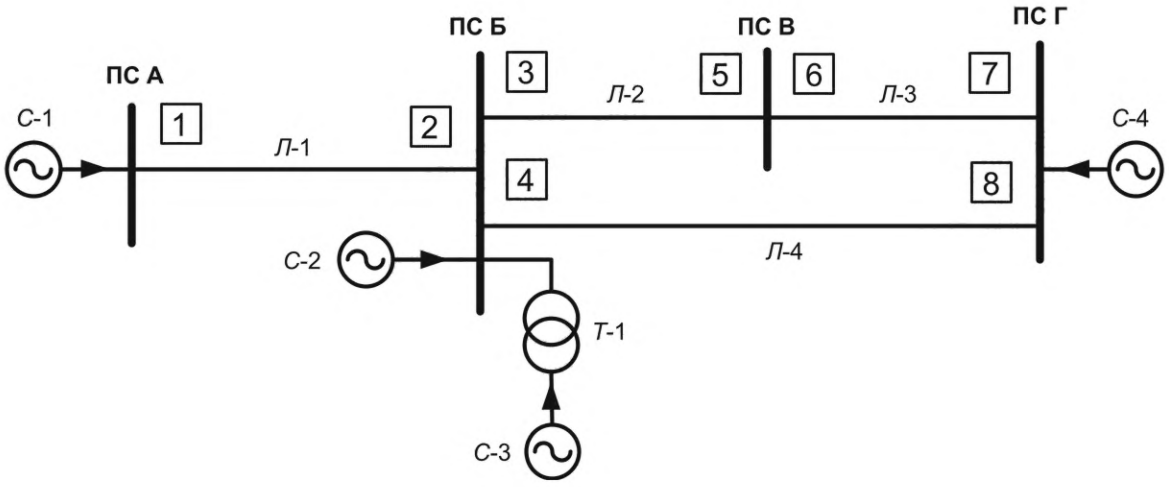
Указания по расчету и выбору параметров настройки трехступенчатой ДЗ одиночной ЛЭП напряжением 110 кВ и выше с двусторонним питанием приводятся для типовых схем смежной электрической сети (рисунок 5.1).



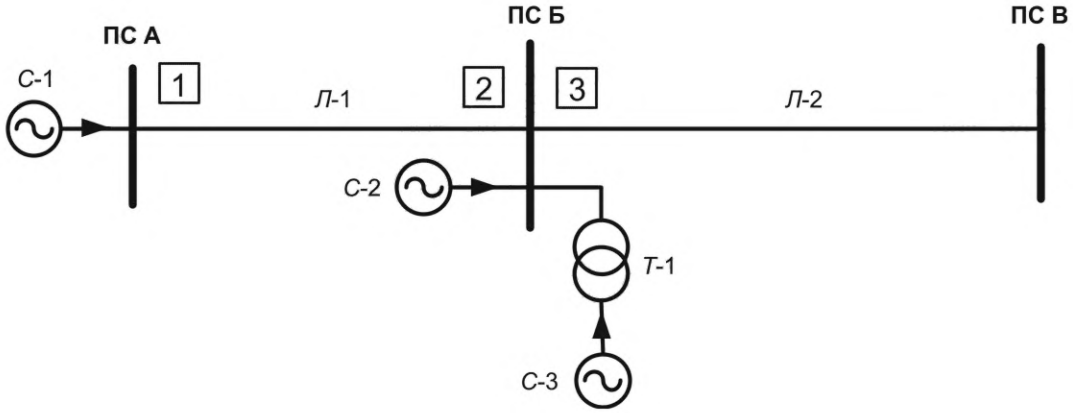
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.1 — Примеры типовых схем участков сети с одиночными ЛЭП с двусторонним питанием

Приведенные примеры конфигураций электрической сети применимы также для одиночных ЛЭП с двусторонним питанием, отходящих от шин электрических станций.

5.2 Общие указания по расчету и перечень расчетных условий

5.2.1 Общие указания по расчету

Расчет и выбор параметров настройки трехступенчатой ДЗ одиночной ЛЭП напряжением 110 кВ и выше с двусторонним питанием проводятся в соответствии со следующим функциональным назначением ступеней:

- первая ступень с «неполным охватом» защищаемой ЛЭП действует без выдержки времени при междуфазных КЗ и однофазных КЗ на землю (при наличии ДО от КЗ на землю согласно техническим данным защиты);
- вторая ступень с «полным охватом» защищаемой ЛЭП действует с выдержкой времени при междуфазных КЗ;
- третья ступень действует с выдержкой времени при междуфазных КЗ и обеспечивает резервирование защит своей ЛЭП и защит смежных сетевых элементов.

Расчет дистанционных замеров для выбора сопротивлений срабатывания ступеней от междуфазных КЗ выполняется с использованием напряжений между поврежденными фазами и разности токов поврежденных фаз в месте установки защиты.

Расчет дистанционных замеров для выбора сопротивлений срабатывания ступеней от КЗ на землю выполняется по формулам, приведенным производителем конкретного устройства РЗ, с использованием напряжений и токов в месте установки защиты.

При выполнении расчетов необходимо учитывать указания раздела 4 и приложения Б.

Для обеспечения селективности и чувствительности параметров настройки ДЗ ЛЭП требуется учитывать конфигурацию смежной электрической сети, возможные ремонтные схемы, замыкание нормально разомкнутых транзитов и т.д.

Выбор параметров настройки проводится с учетом алгоритмов функционирования и технических данных, приведенных в документации для конкретного устройства РЗ.

5.2.2 Перечень расчетных условий для расчета и выбора параметров настройки ДЗ

В таблице 5.1 приведен перечень расчетных условий для выбора параметров настройки трехступенчатой ДЗ 1 ЛЭП Л-1 с круговыми и полигональными характеристиками срабатывания для типовых схем смежной электрической сети (рисунок 5.1, а) — г)).

Таблица 5.1 — Перечень расчетных условий для выбора параметров настройки ДЗ

№ условия	Ступень защиты	Схема (рисунок 5.1)	Расчетные условия
1.1	Первая ступень (ступень без выдержки времени)	а), б), в), г)	Отстройка от КЗ на шинах ПС Б, примыкающей к противоположному концу ЛЭП
1.2			Проверка зоны охвата ЛЭП при металлических КЗ
1.3			Обеспечение чувствительности при КЗ через переходное сопротивление в начале ЛЭП Л-1 и в конце зоны охвата первой ступени (для защит с полигональной характеристикой срабатывания)
2.1	Вторая ступень	а), б), в), г)	Обеспечение чувствительности при КЗ в конце ЛЭП Л-1
2.2		а), в), г)	Согласование с первой (второй) ступенью защиты 3
		в)	Согласование с первой (второй) ступенью защиты 4
2.3		б)	Отстройка от КЗ на шинах ПС В
2.4		в)	Отстройка от КЗ на шинах ПС Г
2.5		а), б), в), г)	Отстройка от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б
3.1	Третья ступень	а), б), в), г)	Обеспечение чувствительности при КЗ в конце ЛЭП Л-1 и в зоне дальнего резервирования
3.2		а), г)	Согласование со второй (третьей) ступенью защиты 3
3.3		б), в)	Согласование со второй (третьей) ступенью защиты 3 и защиты 4
3.4		в)	Согласование со второй (третьей) ступенью защиты 6
3.5		а), б), в), г)	Согласование с дистанционной или резервной токовой защитой от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС Б
3.6		а), б), в), г)	Отстройка от нагрузочных режимов работы энергосистем

Примечание — В данной таблице под сокращением «ПС» следует понимать подстанции и/или электростанции.

5.3 Расчет параметров настройки ДЗ с круговыми характеристиками

5.3.1 Перечень параметров настройки ДЗ ЛЭП с круговыми характеристиками срабатывания, которые требуется определить в процессе расчета, приведен в таблице 5.2.

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания первой ступени ДЗ приводятся с учетом того, что ступень может иметь общее сопротивление срабатывания ДО от всех видов КЗ ($Z^{I}_{уст}$) или может иметь независимое регулирование сопротивления срабатывания ДО от междуфазных КЗ ($Z^{I}_{устфф}$) и ДО от КЗ на землю ($Z^{I}_{устфз}$).

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания вторых и третьих ступеней ДЗ приводятся для ДО от междуфазных КЗ.

Значение уставки угла максимальной чувствительности круговой характеристики $\varphi_{мч}$ следует выбирать равным (близким по значению) углу защищаемой ЛЭП $\varphi_{л}$. Для первой ступени ДЗ, в целях отстройки от КЗ на шинах противоположной ПС (электростанции) с учетом доаварийных перетоков мощности, допускается выбирать значение $\varphi_{мч}$ отличное от угла защищаемой ЛЭП $\varphi_{л}$ (рисунки 4.3, 5.2).

Таблица 5.2 — Перечень параметров ДЗ с круговыми характеристиками

Ступень защиты	Обозначение параметра	Наименование параметра
Первая ступень	$Z^{I}_{уст1}$	Общее сопротивление срабатывания ДО первой ступени от всех видов КЗ
	$Z^{I}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО первой ступени от междуфазных КЗ
	$Z^{I}_{уст1фз}$	Сопротивление срабатывания ДО первой ступени от КЗ на землю
Вторая ступень	$Z^{II}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО второй ступени от междуфазных КЗ
Третья ступень	$Z^{III}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО третьей ступени от междуфазных КЗ

5.3.2 Расчет и выбор параметров настройки первой ступени ДЗ от всех видов КЗ

Основное требование, предъявляемое к первой ступени ДЗ — обеспечение селективного отключения всех видов КЗ на защищаемой ЛЭП.

5.3.2.1 Первая ступень защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а) — г)) выполняется без выдержки времени.

5.3.2.2 Расчет сопротивления срабатывания первой ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах ПС Б (позиция 1.1, таблица 5.1) проводится по неравенству

$$Z^{I}_{уст1} \le k_{отс} \cdot \frac{|\underline{Z}_{р}|}{\cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_{р}\right)}, \qquad (5.1)$$

где $|\underline{Z}_{р}|$ и $\varphi_{р}$ — модуль и угол расчетного сопротивления;

$\varphi_{мч}$ — угол максимальной чувствительности круговой характеристики;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.3.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ и при междуфазных КЗ через переходные сопротивления в нормальной и ремонтных схемах сети при нулевом доаварийном перетоке мощности по защищаемой ЛЭП, а также с учетом доаварийных перетоков мощности, характерных для рассматриваемых схем сети.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фз}$ рассматриваются результаты расчета при однофазных КЗ на землю (при принятых в расчете уставках коэффициентов компенсации тока нулевой последовательности) при металлическом КЗ и при КЗ через переходные сопротивления в нормальной и ремонтных схемах сети при нулевом доаварийном перетоке мощности по защищаемой ЛЭП, а также с учетом доаварийных перетоков мощности, характерных для рассматриваемых схем сети.

Для ЛЭП со взаимоиндукцией следует учитывать ремонтные схемы сети, в которых выбирались уставки коэффициентов компенсации тока нулевой последовательности.

Если в защите 1 согласно техническим данным используется общая уставка $Z^{I}_{уст1}$, требуется совместное рассмотрение результатов расчета по условию отстройки при междуфазных КЗ и однофазных КЗ на землю.

Указания по расчету переходных сопротивлений, учету доаварийной нагрузки при расчетах аварийных режимов для выбора параметров настройки ДЗ приведены в приложениях Б, Д.

Выбор сопротивления срабатывания для всей совокупности заданных расчетных условий рекомендуется производить графическим способом.

На рисунке 5.2 приведен пример отстройки круговой характеристики от замеров при металлическом междуфазном КЗ (замер 1) и при КЗ через переходное сопротивление при прямом перетоке мощности по ЛЭП (замер 2).

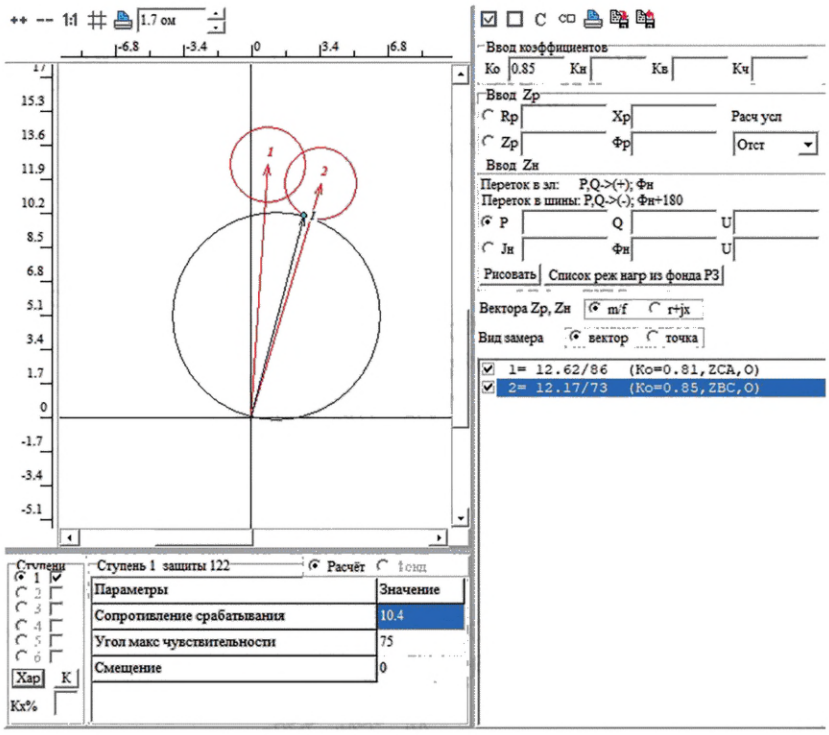


Рисунок 5.2 — Графический выбор параметров настройки ступени ДЗ с круговой характеристикой

5.3.2.3 Расчет сопротивления срабатывания первой ступени защиты 1 по условию обеспечения перекрытия зон первых ступеней ДЗ с двух сторон защищаемой ЛЭП (позиция 1.2, таблица 5.1) проводится по неравенству

$$Z^{I}_{уст1} \geq k_{охв} \cdot |\underline{Z}_{р}|, \quad (5.2)$$

где $k_{охв}$ — коэффициент охвата, принимается из диапазона 0,65-0,75;

$\underline{Z}_{р}$ — расчетное сопротивление, определяемое при КЗ в конце защищаемой ЛЭП.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ в конце защищаемой ЛЭП.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фз}$ рассматриваются результаты расчета металлических однофазных КЗ на землю в конце защищаемой ЛЭП в нормальной и ремонтных схемах сети при принятых в расчете коэффициентах компенсации тока нулевой последовательности.

В случае если при однофазных КЗ на землю обеспечение охвата согласно неравенству (5.2) не выполняется для защиты 1, рекомендуется обеспечить охват Л-1 первой ступенью защиты 2 с противоположной стороны ЛЭП в той же расчетной точке КЗ при тех же расчетных условиях.

Если в защите 1 используется общая уставка $Z^{I}_{уст1}$, требуется совместное рассмотрение результатов расчета по условию охвата при междуфазных КЗ и КЗ на землю.

Если расчетное сопротивление срабатывания первой ступени по условию 5.3.2.2 не удовлетворяет условию 5.3.2.3, необходимо обеспечить требуемый охват ЛЭП при металлических КЗ, а для отстройки от внешних КЗ через переходные сопротивления использовать изменение вида круговой характеристики (эллипс, линза) или угла максимальной чувствительности при наличии технической возможности регулирования параметров.

5.3.3 Расчет и выбор параметров настройки второй ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Требования, предъявляемые ко второй ступени ДЗ — обеспечение надежного отключения междуфазных КЗ по всей длине защищаемой ЛЭП и обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие второй ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

5.3.3.1 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а) — г)) по обеспечению чувствительности к КЗ в конце защищаемой ЛЭП (позиция 2.1, таблица 5.1) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \geq k_{чZ} \cdot \frac{|\underline{Z}_р|}{\cos(\varphi_{мч} - \varphi_р)}, \quad (5.3)$$

где $|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного сопротивления;

$k_{чZ}$ — коэффициент чувствительности, принимается согласно 4.2.5.4.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ и междуфазных КЗ через расчетные переходные сопротивления в конце защищаемой ЛЭП в нормальной и ремонтных схемах сети.

Проверку чувствительности рекомендуется производить графическим способом для всей совокупности заданных расчетных условий (рисунок 5.3), коэффициент чувствительности при графическом выборе принимается согласно 4.2.5.4.

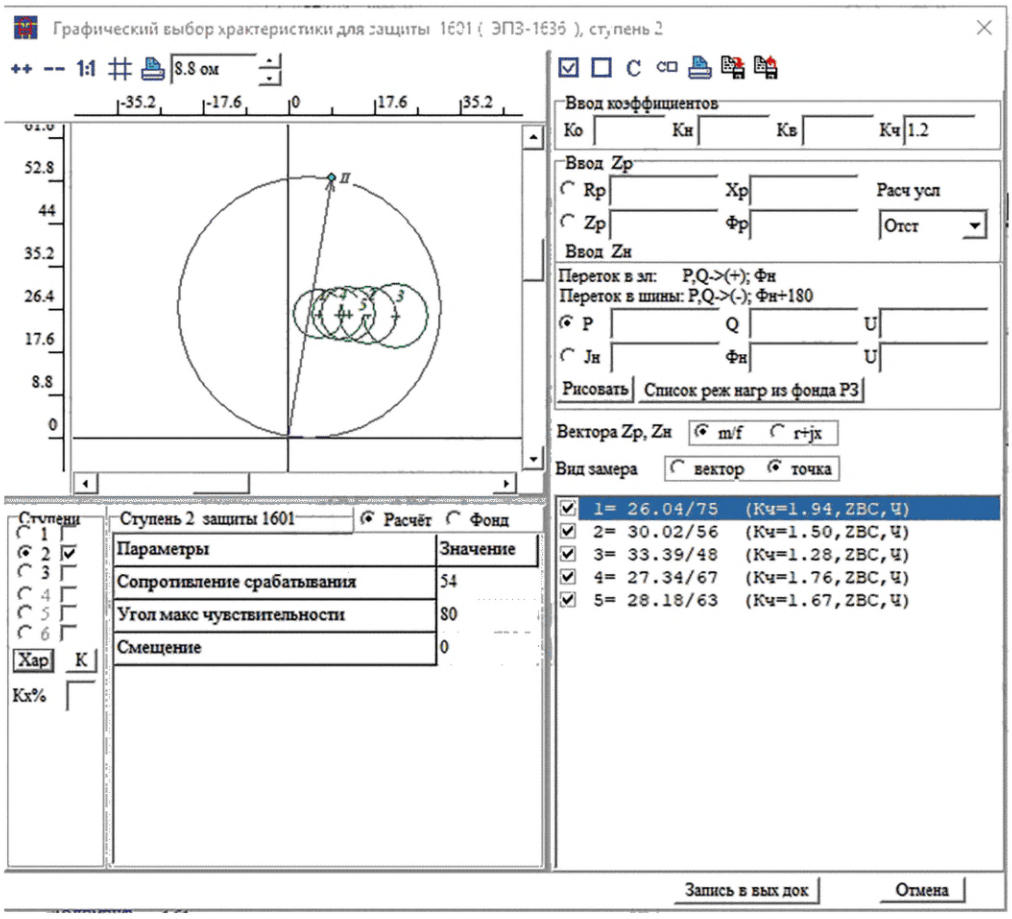


Рисунок 5.3 — Выбор круговой характеристики второй ступени ДЗ по чувствительности к междуфазным КЗ в конце ЛЭП

5.3.3.2 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 по условию согласования с дистанционными и/или резервными токовыми защитами смежных присоединений от междуфазных КЗ требуется проводить методом поиска конца зоны действия ступени защиты, с которой проводится согласование с учетом возможного сокращения ее зоны, и отстройкой от полученного расчетного замера по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \leq k_{отс} \cdot |\underline{Z}_р| \cdot d, \quad (5.4)$$

где $|\underline{Z}_р|$ — модуль расчетного сопротивления;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно пунктам 4.2.2.7, 4.2.2.8 и/или пунктам 4.2.4.1, 4.2.4.2;

d — параметр, который учитывает различие угла $\varphi_{мч}$ характеристики второй ступени защиты 1 и угла $\underline{Z}_р$, определяется по формуле

$$d = \frac{1}{\cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_р\right)}. \quad (5.5)$$

Примечание — Расчетные формулы по условиям согласования или отстройки с использованием параметров схемы замещения элементов электрической сети приводятся далее для пояснения принципов расчета и справедливы для случая однородных ЛЭП без емкостной проводимости при равных углах максимальной чувствительности круговых характеристик согласуемых защит.

При согласовании ДЗ с разнотипными характеристиками срабатывания необходимо учитывать 4.2.2.9, при согласовании ступеней ДЗ с резервными токовыми защитами от междуфазных КЗ необходимо учитывать 4.2.4.1 и 4.2.4.2.

Расчет сопротивлений срабатывания ступеней ДЗ с выдержками времени по условиям отстройки или согласования проводится при металлических КЗ без учета изменения модулей и углов ЭДС генераторов в течение аварийного режима.

5.3.3.3 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а), в), г)) по согласованию с первой ступенью защиты 3(4) смежных ЛЭП (позиция 2.2, таблица 5.1) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{1-\alpha}{k_т} \cdot Z^{I}_{уст3(4)} \right| \cdot d, \quad (5.6)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7;

α — коэффициент, учитывающий сокращение зоны ступени ДЗ, с которой проводится согласование, принимается согласно 4.2.1;

$k_т$ — коэффициент токораспределения, равный отношению первичного тока в защите 1 к первичному току в защите, с которой проводится согласование;

$Z^{I}_{уст3(4)}$ — сопротивление срабатывания первой ступени защиты 3(4) от междуфазных КЗ;

d — определяется по формуле (5.5) в случае круговой характеристики.

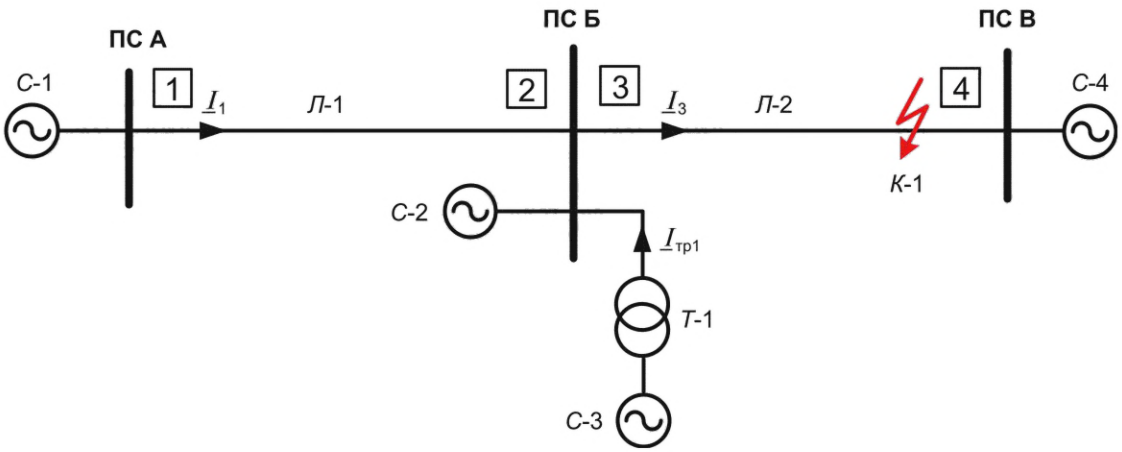


Рисунок 5.4 — Определение коэффициента токораспределения при КЗ в точке К-1

Коэффициент токораспределения при согласовании защиты 1 с защитой 3 (К-1, рисунок 5.4) определяется по формуле

$$k_т = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_3}. \quad (5.7)$$

Расчетным является значение коэффициента $k_т$ в такой реально возможной схеме сети, которой соответствует наименьшее сопротивление срабатывания согласно неравенству (5.6).

Согласование с первой ступенью защиты 3(4) смежных ЛЭП допускается проводить в режиме каскадного отключения КЗ защитой противоположного конца ЛЭП со стороны ПС В (ПС Г), если

согласование с учетом значения $k_т$ до начала каскадного отключения из-за наличия влияния обходных связей приводит к значительному загрублению сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1. В этом случае должен быть учтен коэффициент возврата ДО второй ступени защиты 1, поскольку ДО может сработать до начала каскадного отключения.

Согласование в каскаде проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le \frac{k_{отс}}{k_в} \cdot \left| \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{1-\alpha}{k_т} \cdot Z^{I}_{уст3(4)} \right| \cdot d, \quad (5.8)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты;

$k_т$ — коэффициент токораспределения, определяется по формуле (5.7).

Необходимо отметить, что в кольцевых сетях сложной конфигурации при согласовании ДЗ также требуется учитывать возможность каскадного действия защит и согласование в каскаде может стать определяющим условием.

Если сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1, выбранное по согласованию с первой ступенью защиты 3(4), не удовлетворяет требованию чувствительности 5.3.3.1, согласование следует проводить со второй ступенью защиты 3(4) (см. формулы 5.6—5.8, с заменой $Z^{I}_{уст3(4)}$ на $Z^{II}_{уст3(4)}$).

Для схемы (рисунок 5.1, в)) при выполнении автоматизированного расчета сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 по согласованию со второй ступенью защиты 3 ЛЭП Л-2, с использованием метода поиска конца зоны действия ступени вместо расчета по коэффициенту токораспределения, необходимо использовать метод поиска конца зоны действия ступени при движении точки КЗ как по Л-2, так и по Л-3.

5.3.3.4 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а), в), г)) по согласованию с резервной токовой защитой от междуфазных КЗ защиты 3(4) при выполнении последней с помощью токовой отсечки, отсечки по напряжению или комбинированной отсечки по току и напряжению (позиция 2.2, таблица 5.1) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{\underline{Z}_{расч}}{k_т} \right| \cdot d, \quad (5.9)$$

где $\underline{Z}_{расч}$ — сопротивление участка смежной ЛЭП, надежно (с коэффициентом надежности $k_н$ = 1,1) охватываемой токовой защитой, с которой проводится согласование при металлическом междуфазном КЗ;

$k_т$ — коэффициент токораспределения, равный отношению тока в защите 1 к току в защите, с которой проводится согласование;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.4.1;

d — определяется по формуле (5.5) в случае круговой характеристики.

Общие указания по согласованию ДЗ ЛЭП с резервными токовыми защитами смежных сетевых элементов приведены в 4.2.4.

5.3.3.5 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схемы (рисунок 5.1, б)) по условию отстройки от междуфазных КЗ на шинах ПС В (позиция 2.3, таблица 5.1) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{1}{k_т} \cdot 0{,}5 \cdot \underline{Z}_{Л\text{-}2} \right| \cdot d, \quad (5.10)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.6;

$k_т$ — коэффициент токораспределения;

d — определяется по формуле (5.5) в случае круговой характеристики.

Расчетное неравенство (5.10) приведено для случая равенства сопротивлений прямой последовательности параллельных ЛЭП Л-2.

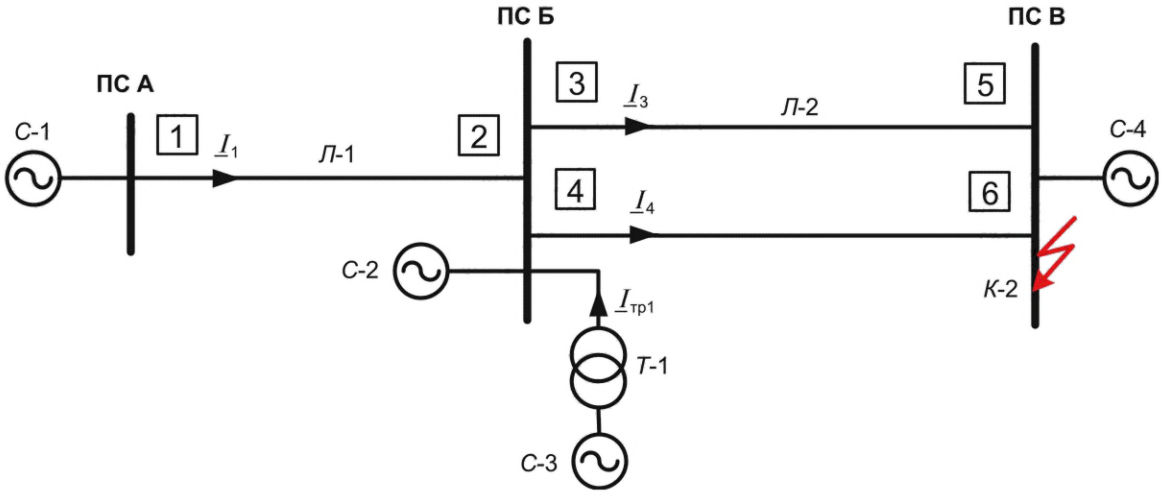


Рисунок 5.5 — Определение коэффициента токораспределения при КЗ в точке К-2

Коэффициент токораспределения при отстройке от КЗ на шинах ПС В (К-2, рисунок 5.5) определяется при включенных параллельных ЛЭП Л-2 по формуле

$$k_т = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_3 + \underline{I}_4}. \quad (5.11)$$

Если сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1, выбранное по условию отстройки, не удовлетворяет требованию обеспечения чувствительности 5.3.3.1, в этом случае выбор сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 выполняется по согласованию со второй ступенью защиты 3(4) ЛЭП Л-2 аналогично неравенству (5.6).

Если вторая ступень защиты 3(4) ЛЭП Л-2 имеет большую выдержку времени и согласование с ней приводит к значительному увеличению времени действия второй ступени защиты 1, в этом случае сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1 необходимо принять по условию обеспечения чувствительности к КЗ в конце защищаемой ЛЭП и обеспечить:

1) согласование с первыми ступенями защит 3 и 4 при каскадном отключении повреждения на ЛЭП Л-2 со стороны ПС В при наличии в работе быстродействующей защиты шин ПС В и защит ЛЭП Л-2, обеспечивающих каскадное отключение КЗ без выдержки времени со стороны ПС В;

2) при наличии СВ (ШСВ) на ПС В отстройку от КЗ на шинах ПС В после отключения СВ (ШСВ) при условии ввода в работу делительной защиты, действующей на отключение СВ (ШСВ) при выводе из работы быстродействующей защиты шин на ПС В;

3) согласование с резервными защитами от междуфазных КЗ ЛЭП, отходящих от ПС В.

При согласовании с первыми ступенями защит 3 и 4 в режиме каскада должен быть учтен коэффициент возврата ДО второй ступени защиты 1, поскольку ДО может сработать до начала каскадного отключения. Согласование проводится по неравенству (5.8) с учетом коэффициента токораспределения, равного отношению тока в защите 1 к току в защите, с которой проводится согласование в каскаде.

Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах ПС В с учетом отключения СВ (ШСВ) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le \frac{k_{отс}}{k_в} \cdot \left| \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{\underline{Z}_{Л\text{-}2}}{k_т} \right| \cdot d, \quad (5.12)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.6;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты;

$k_т$ — коэффициент токораспределения, равен отношению тока, протекающего в месте установки защиты 1, к току в месте установки защиты, с которой проводится согласование в режиме каскада;

d — определяется по формуле (5.5) в случае круговой характеристики.

5.3.3.6 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схемы (рисунок 5.1, в)) по условию отстройки от междуфазных КЗ на шинах ПС Г (позиция 2.4, таблица 5.1), проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left|\underline{Z}_{р}\right| \cdot d, \tag{5.13}$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.6;

d — определяется по формуле (5.5) в случае круговой характеристики.

Расчетное сопротивление $\underline{Z}_{р}$ определяется по формуле

$$\underline{Z}_{р} = \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{\underline{I}_3 + \underline{I}_4}{\underline{I}_1} \cdot \frac{\left(\underline{Z}_{Л\text{-}2} + \underline{Z}_{Л\text{-}3}\right) \cdot \underline{Z}_{Л\text{-}4}}{\underline{Z}_{Л\text{-}2} + \underline{Z}_{Л\text{-}3} + \underline{Z}_{Л\text{-}4}}, \tag{5.14}$$

где $\underline{I}_1$, $\underline{I}_3$, $\underline{I}_4$ — значения токов через защиты 1, 3, 4 соответственно.

Если сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1, выбранное по условию отстройки, не удовлетворяет требованию обеспечения чувствительности (см. 5.3.3.1), выбор сопротивления срабатывания выполняется по согласованию со второй ступенью защиты 3 и 4 смежных ЛЭП, дополнительно необходимо обеспечить согласование второй ступени защиты 1 с первой или второй ступенью защиты 6.

Если вторая ступень защиты 4 или защиты 6 имеет большую выдержку времени и согласование с ней приводит к значительному увеличению времени действия второй ступени защиты 1, в этом случае сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1 необходимо принять по условию обеспечения чувствительности к КЗ в конце защищаемой ЛЭП и обеспечить:

1) согласование с первой ступенью защит 6(4) при каскадном отключении повреждения на ЛЭП Л-3(4) со стороны ПС Г при наличии в работе быстродействующей защиты шин ПС Г и защит ЛЭП Л-3(4), обеспечивающих каскадное отключение КЗ без выдержки времени со стороны ПС Г;

2) при наличии СВ (ШСВ) на ПС Г отстройку от КЗ на шинах ПС Г после отключения СВ (ШСВ) при условии ввода в работу делительной защиты, действующей на отключение СВ (ШСВ) при выводе из работы быстродействующей защиты шин на ПС Г;

3) согласование с резервными защитами от междуфазных КЗ ЛЭП, отходящих от ПС Г.

При согласовании в режиме каскада должен быть учтен коэффициент возврата ДО второй ступени защиты 1, поскольку ДО может сработать до начала каскадного отключения.

Согласование с первой или второй ступенью защиты 6 в режиме без каскада проводится в соответствии с неравенством

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left|\underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{\underline{Z}_{Л\text{-}2}}{k_т} + \frac{1-\alpha}{k_т} \cdot Z^{I(II)}_{уст\,6}\right| \cdot d. \tag{5.15}$$

Согласование с первой ступенью защиты 6 при каскадном отключении повреждения на ЛЭП Л-3 проводится в соответствии с неравенством

$$Z^{II}_{уст1фф} \le \frac{k_{отс}}{k_в} \cdot \left|\underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{\underline{Z}_{Л\text{-}2}}{k_т} + \frac{1-\alpha}{k_т} \cdot Z^{I}_{уст\,6}\right| \cdot d. \tag{5.16}$$

5.3.3.7 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а) — г)) по условию отстройки от междуфазных КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б (позиция 2.5, таблица 5.1), проводится в соответствии с неравенством

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left|\underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{\underline{Z}_{Т\text{-}1}}{k_т}\right| \cdot d, \tag{5.17}$$

где $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ — эквивалентное сопротивление параллельно работающих Т (АТ) Т-1;

$k_т$ — коэффициент токораспределения, равный отношению первичного тока в защите 1 к первичному току в рассматриваемом участке;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.5;

d — определяется по формуле (5.5) в случае круговой характеристики.

При наличии на Т (АТ) регулирования напряжения под нагрузкой при расчете $Z^{II}_{уст1фф}$ следует учитывать минимальные возможные сопротивления $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$, рассчитанные при крайних или фактических положениях РПН.

В случае отстройки от КЗ на стороне СН (НН) трехобмоточных Т и АТ с многосторонним питанием необходимо рассматривать режим отключения подпитки со стороны НН (СН). В случае отстройки от КЗ на стороне ВН (НН) трехобмоточных Т и АТ с многосторонним питанием необходимо рассматривать режим отключения подпитки со стороны НН (ВН).

Рассматриваются результаты расчета сопротивлений при металлических междуфазных КЗ в нормальной и ремонтных схемах сети при нулевом перетоке мощности по ЛЭП без учета изменения модулей и углов ЭДС генераторов в течение аварийного режима.

Если сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1, выбранное по условию отстройки, не удовлетворяет требованию обеспечения чувствительности (см. 5.3.3.1), расчет сопротивления срабатывания проводится по согласованию с резервными защитами от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС Б.

Если согласование с резервными защитами Т (АТ) ПС Б приводит к ограничению чувствительности или значительному увеличению времени действия второй ступени защиты 1, расчет сопротивления срабатывания проводится по согласованию с резервными защитами от междуфазных КЗ присоединений стороны смежного напряжения ПС Б.

Согласование второй ступени защиты 1 с резервными токовыми защитами Т (АТ) от междуфазных КЗ или резервными защитами от междуфазных КЗ присоединений стороны смежного напряжения ПС Б проводится методом поиска конца зоны действия ступени защиты, с которой проводится согласование, и отстройкой от полученного замера $\underline{Z}_р$ по неравенству (5.4).

Согласование второй ступени защиты 1 с ДЗ Т (АТ) проводится с учетом схем подключения последней к ТТ и ТН, а также направленности отдельных ступеней.

На рисунке 5.6 приведен один из вариантов схемы подключения ДЗ АТ ПС Б к ТТ и ТН, установленным на стороне СН, и расчетная схема замещения.

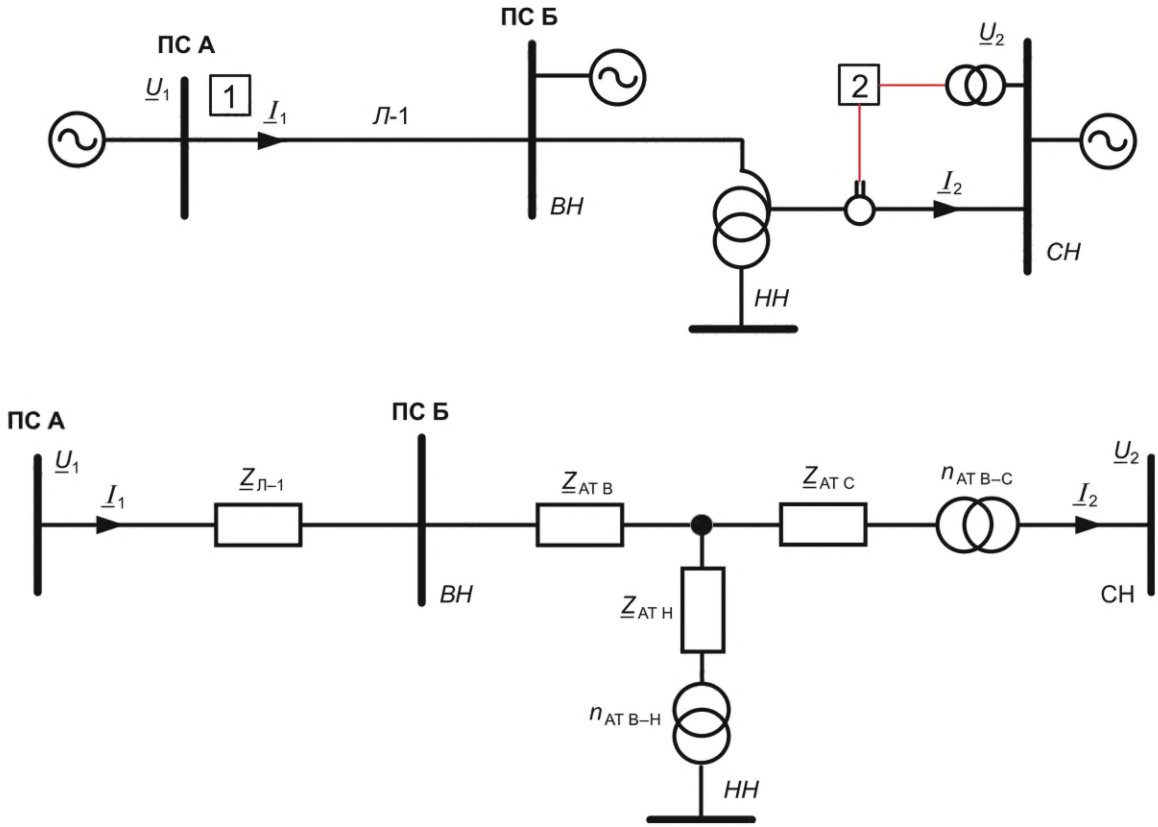


Рисунок 5.6 — Схема подключения ДЗ АТ к ТТ и ТН, установленным на стороне СН

Для данной схемы расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 по согласованию со ступенью ДЗ АТ, направленной в шины СН, проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{1}{k_т}\left(\underline{Z}_{АТ\ В} + \underline{Z}_{АТ\ С}\right) + \frac{n^2_{АТ\ В\text{-}С}\left(1-\alpha\right)}{k_т} Z_{уст\ Б} \right| \cdot d, \qquad (5.18)$$

где $n_{АТ\ В\text{-}С}$ — коэффициент трансформации АТ;

$k_т$ — коэффициент токораспределения, равный отношению первичного тока в защите 1 к первичному току в защите, с которой проводится согласование;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.8;

d — определяется по формуле (5.5) в случае круговой характеристики.

В приложении Е приведены расчетные выражения для согласования ДЗ ЛЭП с ДЗ трехобмоточного Т (АТ) для различных вариантов схем подключения защиты к ТТ и ТН.

При согласовании ступеней ДЗ с разнотипными характеристиками срабатывания необходимо учитывать 4.2.2.9, при согласовании ступеней ДЗ с резервными токовыми защитами Т (АТ) от междуфазных КЗ необходимо учитывать 4.2.4.2.

5.3.3.8 Выдержка времени второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а) — г)) принимается на ступень селективности ΔT больше выдержки времени ступени защиты смежного элемента, с которой проводилось согласование по сопротивлению срабатывания.

Согласование выдержек времени проводится по неравенству

$$T^{II}_{уст1} \geq T^{N}_{уст} + \Delta T + T_{УРОВ}, \quad (5.19)$$

где $T^{N}_{уст}$ — время действия ступени защиты, с которой проводится согласование, за расчетное значение принимается наибольшая из всех выдержек времени защит, с которыми проводилось согласование.

В расчете учитывается наибольшая выдержка времени УРОВ выключателей смежных сетевых элементов.

В случае выполнения отстройки от КЗ на шинах ПС В(Г) после отключения СВ (ШСВ) на ПС В(Г) для схем (рисунок 5.1, б), в)) выдержка времени второй ступени защиты 1 принимается на ступень селективности больше выдержки времени ступени защиты, действующей на отключение СВ (ШСВ) аналогично неравенству (5.19) без учета выдержки времени УРОВ.

Если сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1 выбрано по согласованию с защитой (ступенью защиты) смежного присоединения, действующей с выдержкой времени более 0,3 с, допускается не учитывать выдержку времени УРОВ этого смежного присоединения при наличии на этом смежном присоединении основной быстродействующей защиты.

Ступень селективности ΔT рассчитывается с учетом типа согласуемых защит по неравенству

$$\Delta T \geq T_{откл\ выкл} + T_{возвр} + T_{\Sigma погр} + T_{зап}, \quad (5.20)$$

где $T_{откл\ выкл}$ — полное время отключения выключателя смежного присоединения;

$T_{возвр}$ — время возврата измерительных (пусковых) органов рассматриваемой защиты, принимается по техническим данным конкретного устройства РЗ;

$T_{\Sigma погр}$ — суммарная погрешность элементов выдержек времени согласуемых защит, принимается по техническим данным устройств РЗ, при согласовании с защитой смежного присоединения без выдержки времени учитывается погрешность выдержки времени только рассматриваемой защиты;

$T_{зап}$ — время запаса принимается равным 0,1 с (см. [3]).

Минимальное значение ΔT при временах отключения выключателей, не превышающих 0,08 с, принимается равным:

- $\Delta T \geq 0{,}3$ с — при согласовании микропроцессорных устройств РЗ;
- $\Delta T \geq 0{,}4$ с — при согласовании устройств РЗ на микроэлектронной базе;
- $\Delta T \geq 0{,}4$-0,5 с — при согласовании устройств РЗ на электромеханической базе.

При согласовании второй ступени защиты 1 с резервными защитами Т (АТ) согласование выдержек времени проводится с учетом наличия нескольких последовательных выдержек времени, с которыми защита Т (АТ) действует на отключение выключателей.

В ДЗ отечественного производства ступень ДЗ с выдержкой времени, не превышающей 1,5 с, заводится под действие БК, обеспечивающей ее пуск на заданное время по факту обнаружения несимметрии трехфазной системы токов и напряжений, с последующим выводом из действия. В целях обеспечения действия ДЗ при изменении вида повреждения (например, при переходе однофазного КЗ в двухфазное КЗ на землю), первая и, как правило, вторая ступени ДЗ имеют вторую (большую) выдержку времени, отстроенную от цикла качаний или цикла асинхронного режима по времени.

Схемой устройства БК обеспечивается длительный ввод в работу ступени ДЗ со второй (большей) выдержкой времени.

Для исключения неселективного действия ДЗ при КЗ на смежных ЛЭП в случае изменения вида повреждения необходимо согласовывать между собой соответственно меньшие и большие выдержки времени согласуемых по чувствительности ступеней ДЗ.

Если согласование с большей выдержкой времени ступени ДЗ смежной ЛЭП приводит к значительному увеличению выдержки времени срабатывания, в этом случае большая выдержка второй ступени рассматриваемой защиты 1 выбирается по условию отстройки по времени от цикла качаний и дополнительно проводится согласование сопротивления срабатывания защиты 1 с МФТО смежной ЛЭП согласно 4.2.4.1.

5.3.4 Расчет и выбор параметров настройки третьей ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Основные требования, предъявляемые к третьей ступени ДЗ, — обеспечение резервирования устройств РЗ своей ЛЭП и защит или выключателей смежных сетевых элементов (дальнее резервирование), а также обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие третьей ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

В соответствии с пунктом 25 требований [2] при невозможности одновременного выполнения требований по обеспечению чувствительности и селективности параметров настройки ступени ДЗ ЛЭП, выполняющей функции дальнего резервирования, приоритет должен быть отдан требованию обеспечения чувствительности.

5.3.4.1 Расчет сопротивления срабатывания третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности к междуфазным КЗ в конце защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования (позиция 3.1, таблица 5.1) проводится по неравенству

$$Z^{III}_{уст1фф} \geq k_{чZ} \cdot \frac{|\underline{Z}_р|}{\cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_р\right)}, \qquad (5.21)$$

где $|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного сопротивления;

$k_{чZ}$ — коэффициент чувствительности, принимается согласно 4.2.5.4.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ, а также при КЗ через переходные сопротивления в конце защищаемой ЛЭП и зоне дальнего резервирования с возможным увеличением переходного сопротивления дуги в течение аварийного режима.

Если чувствительность третьей ступени ДЗ к междуфазным КЗ в зоне дальнего резервирования невозможно обеспечить по другим расчетным условиям или по техническим данным защиты, то допускается:

- не резервировать КЗ на стороне НН Т (АТ) ПС Б;
- не резервировать КЗ на смежных ЛЭП 110 кВ и выше при наличии УРОВ и при условии обеспечения ближнего резервирования;
- обеспечивать дальнее резервирование без учета редких ремонтных схем и при каскадном действии защит смежных присоединений;
- предусматривать возможность неселективного действия третьей ступени ДЗ при КЗ на смежных сетевых элементах, исправляемого действием АПВ и АВР;
- не согласовывать по чувствительности ступени ДЗ, предназначенные для дальнего резервирования, если неотключение КЗ вследствие недостаточной чувствительности защиты последующего сетевого элемента может привести к тяжелым последствиям.

5.3.4.2 Расчет сопротивления срабатывания третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а) — г)) по согласованию со второй (третьей) ступенями защит 3(4) смежных ЛЭП (позиция 3.2—3.3, таблица 5.1) проводится аналогично расчету при согласовании второй ступени защиты 1 с первой (второй) ступенями защиты 3(4).

В целях уменьшения времени ликвидации КЗ в зоне дальнего резервирования предпочтительным является согласование третьей ступени защиты 1 со второй ступенью защиты 3(4). Однако, если выполнение данного условия не позволяет обеспечить требуемую чувствительность, то необходимо выполнить согласование с третьей ступенью защиты 3(4).

В сети сложной конфигурации в случае, если конец зоны ступени защиты смежной ЛЭП, с которой проводится согласование, находится за пределами ЛЭП, согласование защит рекомендуется проводить с учетом каскадного отключения противоположного конца смежной ЛЭП.

При согласовании защит с разнотипными характеристиками срабатывания необходимо учитывать рекомендации 4.2.2.9.

5.3.4.3 Расчет сопротивления срабатывания третьей ступени защиты 1 для схемы рисунка 5.1, в) по согласованию со второй или третьей ступенью защиты 6 (позиция 3.4, таблица 5.1) проводится в случае, если выбранное сопротивление срабатывания третьей ступени защиты 1 не отстроено от КЗ на шинах ПС Г.

5.3.4.4 Расчет сопротивления срабатывания третьей ступени защиты 1 для схем рисунка 5.1, а) — г) по согласованию с дистанционной или резервной токовой защитой от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС Б проводится в том случае, если рассчитанное по предыдущим условиям сопротивление срабатывания третьей ступени защиты 1 не отстроено от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б (позиция 3.5, таблица 5.1).

Если согласование с резервными защитами Т (АТ) ПС Б приводит к ограничению чувствительности или значительному увеличению времени действия третьей ступени защиты 1, расчет сопротивления срабатывания проводится по согласованию с резервными защитами от междуфазных КЗ присоединений стороны смежного напряжения ПС Б.

5.3.4.5 Выдержка времени третьей ступени защиты 1 для схем рисунка 5.1, а) — г) принимается на ступень селективности ΔT больше выдержки времени ступени защиты смежного элемента, с которой проводилось согласование по сопротивлению срабатывания.

Согласование выдержек времени проводится по неравенству

$$T^{\text{II}}_{\text{уст1}} \geq T^{N}_{\text{уст}} + \Delta T, \tag{5.22}$$

где $T^{N}_{\text{уст}}$ — время действия ступени защиты, с которой проводится согласование, за расчетное значение принимается наибольшая из всех выдержек времени защит, с которыми производилось согласование по сопротивлению срабатывания;

ΔT — ступень селективности, рассчитывается по неравенству (5.20).

При согласовании третьей ступени защиты 1 с резервными защитами Т (АТ) согласование выдержек времени проводится с учетом наличия нескольких последовательных выдержек времени, с которыми защита Т (АТ) действует на отключение.

5.3.4.6 Расчет параметров настройки круговых характеристик срабатывания защиты 1 по отстройке от нагрузочных режимов работы энергосистемы (позиция 3.6, таблица 5.1) проводится в соответствии с 4.3.

Если для отстройки от нагрузки выполняется смещение характеристики третьей ступени защиты 1 в первый квадрант, необходимо выполнить проверку надежного зацепления характеристик второй и третьей ступеней защиты 1 в соответствии с 4.2.5.1.

5.4 Расчет параметров настройки ДЗ с полигональными характеристиками

5.4.1 Перечень параметров настройки ДЗ ЛЭП с полигональными характеристиками срабатывания, которые требуется определить в процессе расчета, приведен в таблице 5.3.

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания первой ступени ДЗ приводятся с учетом того, что ступень может иметь общую уставку полного (реактивного) сопротивления срабатывания ДО от всех видов КЗ $Z^{\text{I}}_{\text{уст1}}(X^{\text{I}}_{\text{уст1}})$ или может иметь независимое регулирование полного (реактивного) сопротивления срабатывания ДО от междуфазных КЗ $Z^{\text{I}}_{\text{уст1фф}}(X^{\text{I}}_{\text{уст1фф}})$ и ДО от КЗ на землю $Z^{\text{I}}_{\text{уст1фз}}(X^{\text{I}}_{\text{уст1фз}})$.

Параметры настройки $R^{\text{I}}_{\text{уст1фф}}$ и $R^{\text{I}}_{\text{уст1фз}}$, определяющие положение боковых сторон полигональной характеристики, как правило, имеют независимое регулирование для ДО от междуфазных КЗ и ДО от КЗ на землю.

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания вторых и третьих ступеней ДЗ приводятся для ДО от междуфазных КЗ.

Значение уставки угла наклона полигональной характеристики $\varphi_{\text{хар}}$ рекомендуется выбирать равным (близким по значению) углу защищаемой ЛЭП $\varphi_{\text{л}}$.

Таблица 5.3 — Перечень параметров ДЗ с полигональными характеристиками

Ступень защиты	Обозначение параметра	Наименование параметра
Первая ступень	$Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$	Общее полное (реактивное) сопротивление срабатывания ДО первой ступени от всех видов КЗ
	$Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$	Полное (реактивное) сопротивление ДО первой ступени от междуфазных КЗ
	$Z^{I}_{уст1фз}(X^{I}_{уст1фз})$	Полное (реактивное) сопротивление срабатывания ДО первой ступени от КЗ на землю
	$R^{I}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО первой ступени от междуфазных КЗ
	$R^{I}_{уст1фз}$	Активное сопротивление ДО первой ступени от КЗ на землю
Вторая ступень	$Z^{II}_{уст1фф}\left(X^{II}_{уст1фф}\right)$	Полное (реактивное) сопротивление ДО второй ступени от междуфазных КЗ
	$R^{II}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО второй ступени от междуфазных КЗ
Третья ступень	$Z^{III}_{уст1фф}\left(X^{III}_{уст1фф}\right)$	Сопротивление срабатывания ДО третьей ступени от междуфазных КЗ
	$R^{III}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО третьей ступени от междуфазных КЗ

5.4.2 Расчет и выбор параметров настройки первой ступени ДЗ от всех видов КЗ

Основное требование, предъявляемое к первой ступени ДЗ — обеспечение селективного отключения всех видов КЗ на защищаемой ЛЭП.

5.4.2.1 Первая ступень защиты 1 ЛЭП Л-1 для схем (рисунок 5.1, а) — г)) выполняется без выдержки времени.

5.4.2.2 Расчет сопротивления срабатывания первой ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах ПС Б (позиция 1.1, таблица 5.1) проводится в соответствии с неравенствами:

- полное сопротивление срабатывания

$$Z^{I}_{уст1} \le k_{отс} \cdot \frac{|\underline{Z}_p| \cdot \sin\varphi_p}{\sin\varphi_{хар}}; \quad (5.23)$$

- реактивное сопротивление срабатывания

$$X^{I}_{уст1} \le k_{отс} \cdot |\underline{Z}_p| \cdot \sin\varphi_p, \quad (5.24)$$

где $|\underline{Z}_p|$ и φ_p — модуль и угол расчетного полного сопротивления;

$\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.3.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ и при междуфазных КЗ через расчетные переходные сопротивления в нормальной и ремонтных схемах сети с учетом перетоков мощности по ЛЭП Л-1, характерных для рассматриваемых схем.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фз}(X^{I}_{уст1фз})$ рассматриваются результаты расчета однофазных КЗ на землю (при принятых в расчете коэффициентах компенсации тока нулевой последовательности) при металлических КЗ и через расчетные переходные сопротивления в нормальной и ремонтных схемах сети при нулевом перетоке мощности по защищаемой ЛЭП, а также с учетом перетоков мощности, характерных для рассматриваемых схем сети.

Для ЛЭП с взаимоиндукцией следует учитывать ремонтные схемы сети, в которых выбирались уставки коэффициентов компенсации тока нулевой последовательности.

Если в защите 1 используется общая уставка $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$, требуется совместное рассмотрение результатов расчета по условию отстройки при междуфазных КЗ и однофазных КЗ на землю.

5.4.2.3 Расчет сопротивления срабатывания первой ступени защиты 1 по условию обеспечения перекрытия зон первых ступеней ДЗ с двух сторон защищаемой ЛЭП (позиция 1.2, таблица 5.1) проводится в соответствии с неравенствами:

- полное сопротивление срабатывания

$$z^{I}_{уст1} \geq k_{охв} \cdot |\underline{Z}_{р}|; \quad (5.25)$$

- реактивное сопротивление срабатывания

$$X^{I}_{уст1} \geq k_{охв} \cdot |\underline{Z}_{р}| \cdot \sin \varphi_{р}, \quad (5.26)$$

где $k_{охв}$ — коэффициент охвата, принимается из диапазона 0,65-0,75.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ в конце защищаемой ЛЭП.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фз}(X^{I}_{уст1фз})$ рассматриваются результаты расчета при металлических однофазных КЗ на землю в конце защищаемой ЛЭП (при принятых в расчете коэффициентах компенсации тока нулевой последовательности). В случае, если условия (5.25), (5.26) не выполняются для защиты 1, рекомендуется по возможности обеспечить охват Л-1 защитой 2 с противоположной стороны ЛЭП в той же расчетной точке КЗ при тех же расчетных условиях.

Если согласно техническим данным в защите 1 используется общая уставка $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$, требуется совместное рассмотрение результатов расчета по условию охвата при междуфазных КЗ и однофазных КЗ на землю.

5.4.2.4 Если расчетное сопротивление срабатывания первой ступени защиты 1 по условию 5.4.2.3 не удовлетворяет условию 5.4.2.2, необходимо обеспечить требуемый охват при металлических КЗ, а для отстройки от внешних КЗ через переходные сопротивления применить угол наклона (скоса) верхней грани характеристики (при наличии параметра).

Угол наклона (скоса) $\varphi_{ск}$ верхней грани характеристики определяется при принятой уставке сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$ по формуле (4.10) или графически (рисунок 5.7).

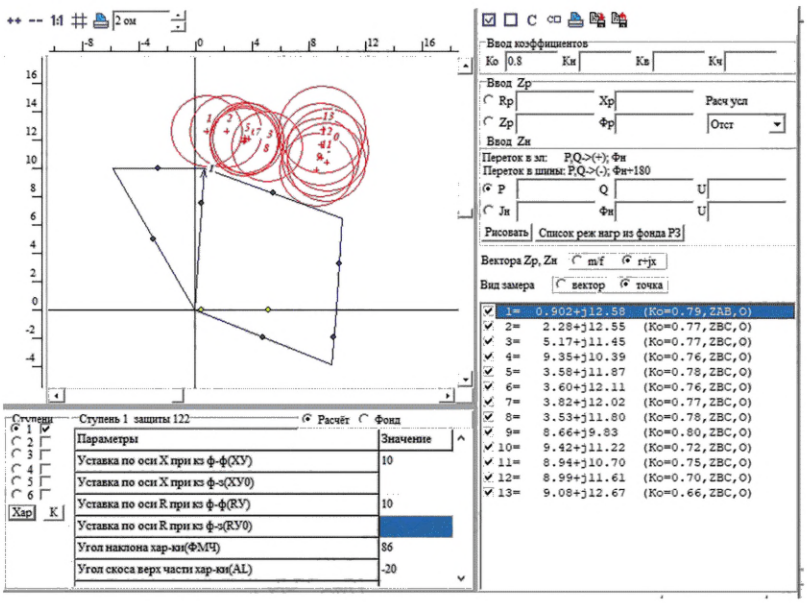


Рисунок 5.7 — Выбор угла наклона (скоса) верхней грани характеристики

Коэффициент отстройки $k_{отс}$ при аналитическом или графическом выборе параметров настройки принимается согласно 4.2.2.3.

Если угол $\varphi_{ск}$ задается общим для ДО от междуфазных КЗ и ДО от КЗ на землю, требуется совместное рассмотрение результатов расчета по условию отстройки при междуфазных КЗ и однофазных КЗ на землю, в качестве уставки принимается большее расчетное значение угла.

5.4.2.5 Если согласно техническим данным защиты 1 угол наклона (скоса) верхней грани характеристики отсутствует или полученное расчетное значение угла превышает диапазон регулирования,

необходимо для расчетных режимов, где не выполняется условие 5.4.2.2 или получены неудовлетворительные результаты по 5.4.2.4, выполнить отстройку с помощью уставки активного сопротивления $R^{I}_{уст1}$ по неравенству

$$R^{I}_{уст1} \le \left|\underline{Z}_{р}\right| \cdot \frac{\sin\left(\varphi_{прав} - \varphi_{р}\right) - \left(1 - k_{отс}\right)}{\sin\varphi_{прав}}, \quad (5.27)$$

где $|\underline{Z}_{р}|$ и $\varphi_{р}$ — модуль и угол расчетного полного сопротивления;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.3;

$\varphi_{прав}$ — угол наклона правой боковой грани характеристики.

Для выбора сопротивления срабатывания $R^{I}_{уст1фф}$ рассматриваются результаты расчета при междуфазных КЗ через переходные сопротивления в нормальной и ремонтных схемах прилегающей сети при нулевом перетоке мощности по защищаемой ЛЭП и при перетоках мощности, характерных для рассматриваемых схем.

Для выбора сопротивления срабатывания $R^{I}_{уст1фз}$ рассматриваются результаты расчета при однофазных КЗ на землю (при принятых в расчете коэффициентах компенсации тока нулевой последовательности) через переходные сопротивления в нормальной и ремонтных схемах прилегающей сети при нулевом перетоке мощности по защищаемой ЛЭП и при перетоках мощности, характерных для рассматриваемых схем.

5.4.2.6 Расчет сопротивления срабатывания $R^{I}_{уст1}$ первой ступени защиты 1 по условию обеспечения чувствительности к КЗ через переходное сопротивление (позиция 1.3, таблица 5.1) проводится по неравенству

$$R^{I}_{уст1} \ge \left|\underline{Z}_{р}\right| \cdot \frac{\sin\left(\varphi_{прав} - \varphi_{р}\right) + \left(k_{ч} - 1\right)}{\sin\varphi_{прав}}, \quad (5.28)$$

где $k_{ч}$ — коэффициент чувствительности, принимается согласно 4.2.5.4.

Проверка чувствительности выполняется при КЗ через переходные сопротивления в начале защищаемой ЛЭП (рисунок 5.8) и при КЗ в конце зоны охвата с учетом принятого угла наклона (скоса) верхней грани характеристики (рисунок 5.9).

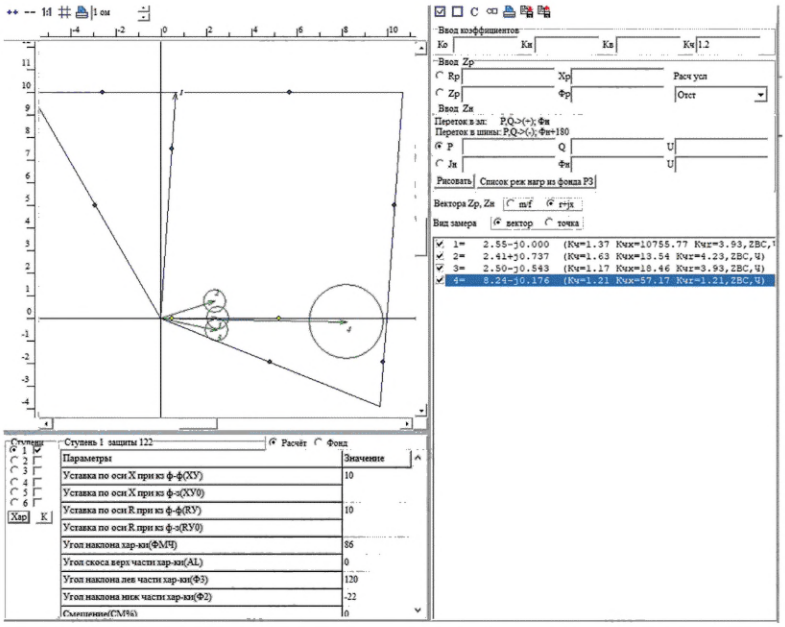


Рисунок 5.8 — Обеспечение чувствительности при КЗ в начале ЛЭП

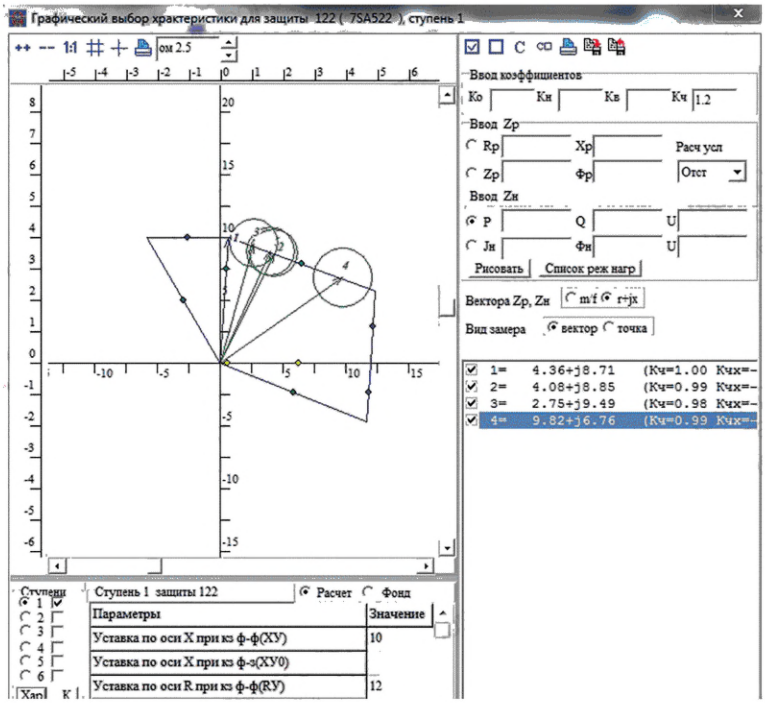


Рисунок 5.9 — Обеспечение чувствительности при КЗ в конце зоны охвата

Для выбора сопротивления срабатывания $R^{I}_{уст1фф}$ рассматриваются результаты расчета при междуфазных КЗ через переходные сопротивления, для выбора сопротивления срабатывания $R^{I}_{уст1фз}$ рассматриваются результаты расчета при однофазных КЗ на землю через переходные сопротивления (при принятых в расчете коэффициентах компенсации тока нулевой последовательности).

Определяющим по чувствительности, как правило, является минимальный режим (ремонтные схемы) примыкающей энергосистемы со стороны ПС, где установлена рассматриваемая защита.

5.4.2.7 Если отстройка от внешних КЗ через переходные сопротивления обеспечивается уставкой активного сопротивления $R^{I}_{уст1}$ по неравенству (5.27), то это условие является определяющим по сравнению с условием обеспечения чувствительности по неравенству (5.28).

5.4.2.8 Расчет угла φ_{IV} полигональной характеристики проводится по условию обеспечения чувствительности при КЗ через переходные сопротивления в начале защищаемой ЛЭП.

При КЗ через переходное сопротивление в начале защищаемой ЛЭП при отсутствии перетока мощности и подпитки от источника с противоположной стороны ЛЭП дистанционный замер носит активный характер и равен переходному сопротивлению в месте КЗ.

При прямом перетоке мощности от шин ПС А, где установлена защита 1, и подпитке от источника с противоположной стороны ЛЭП дистанционный замер может попасть в четвертый квадрант комплексной плоскости. Этот режим, как правило, является определяющим при выборе уставки угла φ_{IV}.

На рисунке 5.8 представлены замеры при междуфазном КЗ через переходное сопротивление в начале защищаемой ЛЭП:

- при отсутствии перетока мощности в нормальной схеме сети (замер 1);
- при обратном перетоке мощности в нормальной схеме сети (замер 2);
- при прямом перетоке мощности в нормальной схеме сети (замер 3);
- при отсутствии перетока мощности в ремонтной схеме сети со стороны ПС А (замер 4).

Значение угла φ_{IV} определяется исходя из значения угла $\varphi_{р}$ расчетного сопротивления $\underline{Z}_{р}$ по неравенству (4.43) или графическим способом (рисунок 5.10).

Зона неопределенности вокруг конца вектора $\underline{Z}_{р}$, обусловленная погрешностями, представляется в виде окружности, радиус r которой определяется по формуле

$$r = |\underline{Z}_{р}| \cdot (k_{ч} - 1), \qquad (5.29)$$

где $k_{ч}$ — коэффициент чувствительности, принимается согласно 4.2.5.4.

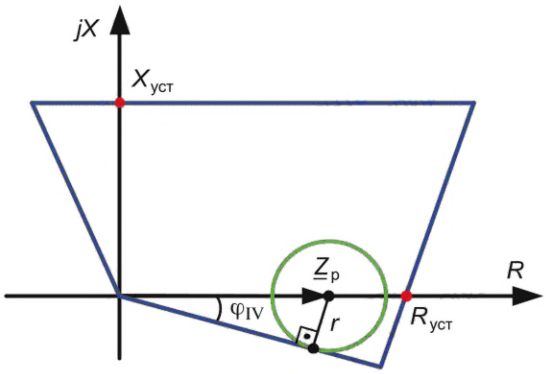


Рисунок 5.10 — Проверка чувствительности при КЗ в начале ЛЭП через переходное сопротивление

5.4.3 Расчет и выбор параметров настройки второй ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Требования, предъявляемые ко второй ступени ДЗ — обеспечение надежного отключения междуфазных КЗ по всей длине защищаемой ЛЭП и обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие второй ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

5.4.3.1 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности при металлических междуфазных КЗ в конце защищаемой ЛЭП (позиция 2.1, таблица 5.1) проводится по неравенствам:

- полное сопротивление срабатывания

$$Z^{II}_{уст1фф} \geq k_{чZ} \cdot \frac{\left|\underline{Z}_р\right| \cdot \sin\varphi_р}{\sin\varphi_{хар}} \qquad (5.30)$$

- реактивное сопротивление срабатывания

$$X^{II}_{уст1фф} \geq k_{чX} \cdot \left|\underline{Z}_р\right| \cdot \sin\varphi_р, \qquad (5.31)$$

где $|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного полного сопротивления;

$\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики;

$k_{чZ}$, $k_{чX}$ — коэффициенты чувствительности, принимаются согласно 4.2.5.4.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}\left(X^{II}_{уст1фф}\right)$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ и междуфазных КЗ через переходные сопротивления в конце защищаемой ЛЭП в нормальной и ремонтных схемах сети.

5.4.3.2 Расчет активного сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности при междуфазных КЗ через переходное сопротивление в конце защищаемой ЛЭП (позиция 2.1, таблица 5.1) проводится по неравенству

$$R^{II}_{уст1} \geq \left|\underline{Z}_р\right| \cdot \frac{\sin\left(\varphi_{прав} - \varphi_р\right) + \left(k_ч - 1\right)}{\sin\varphi_{прав}}, \qquad (5.32)$$

где $\varphi_{прав}$ — угол наклона правой боковой стороны характеристики;

$k_ч$ — коэффициент чувствительности, принимается согласно 4.2.5.4.

Для выбора сопротивления срабатывания $R^{II}_{уст1}$ рассматриваются результаты расчета при междуфазных КЗ через переходные сопротивления в конце защищаемой ЛЭП в нормальной и ремонтных схемах сети.

Рекомендуется использовать графический выбор параметров настройки полигональной характеристики (рисунок 5.11).

Коэффициенты чувствительности $k_{чZ}$, $k_{чX}$, $k_ч$ при графическом выборе параметров настройки принимаются согласно 4.2.5.4.

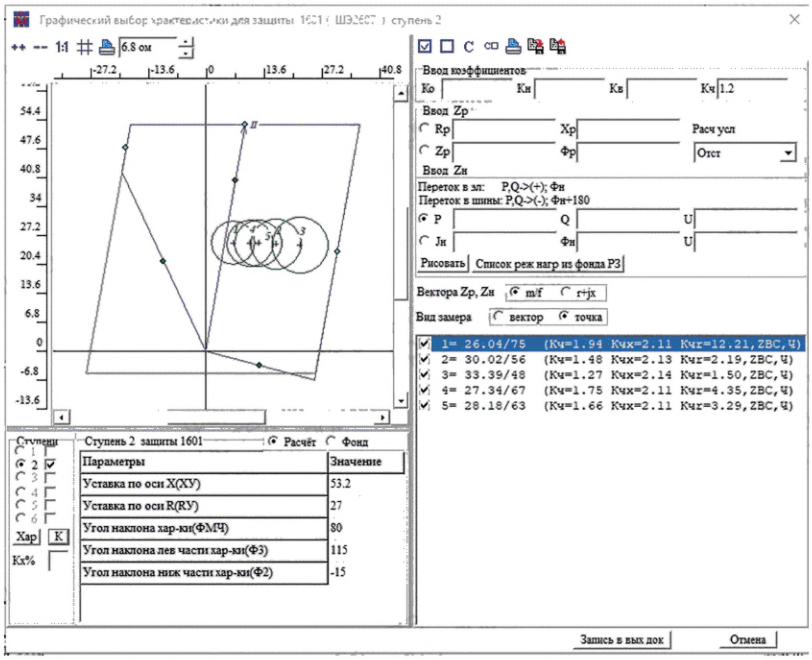


Рисунок 5.11 — Выбор полигональной характеристики срабатывания второй ступени по чувствительности к междуфазным КЗ в конце ЛЭП

5.4.3.3 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 по условию согласования с дистанционными и/или резервными токовыми защитами смежных присоединений от междуфазных КЗ проводится поиском конца зоны действия ступени защиты, с которой проводится согласование с учетом сокращения ее зоны, и отстройкой от полученного замера по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left|\underline{Z}_р\right| \cdot d, \tag{5.33}$$

где $|\underline{Z}_р|$ — модуль расчетного сопротивления;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7, 4.2.2.8 и/или 4.2.4.1, 4.2.4.2;

d — параметр, который при согласовании защит учитывает возможное различие угла наклона полигональной характеристики второй ступени защиты 1 и угла расчетного сопротивления $|\underline{Z}_р|$, определяется по формуле

$$d = \frac{\sin\varphi_р}{\sin\varphi_{хар}}. \tag{5.34}$$

5.4.3.4 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ и выдержек времени второй ступени защиты 1 с полигональной характеристикой для схем (рисунок 5.1, а) — г)) по условиям обеспечения селективности при междуфазных КЗ на смежных участках сети проводится по всем расчетным условиям (позиции 2.2—2.5, таблица 5.1) и выполняется аналогично расчетам при выборе параметров настройки второй ступени защиты 1 с круговой характеристикой срабатывания согласно указаниям, приведенным в 5.3.3.2—5.3.3.8, при этом в выражениях для расчета сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ параметр d следует определять по формуле (5.34).

При согласовании ДЗ с разнотипными характеристиками срабатывания необходимо учитывать рекомендации 4.2.2.9.

5.4.3.5 Расчет реактивного сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 $X^{II}_{уст1фф}$ проводится на основании принятой уставки сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ по формуле

$$X^{II}_{уст1фф} = Z^{II}_{уст1фф} \cdot \sin\varphi_{хар}, \tag{5.35}$$

где $\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики.

5.4.4 Расчет и выбор параметров настройки третьей ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Основные требования, предъявляемые к третьей ступени ДЗ, — обеспечение резервирования устройств РЗ своей ЛЭП и защит или выключателей смежных элементов (дальнее резервирование), а также обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие третьей ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

В соответствии с пунктом 25 требований [2] при невозможности одновременного выполнения требований по обеспечению чувствительности и селективности параметров настройки ступени ДЗ ЛЭП, выполняющей функции дальнего резервирования, приоритет должен быть отдан требованию обеспечения чувствительности.

5.4.4.1 Расчет сопротивления срабатывания третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности к металлическим междуфазным КЗ в конце защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования проводится по неравенствам

- полное сопротивление срабатывания

$$Z^{III}_{уст1фф} \geq k_{чZ} \cdot \frac{\left|\underline{Z}_р\right| \cdot \sin\varphi_р}{\sin\varphi_{хар}}; \quad (5.36)$$

- реактивное сопротивление срабатывания

$$X^{III}_{уст1фф} \geq k_{чX} \cdot \left|\underline{Z}_р\right| \cdot \sin\varphi_р, \quad (5.37)$$

где $|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного полного сопротивления;

$\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики;

$k_{чZ}$, $k_{чX}$ — коэффициенты чувствительности, принимаются согласно 4.2.5.4.

Если обеспечение чувствительности третьей ступени защиты 1 к междуфазным КЗ через переходные сопротивления в зоне дальнего резервирования невозможно обеспечить по другим расчетным условиям или по техническим данным защиты, чувствительность обеспечивается с учетом указаний 5.3.4.1.

5.4.4.2 Расчет активного сопротивления срабатывания третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 5.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности при междуфазных КЗ через переходное сопротивление в конце защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования (позиция 3.1, таблица 5.1) проводится по неравенству

$$R^{III}_{уст1} \geq \left|\underline{Z}_р\right| \cdot \frac{\sin\left(\varphi_{прав} - \varphi_р\right) + \left(k_ч - 1\right)}{\sin\varphi_{прав}}, \quad (5.38)$$

где $\varphi_{прав}$ — угол наклона правой боковой стороны полигональной характеристики;

$k_ч$ — коэффициент чувствительности, принимается согласно 4.2.5.4.

Для выбора $R^{III}_{уст1}$ рассматриваются результаты расчета при междуфазных КЗ через переходные сопротивления в конце защищаемой ЛЭП и зоне дальнего резервирования с учетом возможного увеличения сопротивления дуги в месте КЗ в течение аварийного режима.

5.4.4.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ и выдержек времени третьей ступени защиты 1 с полигональной характеристикой для схем (рисунок 5.1, а) — г)) по условиям обеспечения селективности при междуфазных КЗ на смежных участках сети проводится по всем расчетным условиям (позиции 3.2—3.5, таблица 5.1) и выполняется аналогично расчетам при выборе сопротивления срабатывания третьей ступени $Z^{III}_{уст1фф}$ защиты 1 с круговой характеристикой согласно указаниям, приведенным в 5.3.4.2—5.3.4.5, при этом в выражениях для расчета сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ параметр d следует определять по формуле (5.34).

5.4.4.4 Расчет реактивного сопротивления срабатывания третьей ступени защиты 1 $X^{III}_{уст1фф}$ проводится на основании принятой уставки сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ по формуле

$$X^{III}_{уст1фф} = Z^{III}_{уст1фф} \cdot \sin\varphi_{хар}, \quad (5.39)$$

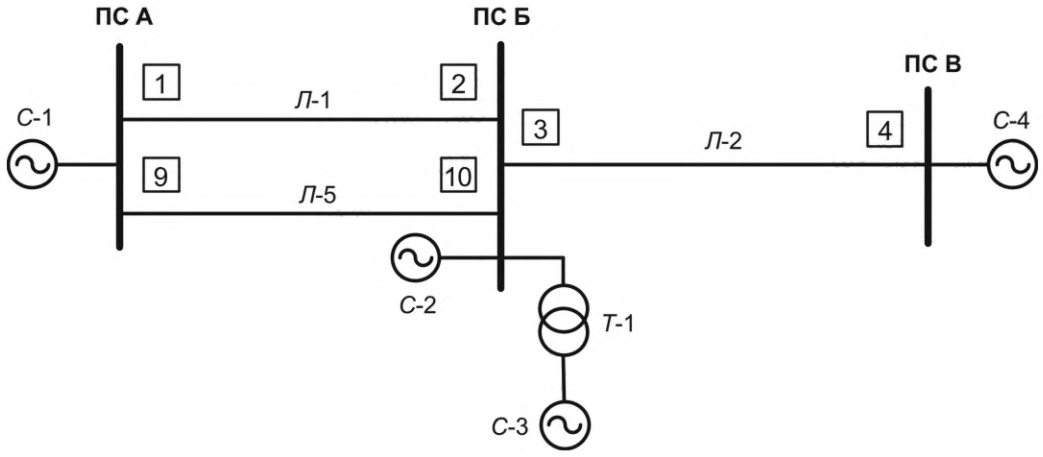
где $\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики.

5.4.4.5 Выбор параметров настройки полигональных характеристик защиты 1 по отстройке от нагрузочных режимов работы энергосистем (позиция 3.6, таблица 5.1) проводится в соответствии с 4.3.

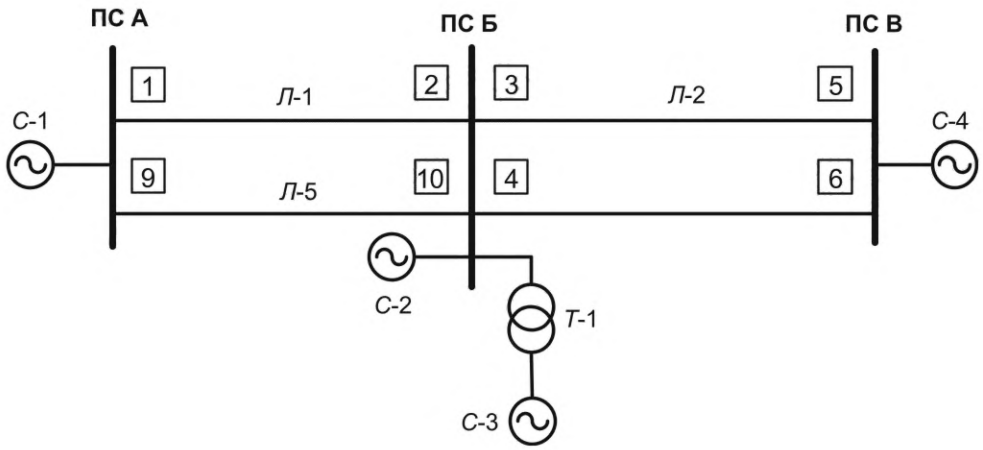
6 Расчет и выбор параметров настройки дистанционной защиты параллельных линий электропередачи

6.1 Типовые схемы участков сети

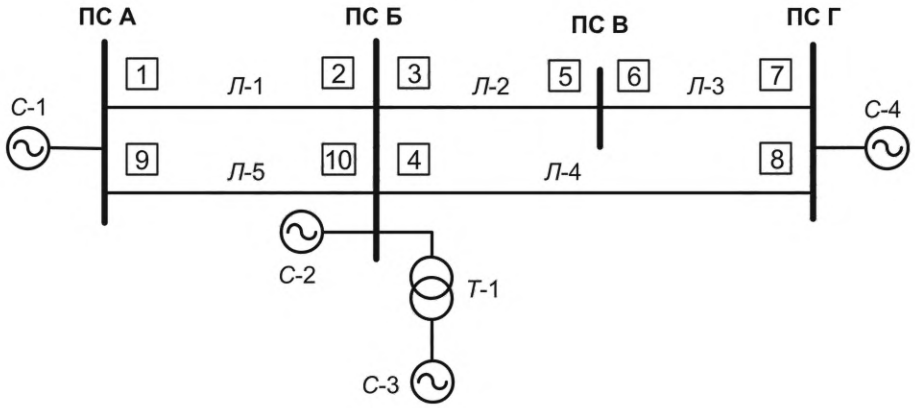
Указания по расчету и выбору параметров настройки трехступенчатой ДЗ параллельных ЛЭП напряжением 110 кВ и выше с двусторонним питанием приводятся для типовых схем смежной электрической сети (рисунок 6.1).



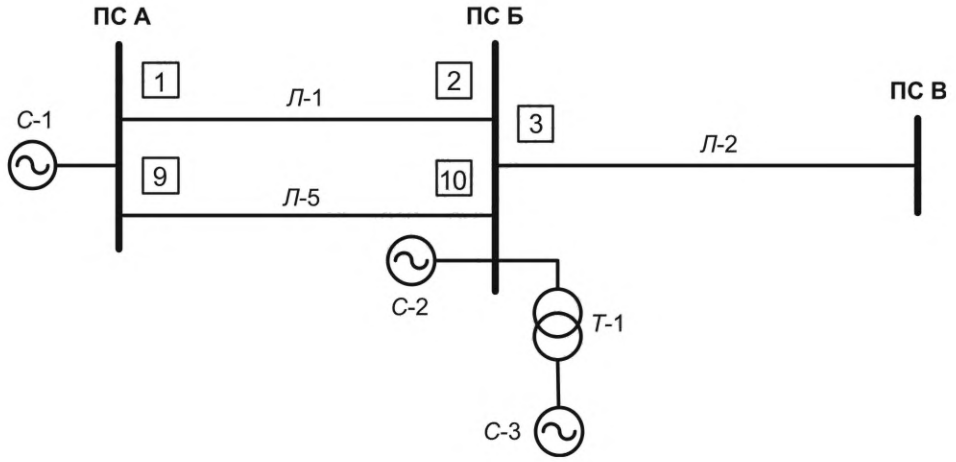
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6.1 — Примеры типовых схем участков сети параллельных ЛЭП с двусторонним питанием

Приведенные примеры конфигураций электрической сети применимы также для параллельных ЛЭП с двусторонним питанием, отходящих от шин электрических станций.

6.2 Общие указания по расчету и перечень расчетных условий

6.2.1 Общие указания по расчету трехступенчатой ДЗ параллельных ЛЭП соответствуют общим указаниям по расчету ДЗ одиночной ЛЭП с двусторонним питанием, приведенным в 5.2.1. Указания по выбору уставки угла максимальной чувствительности круговой характеристики $\varphi_{мч}$ и уставки угла наклона полигональной характеристики $\varphi_{хар}$ приведены в 5.3.1 и 5.4.1 соответственно.

6.2.2 Перечень расчетных условий для выбора параметров настройки трехступенчатой ДЗ параллельных ЛЭП с двусторонним питанием приведен в таблице 6.1 применительно к защите 1 ЛЭП Л-1 с круговыми и полигональными характеристиками срабатывания для типовых схем смежной электрической сети (рисунок 6.1, а) — г)).

Таблица 6.1 — Расчетные условия для выбора параметров настройки ДЗ

№ условия	Ступень защиты	Схема (рисунок 6.1)	Расчетные условия
1.1	Первая ступень (ступень без выдержки времени)	а), б), в), г)	Отстройка от КЗ на шинах ПС Б, примыкающей к противоположному концу ЛЭП
1.2			Проверка зоны охвата ЛЭП при металлических КЗ
1.3			Обеспечение чувствительности при КЗ через переходное сопротивление в начале ЛЭП и в конце зоны охвата первой ступени (для защит с полигональной характеристикой срабатывания)
2.1	Вторая ступень	а), б), в), г)	Обеспечение чувствительности при КЗ в конце ЛЭП Л-1
2.2		а), в), г)	Согласование с первой (второй) ступенью защиты 3
		в)	Согласование с первой (второй) ступенью защиты 4
2.3		б)	Отстройка от КЗ на шинах ПС В
2.4		в)	Отстройка от КЗ на шинах ПС Г
2.5		а), б), в), г)	Согласование с первой (второй) ступенью защиты 10 при каскадном отключении повреждения на параллельной ЛЭП Л-5 со стороны ПС А
2.6		а), б), в), г)	Отстройка от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б

Окончание таблицы 6.1

№ условия	Ступень защиты	Схема (рисунок 6.1)	Расчетные условия
3.1	Третья ступень	а), б), в), г)	Обеспечение чувствительности при КЗ в конце ЛЭП Л-1 и в зоне дальнего резервирования
3.2		а), г)	Согласование со второй (третьей) ступенью защиты 3
3.3		б), в)	Согласование со второй (третьей) ступенью защиты 3 и защиты 4
3.4		в)	Согласование со второй (третьей) ступенью защиты 6
3.5		а), б), в), г)	Согласование со второй (третьей) ступенью защиты 10 при каскадном отключении повреждения на параллельной ЛЭП Л-5 со стороны ПС А
3.6		а), б), в), г)	Согласование с дистанционной или резервной токовой защитой от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС Б
3.7		а), б), в), г)	Отстройка от нагрузочных режимов работы энергосистем
Примечание — В данной таблице под сокращением ПС следует понимать подстанции и/или электростанции.			

6.3 Расчет параметров настройки ДЗ с круговыми характеристиками

6.3.1 Перечень параметров настройки ДЗ ЛЭП с круговыми характеристиками срабатывания

В таблице 6.2 приведен перечень параметров настройки ДЗ ЛЭП с круговыми характеристиками срабатывания, которые следует определить в процессе расчета.

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания первой ступени ДЗ приводятся с учетом того, что ступень может иметь общее сопротивление срабатывания ДО от всех видов КЗ ($Z^{I}_{уст}$) или может иметь независимое регулирование для ДО от междуфазных КЗ ($Z^{I}_{устфф}$) и ДО от КЗ на землю ($Z^{I}_{устфз}$). Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания вторых и третьих ступеней ДЗ приводятся для ДО от междуфазных КЗ.

Таблица 6.2 — Перечень параметров ДЗ с круговыми характеристиками

Ступень защиты	Обозначение параметра	Наименование параметра
Первая ступень	$Z^{I}_{уст1}$	Общее сопротивление срабатывания ДО первой ступени от всех видов КЗ
	$Z^{I}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО первой ступени от междуфазных КЗ
	$Z^{I}_{уст1фз}$	Сопротивление срабатывания ДО первой ступени от КЗ на землю
Вторая ступень	$Z^{II}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО второй ступени от междуфазных КЗ
Третья ступень	$Z^{III}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО третьей ступени от междуфазных КЗ

6.3.2 Расчет и выбор параметров настройки первой ступени ДЗ от всех видов КЗ

Основное требование, предъявляемое к первой ступени ДЗ, — обеспечение селективного отключения всех видов КЗ на защищаемой ЛЭП.

6.3.2.1 Первая ступень защиты 1 для типовых конфигураций электрической сети (рисунок 6.1, а) — г)) выполняется без выдержки времени.

6.3.2.2 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}$ первой ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах ПС Б (позиция 1.1, таблица 6.1) проводится по неравенству (5.1) в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}$ первой ступени защиты 1 одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.2.2.

6.3.2.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}$ первой ступени защиты 1 по условию обеспечения перекрытия зон первых ступеней ДЗ с двух сторон защищаемой ЛЭП (позиция 1.2, таблица 6.1) проводится по неравенству (5.2) в соответствии с 5.3.2.3.

6.3.2.4 Если расчетное сопротивление срабатывания $Z^{I}_{уст1}$ первой ступени по условию отстройки при внешних КЗ через расчетные переходные сопротивления не удовлетворяет условию 6.3.2.3, необходимо обеспечить требуемый охват ЛЭП при металлических КЗ, а для отстройки от внешних КЗ через переходные сопротивления использовать изменение вида круговой характеристики (эллипс, линза) при наличии возможности регулирования параметра.

6.3.3 Расчет и выбор параметров настройки второй ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Требования, предъявляемые ко второй ступени ДЗ, — обеспечение надежного отключения междуфазных КЗ по всей длине защищаемой ЛЭП и обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов. Действие второй ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

6.3.3.1 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по обеспечению чувствительности к КЗ в конце защищаемой ЛЭП (позиция 2.1, таблица 6.1) проводится по неравенству (5.3) в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.3.1.

6.3.3.2 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 по условию согласования с дистанционными и/или резервными токовыми защитами смежных присоединений от междуфазных КЗ проводится методом поиска конца зоны действия ступени защиты, с которой проводится согласование с учетом возможного сокращения ее зоны, и отстройкой от полученного замера $\underline{Z}_р$ по неравенству (5.4) в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.3.2.

6.3.3.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а), в), г)) по согласованию с первой ступенью защиты 3(4) смежных ЛЭП (позиция 2.2, таблица 6.1) проводится по неравенству (5.6) в режиме отключенной параллельной ЛЭП Л-5 в соответствии с 5.3.3.3.

Расчетным является значение коэффициента $k_т$ в такой реально возможной ремонтной схеме сети, которой соответствует наименьшее сопротивление срабатывания согласно неравенству (5.6).

6.3.3.4 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а), в), г)) по согласованию с резервной токовой защитой от междуфазных КЗ защиты 3(4) при выполнении последней с помощью токовой отсечки, отсечки по напряжению или комбинированной защиты по току и напряжению (позиция 2.2, таблица 6.1) проводится по неравенству (5.9) в режиме отключенной параллельной ЛЭП Л-5 в соответствии с 5.3.3.4.

6.3.3.5 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 для схемы (рисунок 6.1, б)) по условию отстройки от междуфазных КЗ на шинах ПС В (позиция 2.3, таблица 6.1), проводится по неравенству (5.10) в режиме отключенной параллельной ЛЭП Л-5 в соответствии с 5.3.3.5.

6.3.3.6 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 для схемы (рисунок 6.1, в)) по условию отстройки от междуфазных КЗ на шинах ПС Г (позиция 2.4, таблица 6.1) проводится по неравенству (5.13) в режиме отключенной параллельной ЛЭП Л-5 в соответствии с 5.3.3.6.

6.3.3.7 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по согласованию с первой ступенью защиты 10 параллельной ЛЭП Л-5 (позиция 2.5, таблица 6.1) проводится при каскадном ее отключении со стороны ПС А по формуле

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left|\underline{Z}_р\right| \cdot d = k_{отс} \cdot \left|\underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{1-\alpha}{k_т} \cdot Z^{I}_{уст10}\right| \cdot d, \qquad (6.1)$$

где $|\underline{Z}_р|$ — модуль расчетного сопротивления;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7;

α — коэффициент, учитывающий сокращение зоны ступени ДЗ, с которой проводится согласование, определяется согласно 4.2.1;

$k_т$ — коэффициент токораспределения, равный отношению первичного тока в защите 1 к первичному току в защите, с которой проводится согласование в режиме каскада;

$Z^{I}_{уст10}$ — сопротивление срабатывания первой ступени защиты 10 от междуфазных КЗ;

d — определяется по формуле (5.5) в случае круговой характеристики.

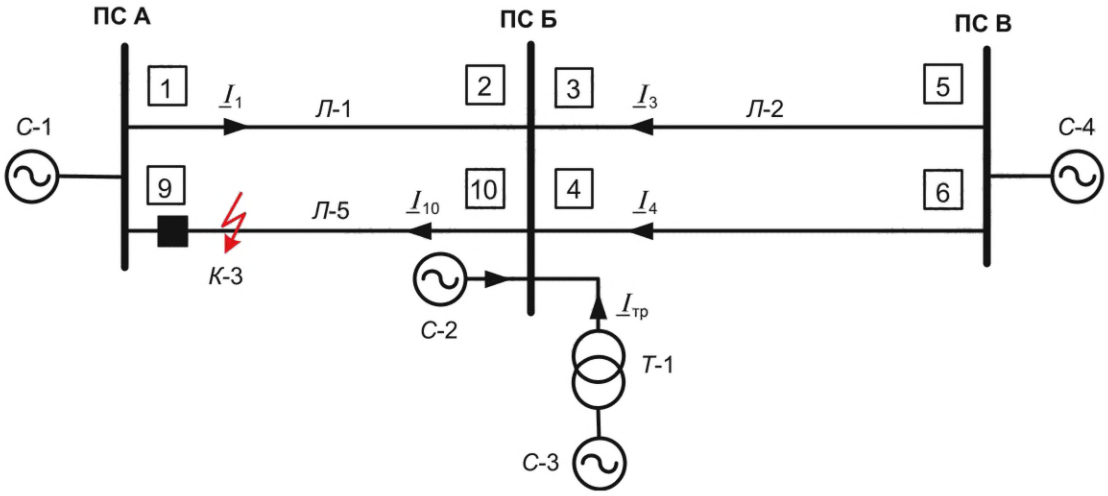


Рисунок 6.2 — Определение коэффициента токораспределения при КЗ в точке К-3

Коэффициент токораспределения при согласовании защиты 1 с защитой 10 (рисунок 6.2) определяется по формуле

$$k_т = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_{10}}. \quad (6.2)$$

6.3.3.8 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по условию отстройки от междуфазных КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б (позиция 2.6, таблица 6.1) проводится по неравенству (5.17) в режиме отключенной параллельной ЛЭП Л-5 в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.3.7.

6.3.3.9 Расчет выдержки времени второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) проводится по неравенству (5.19) в соответствии с 5.3.3.8.

6.3.4 Расчет и выбор параметров настройки третьей ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Основные требования, предъявляемые к третьей ступени ДЗ, — обеспечение резервирования устройств РЗ своей ЛЭП и защит или выключателей смежных элементов (дальнее резервирование), а также обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие третьей ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

В соответствии с пунктом 25 требований [2] при невозможности одновременного выполнения требований по обеспечению чувствительности и селективности параметров настройки ступени ДЗ ЛЭП, выполняющей функции дальнего резервирования, приоритет должен быть отдан требованию обеспечения чувствительности.

6.3.4.1 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности к междуфазным КЗ в конце защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования (позиция 3.1, таблица 6.1) проводится по неравенству (5.21).

Если обеспечение чувствительности третьей ступени защиты 1 к междуфазным КЗ через переходные сопротивления в зоне дальнего резервирования невозможно обеспечить по другим расчетным условиям или по техническим данным защиты, чувствительность обеспечивается в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.4.1.

6.3.4.2 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по согласованию со второй (третьей) ступенью защиты 3(4) смежных ЛЭП (позиции 3.2—3.3, таблица 6.1) проводится аналогично расчету при согласовании второй ступени защиты 1 с первой (второй) ступенью защиты 3(4). Указания по расчету $Z^{III}_{уст1фф}$ для параллельных ЛЭП соответствуют указаниям по расчету сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ одиночной ЛЭП, приведенным в 5.3.4.2.

6.3.4.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 для схемы (рисунок 6.1, в)) по согласованию со второй или третьей ступенью защиты 6 (позиция 3.4, таблица 6.1) проводится в случае, если рассчитанное по предыдущим условиям сопротивление срабатывания третьей ступени защиты 1 не отстроено от КЗ на шинах ПС Г.

6.3.4.4 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по согласованию со второй (третьей) ступенью защиты 10 параллельной ЛЭП Л-5 при ее каскадном отключении со стороны ПС А (позиция 3.5, таблица 6.1) проводится аналогично расчету при согласовании второй ступени защиты 1 с первой ступенью защиты 10.

6.3.4.5 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по согласованию с дистанционной или резервной токовой защитой от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС Б (позиция 3.6, таблица 6.1) проводится в случае, если рассчитанное по предыдущим условиям сопротивление срабатывания третьей ступени защиты 1 не отстроено от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б.

Указания по расчету сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ параллельных ЛЭП по условию согласования с резервными защитами Т (АТ) ПС Б соответствуют указаниям, приведенным в 5.3.3.7 для одиночной ЛЭП.

Если согласование с резервными защитами Т (АТ) ПС Б приводит к ограничению чувствительности или значительному увеличению времени действия третьей ступени защиты 1, расчет сопротивления срабатывания проводится по согласованию с резервными защитами от междуфазных КЗ присоединений стороны смежного напряжения ПС Б.

6.3.4.6 Выдержка времени третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) принимается на ступень селективности ΔT больше выдержки времени ступени защиты смежного элемента, с которой производилось согласование по сопротивлению срабатывания. Указания для расчета выдержки времени третьей ступени защиты 1 для параллельных ЛЭП соответствуют указаниям для одиночной ЛЭП, приведенным в 5.3.4.5.

6.3.4.7 Выбор параметров настройки круговых характеристик защиты 1 по отстройке от нагрузочных режимов работы энергосистемы (позиция 3.7, таблица 6.1) проводится в соответствии с указаниями 4.3.

Если для отстройки от нагрузочных режимов выполняется смещение характеристики третьей ступени защиты 1 в первый квадрант комплексной плоскости, необходимо выполнить проверку надежного зацепления характеристик второй и третьей ступеней защиты 1 согласно 4.2.5.1.

6.4 Расчет параметров настройки ДЗ с полигональными характеристиками

6.4.1 Перечень параметров настройки ДЗ ЛЭП с полигональными характеристиками

В таблице 6.3 приведен перечень параметров настройки ДЗ ЛЭП с полигональными характеристиками срабатывания, которые следует определить в процессе расчета.

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания первой ступени ДЗ приводятся с учетом того, что ступень может иметь общую уставку полного (реактивного) сопротивления срабатывания от всех видов КЗ $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$ или может иметь независимое регулирование уставки полного (реактивного) сопротивления срабатывания для ДО от междуфазных КЗ $Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$ и ДО от КЗ на землю $Z^{I}_{уст1фз}(X^{I}_{уст1фз})$.

Параметры настройки $R^{I}_{уст1фф}$ и $R^{I}_{уст1фз}$, определяющие положение боковых сторон полигональной характеристики, как правило, имеют независимое регулирование для ДО от междуфазных КЗ и ДО от КЗ на землю.

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания вторых и третьих ступеней ДЗ приводятся для ДО от междуфазных КЗ.

Таблица 6.3 — Перечень параметров ДЗ с полигональными характеристиками

Ступень защиты	Обозначение параметра	Наименование параметра
Первая ступень	$Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$	Общее полное (реактивное) сопротивление срабатывания ДО первой ступени от всех видов КЗ
	$Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$	Полное (реактивное) сопротивление ДО первой ступени от междуфазных КЗ

Окончание таблицы 6.3

Ступень защиты	Обозначение параметра	Наименование параметра
Первая ступень	$Z^{I}_{уст1фз}(X^{I}_{уст1фз})$	Полное (реактивное) сопротивление срабатывания ДО первой ступени от КЗ на землю
	$R^{I}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО первой ступени от междуфазных КЗ
	$R^{I}_{уст1фз}$	Активное сопротивление ДО первой ступени от КЗ на землю
Вторая ступень	$Z^{II}_{уст1фф}\left(X^{II}_{уст1фф}\right)$	Полное (реактивное) сопротивление ДО второй ступени от междуфазных КЗ
	$R^{II}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО второй ступени от междуфазных КЗ
Третья ступень	$Z^{III}_{уст1фф}\left(X^{III}_{уст1фф}\right)$	Сопротивление срабатывания ДО третьей ступени от междуфазных КЗ
	$R^{III}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО третьей ступени от междуфазных КЗ

6.4.2 Расчет и выбор параметров настройки первой ступени ДЗ от всех видов КЗ

Основное требование, предъявляемое к первой ступени ДЗ, — обеспечение селективного отключения всех видов КЗ на защищаемой ЛЭП.

6.4.2.1 Первая ступень защиты 1 ЛЭП Л-1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) выполняется без выдержки времени.

6.4.2.2 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$ первой ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах ПС Б (позиция 1.1, таблица 6.1) проводится по неравенствам (5.23) и (5.24) в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$ первой ступени защиты 1 одиночной ЛЭП, приведенными в 5.4.2.2.

6.4.2.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$ первой ступени защиты 1 по условию обеспечения перекрытия зон первых ступеней ДЗ с двух сторон защищаемой ЛЭП (позиция 1.2, таблица 6.1) проводится по неравенствам (5.25) и (5.26) в соответствии с 5.4.2.3.

6.4.2.4 Если расчетное сопротивление срабатывания $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$ первой ступени защиты 1 по условию отстройки при внешних КЗ через расчетные переходные сопротивления не удовлетворяет условию 6.4.2.3, необходимо обеспечить требуемый охват ЛЭП при металлических КЗ, а для отстройки от внешних КЗ через переходные сопротивления необходимо применить угол наклона (скоса) $\varphi_{ск}$ верхней грани характеристики срабатывания (при наличии параметра согласно техническим данным защиты). Указания по выбору угла $\varphi_{ск}$ приведены в 5.4.2.4.

6.4.2.5 Если согласно техническим данным защиты 1 угол наклона (скоса) верхней грани характеристики отсутствует или полученное значение угла $\varphi_{ск}$ превышает диапазон регулирования данного параметра, необходимо для расчетных режимов, где не выполняется условие 6.4.2.2 или получены неудовлетворительные результаты по 6.4.2.4, выполнить отстройку характеристики срабатывания первой ступени защиты 1 от расчетных сопротивлений $\underline{Z}_{р}$ при КЗ через переходное сопротивление на шинах ПС Б уставкой активного сопротивления $R^{I}_{уст1}$ по неравенству (5.27) в соответствии с 5.4.2.5.

6.4.2.6 Расчет сопротивления срабатывания $R^{I}_{уст1}$ первой ступени защиты 1 по условию обеспечения чувствительности к КЗ через переходное сопротивление (позиция 1.3, таблица 6.1) проводится по неравенству (5.28) в соответствии с 5.4.2.6, 5.4.2.7.

6.4.2.7 Выбор угла φ_{IV} ограничения полигональной характеристики в четвертом квадранте комплексной плоскости выполняется в соответствии с 5.4.2.8.

6.4.3 Расчет и выбор параметров настройки второй ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Требования, предъявляемые ко второй ступени ДЗ, — обеспечение надежного отключения междуфазных КЗ по всей длине защищаемой ЛЭП и обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие второй ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

6.4.3.1 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}\left(X^{II}_{уст1фф}\right)$ второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности при металлических междуфазных КЗ в конце защищаемой ЛЭП (позиция 2.1, таблица 6.1) проводится по неравенствам (5.30) и (5.31) в

соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}\left(X^{II}_{уст1фф}\right)$ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.4.3.1.

6.4.3.2 Расчет активного сопротивления срабатывания $R^{II}_{уст1}$ второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности при междуфазных КЗ через переходное сопротивление в конце защищаемой ЛЭП (позиция 2.1, таблица 6.1) проводится по неравенству (5.32) в соответствии с 5.4.3.2.

6.4.3.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ и выдержек времени второй ступени защиты 1 с полигональной характеристикой для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по условиям обеспечения селективности при междуфазных КЗ на смежных участках сети проводится по всем расчетным условиям (позиции 2.2—2.6, таблица 6.1) и выполняется аналогично расчетам при выборе параметров настройки второй ступени защиты 1 с круговой характеристикой согласно 6.3.3.2—6.3.3.9, при этом в выражениях для расчета сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ параметр d, который при согласовании защит учитывает возможное различие угла наклона полигональной характеристики второй ступени защиты 1 и угла расчетного сопротивления $\underline{Z}_р$ следует определять по формуле (5.34).

При согласовании защит с разнотипными характеристиками срабатывания необходимо учитывать рекомендации 4.2.2.9.

6.4.3.4 Расчет реактивного сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 $X^{II}_{уст1фф}$ проводится на основании принятого значения уставки полного сопротивления $Z^{II}_{уст1фф}$ по формуле (5.35).

6.4.4 Расчет и выбор параметров настройки третьей ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Основные требования, предъявляемые к третьей ступени ДЗ, — обеспечение резервирования устройств РЗ своей ЛЭП и защит или выключателей смежных сетевых элементов (дальнее резервирование), а также обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие третьей ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

В соответствии с пунктом 25 требований [2] при невозможности одновременного выполнения требований по обеспечению чувствительности и селективности параметров настройки ступени ДЗ ЛЭП, выполняющей функции дальнего резервирования, приоритет должен быть отдан требованию обеспечения чувствительности.

6.4.4.1 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}\left(X^{III}_{уст1фф}\right)$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности к металлическим междуфазным КЗ в конце защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования (позиция 3.1, таблица 6.1) проводится по неравенствам (5.36) и (5.37).

Если обеспечение чувствительности третьей ступени защиты 1 к междуфазным КЗ в зоне дальнего резервирования невозможно обеспечить по другим расчетным условиям или техническим данным защиты, чувствительность обеспечивается в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.4.1.

6.4.4.2 Расчет активного сопротивления срабатывания $R^{III}_{уст1}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности при междуфазных КЗ через переходное сопротивление в конце защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования (позиция 4.1, таблица 6.1) проводится по неравенству (5.38) в соответствии с 5.4.4.2.

6.4.4.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ и выдержки времени третьей ступени защиты 1 с полигональной характеристикой для схем (рисунок 6.1, а) — г)) по условиям обеспечения селективности при междуфазных КЗ на смежных участках сети проводится по всем расчетным условиям (позиции 3.2—3.6, таблица 6.1) и выполняется аналогично расчетам при выборе параметров настройки третьей ступени защиты 1 с круговой характеристикой согласно 6.3.4.2—6.3.4.6. В выражениях для расчета сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ параметр d следует определять по формуле (5.34).

При согласовании защит с разнотипными характеристиками срабатывания необходимо учитывать рекомендации 4.2.2.9.

6.4.4.4 Расчет реактивного сопротивления срабатывания $X^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 проводится на основании принятого значения уставки полного сопротивления $Z^{III}_{уст1фф}$ по формуле (5.39).

6.4.4.5 Выбор параметров настройки полигональных характеристик защиты 1 по отстройке от нагрузочных режимов работы энергосистем (позиция 3.7, таблица 6.1) проводится в соответствии с указаниями 4.3.

7 Расчет и выбор параметров настройки дистанционной защиты линий электропередачи при наличии ответвлений

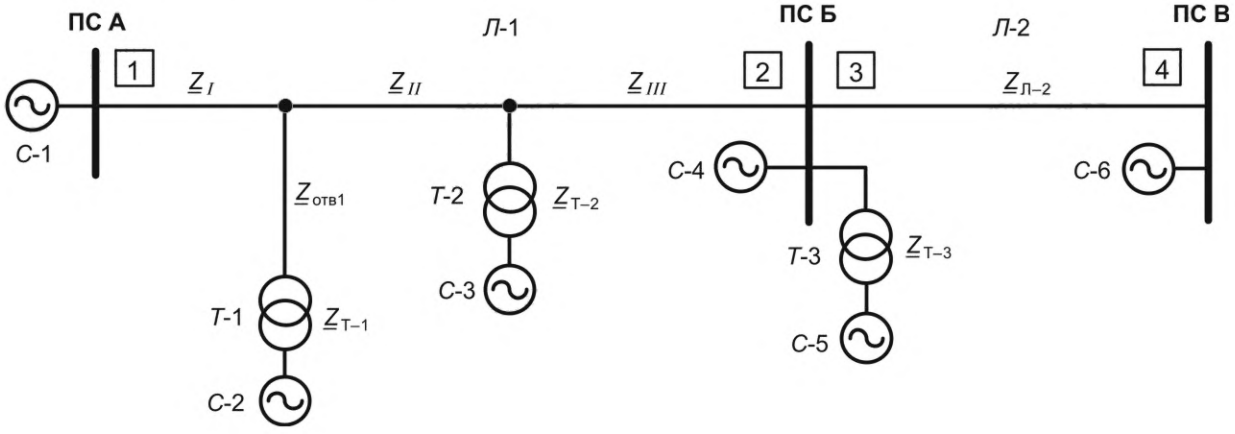
7.1 Типовые схемы участков сети

Указания по расчету и выбору параметров настройки трехступенчатой ДЗ одиночных и параллельных ЛЭП с питанием с двух и более сторон при наличии ответвлений (отпаек) приводятся для типовых схем смежной электрической сети (рисунок 7.1).

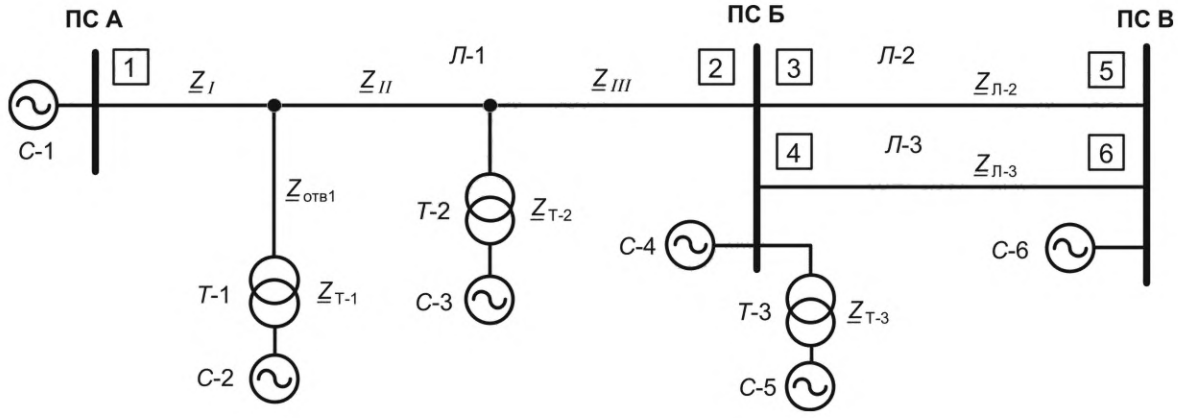
Если со стороны ПС на ответвлениях включены источники, мощностью соизмеримые с источниками со стороны основных питающих концов ЛЭП, такая линия считается с многосторонним питанием и ДЗ устанавливается на всех питающих концах. В этом случае расчетные условия для выбора параметров настройки ДЗ, установленной со стороны ПС на ответвлении при любой схеме электрических соединений ПС, за исключением блочной схемы Т (АТ) — линия, аналогичны рассмотренным в данном разделе.

При блочной схеме электрических соединений ПС на ответвлении ДЗ может подключаться к ТН, установленным на стороне НН (СН) Т (АТ) блока. В этом случае принципы выполнения и расчетные условия по выбору параметров настройки ДЗ аналогичны ДЗ ЛЭП, работающей по схеме блока Т (АТ) — линия, указания по расчету приведены в разделе 8.

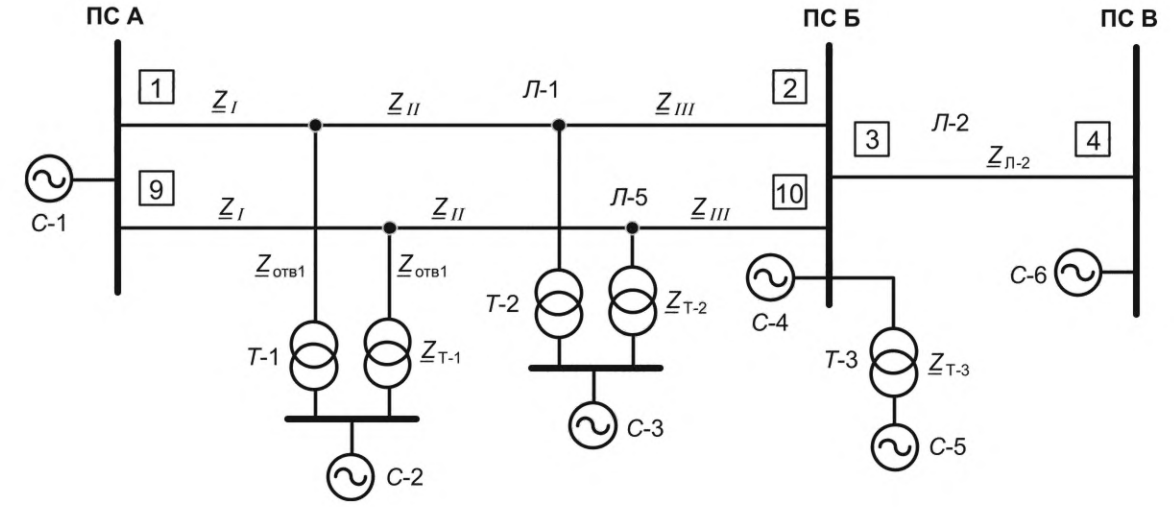
Типовые схемы электрической сети при наличии на смежных участках ЛЭП с проходными ПС или ЛЭП с односторонним питанием в данном разделе не рассматриваются. Указания по расчету и выбору параметров настройки ДЗ ЛЭП с учетом данных схем приведены в разделах 5, 6 и аналогичны при наличии на ЛЭП ответвлений (отпаек).



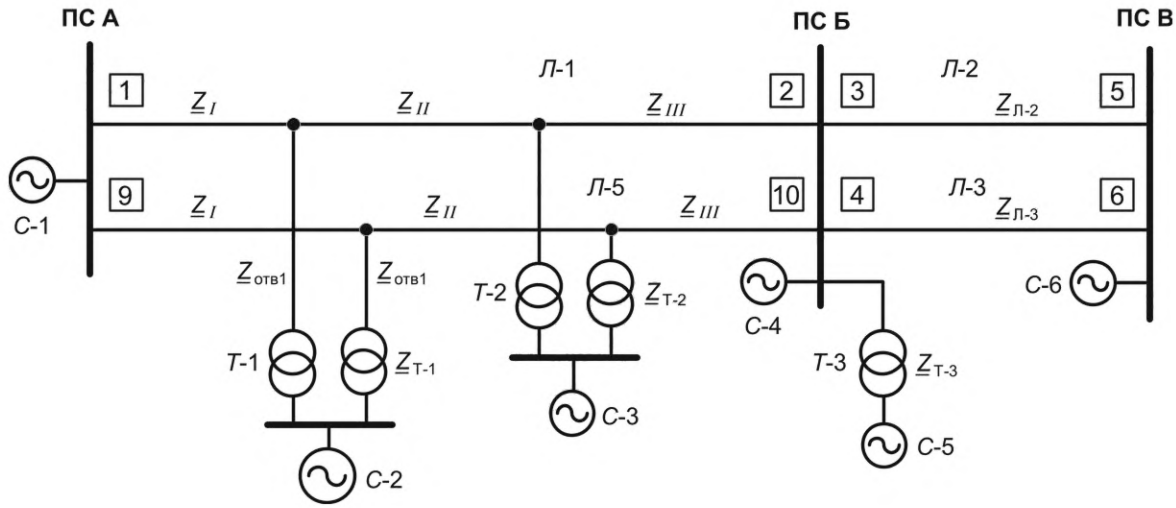
а)



б)



в)



г)

Рисунок 7.1 — Примеры типовых схем участков сети с одиночными и параллельными ЛЭП с двусторонним питанием при наличии ответвлений (отпаек)

Приведенные на рисунке 7.1 примеры типовых конфигураций электрической сети применимы также для одиночных и параллельных ЛЭП с ответвлениями, отходящих от шин электрических станций.

К одной питающей ЛЭП могут присоединяться несколько ответвлений. Схемы первичных электрических соединений на ПС ответвлений могут быть как с выключателями на стороне ВН, так и упрощенные, без выключателя с установкой короткозамыкателя на стороне ВН, который автоматически включается при действии устройств РЗ Т (АТ) для искусственного создания КЗ и обеспечения работы устройств РЗ питающей ЛЭП.

Источниками со стороны НН (СН) Т (АТ) ПС на ответвлениях могут быть:

- электрические станции относительно небольшой мощности, питающие местную нагрузку;
- синхронные компенсаторы;
- двигательная нагрузка (мощные синхронные и асинхронные двигатели могут рассматриваться как источники в начальный момент КЗ);
- электрическая сеть, которая связывает питающую ЛЭП и Т (АТ) ПС на ответвлении с другими источниками энергосистемы;
- малая генерация (газопоршневая электростанция, газотурбинная электростанция, солнечная электростанция, ветровая электростанция) может рассматриваться как источник в начальный момент КЗ в зависимости от удаленности от места КЗ;

- на тяговых ПС на ответвлениях источником может являться контактная сеть однофазного переменного тока электрифицированной железной дороги, поскольку на тяговых ПС Т работают, как правило, параллельно на стороне 27 кВ и связаны со смежными ПС через контактную сеть.

В качестве недвигательной нагрузки на ПС ответвлений могут рассматриваться бытовые и промышленные токоприемники, которые допускается учитывать в виде шунтов обобщенных нагрузок, значение сопротивления которых может быть приближенно определено в зависимости от мощности Т (АТ), установленных на ПС ответвления, а также типового состава потребителей промышленного района.

7.2 Общие указания по расчету и перечень расчетных условий

7.2.1 Общие указания по расчету и выбору параметров настройки трехступенчатой ДЗ одиночных и параллельных ЛЭП с питанием с двух и более сторон при наличии ответвлений (отпаек) соответствуют указаниям, приведенным для одиночной ЛЭП с двусторонним питанием в 5.2.1. Указания по выбору уставки угла максимальной чувствительности круговой характеристики $\varphi_{мч}$ и уставки угла наклона полигональной характеристики $\varphi_{хар}$ приведены в 5.3.1 и 5.4.1 соответственно.

Дополнительно необходимо учитывать следующие расчетные условия и указания по расчету.

7.2.1.1 Расчет параметров настройки ДЗ ЛЭП с ответвлениями необходимо проводить с учетом особенностей режимов их работы.

По условиям отстройки и согласования:

- со стороны ПС на ответвлениях все источники отключены либо отсутствуют;
- на части ПС на ответвлениях источники отключены, на других включено реально возможное количество источников;
- защищаемая ЛЭП работает в режиме, когда она отключена с одной из основных питающих сторон, противоположной месту установки рассматриваемой защиты;
- при расчете параметров настройки ДЗ параллельных ЛЭП с ответвлениями (рисунок 7.1, в), г)) в случае параллельной работы Т ПС на ответвлениях на стороне НН (СН), а также в случае наличия ремонтной перемычки на стороне ВН ПС ответвления, должен рассматриваться режим, когда параллельная ЛЭП отключена, а подключенные к ней в нормальном режиме Т на ответвлениях переведены на питание от защищаемой ЛЭП.

По условию обеспечения чувствительности:

- со стороны ПС на ответвлениях включено максимально возможное количество источников;
- защищаемая ЛЭП включена в транзит при минимальном режиме системы со стороны рассматриваемой защиты и максимальном режиме системы, примыкающей с противоположной стороны ЛЭП.

Параллельная работа Т ПС на ответвлениях на стороне НН (СН) на параллельных ЛЭП является частным случаем, редко применяемым на практике (за исключением тяговых ПС переменного тока). Далее указания по выбору параметров настройки ДЗ одиночных и параллельных ЛЭП с питанием с двух и более сторон при наличии ответвлений приводятся для чаще применяемых схем ПС на ответвлениях с раздельной работой систем (секций) шин на стороне НН (СН).

7.2.1.2 Расчет сопротивления срабатывания ступеней ДЗ необходимо проводить с учетом различия в токах, протекающих на отдельных участках защищаемой ЛЭП при внешних повреждениях и при КЗ на защищаемой ЛЭП.

Коэффициент токораспределения $k_т$ при выполнении расчетов следует принять:

- максимально возможным для выбора сопротивления срабатывания по условию отстройки или согласования;
- минимально возможным для выбора сопротивления срабатывания по условию обеспечения чувствительности.

Наличие промежуточного источника со стороны ПС на ответвлении между местом установки ДЗ и местом КЗ (промежуточная подпитка) приводит к увеличению сопротивления, измеряемого ДО защиты.

Отсутствие промежуточного источника питания со стороны ПС на ответвлении в некоторых случаях может привести к уменьшению измеряемого сопротивления из-за эффекта «отрицательной подпитки» при наличии обходной связи между двумя концами линии, как показано на рисунке 7.2.

Аналогичное распределение токов при КЗ в конце ЛЭП может иметь место при отсутствии источника питания и подключении шунта недвигательной нагрузки $\underline{Z}_{нагр}$ со стороны ПС на ответвлении. В этом случае эффект «отрицательной подпитки» также приводит к уменьшению сопротивления, измеряемого ДО защиты, что необходимо учитывать при выборе сопротивления срабатывания ступеней ДЗ по условию селективности. Влияние подключения шунта нагрузки на распределение токов сказывается сильнее при удаленных КЗ при сохранении остаточного напряжения на шинах ПС на ответвлении.

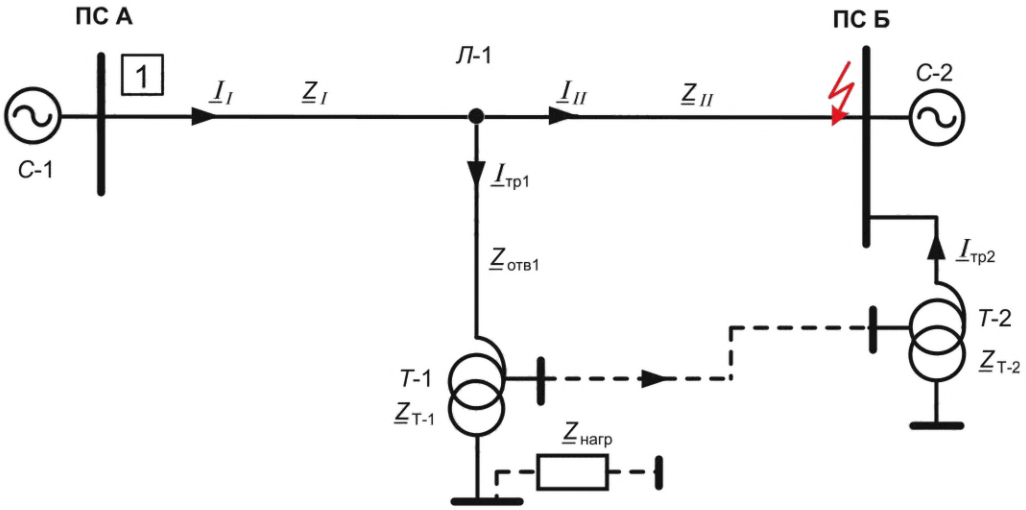


Рисунок 7.2 — Эффект «отрицательной подпитки» при КЗ на ЛЭП с ответвлением

7.2.1.3 Расчет сопротивления срабатывания ДО от междуфазных КЗ по условию отстройки или обеспечению чувствительности при КЗ на шинах НН Т (АТ) ПС на ответвлениях проводится при трехфазных и двухфазных КЗ, в случае двухфазных КЗ необходимо учитывать влияние схемы соединения обмоток силовых Т Y/Δ на дистанционные замеры.

7.2.1.4 Расчет сопротивления срабатывания ДО от КЗ на землю необходимо проводить с учетом возможных режимов заземления нейтралей Т ПС на ответвлениях.

7.2.1.5 Расчет сопротивления срабатывания ступеней ДЗ без выдержки времени по условию отстройки от БТН силовых Т ПС на ответвлениях при включении ЛЭП под напряжение необходимо проводить в соответствии с указаниями 11.2 и приложения Ж.

7.2.1.6 При наличии РПН Т (АТ) ПС на ответвлениях расчет сопротивлений срабатывания ступеней ДЗ по условию отстройки при КЗ на шинах НН (СН) Т (АТ) необходимо проводить в соответствии с 4.2.2.5. При расчетах по данному условию требуется рассматривать КЗ за наиболее мощными Т, расположенными ближе к месту установки рассматриваемой защиты.

Отстройка первой и второй ступеней ДЗ от замеров при КЗ на шинах НН (СН) Т (АТ) ПС на ответвлениях может привести к сокращению зоны срабатывания этих ступеней по сравнению с соответствующими ступенями ДЗ ЛЭП без ответвлений.

7.2.1.7 Рекомендации по замедлению действия первой ступени ДЗ на отключение

При КЗ вблизи шин ВН ПС на ответвлении (на ошиновке ВН, на выводах или в обмотке ВН Т (АТ)) практически одновременно срабатывают основные защиты Т (АТ) и быстродействующие защиты ЛЭП. При этом возможна ситуация, когда отключение ЛЭП от быстродействующих защит произойдет быстрее, чем основные защиты Т (АТ) подействуют на отключение (на отключение выключателя или на включение короткозамыкателя на стороне ВН). Это может привести к подаче напряжения на оставшийся включенным поврежденный Т (АТ) устройством АПВ ЛЭП.

Для предотвращения подобных случаев, если сопротивление срабатывания первой ступени ДЗ не отстроено от КЗ на стороне ВН Т (АТ) ПС на ответвлении, целесообразно действие на отключение указанной ступени замедлять до 0,12 с, если время отключения КЗ допустимо по условиям обеспечения динамической устойчивости генерирующего оборудования.

Недостатком такого решения является возможный отказ первой ступени ДЗ при близких трехфазных КЗ из-за недостаточной длительности импульса срабатывания ДО защиты по «контуру памяти».

В целях обеспечения надежного отключения близких трехфазных КЗ:

- для устройств РЗ на электромеханической элементной базе рекомендуется использовать МФТО, если она эффективна при трехфазных КЗ в начале ЛЭП в нормальной схеме и минимальном режиме работы прилегающей сети, или выполнить подхват первой ступени ДЗ от третьей ступени ДЗ, при этом характеристика срабатывания третьей ступени ДЗ должна иметь смещение в третий квадрант комплексной плоскости сопротивлений;

- для микропроцессорных устройств РЗ выполнить подхват первой ступени ДЗ от второй ненаправленной ступени ДЗ.

7.2.2 Перечень расчетных условий для выбора параметров настройки ДЗ одиночной и параллельных ЛЭП с питанием с двух и более сторон при наличии ответвлений (отпаек)

В таблице 7.1 приведен перечень расчетных условий для выбора параметров настройки трехступенчатой ДЗ 1 ЛЭП Л-1 с круговыми и полигональными характеристиками срабатывания для типовых схем смежной электрической сети (рисунок 7.1, а) — г)).

Таблица 7.1 — Расчетные условия для выбора параметров настройки ДЗ

№ условия	Ступень защиты	Схема (рисунок 7.1)	Расчетные условия
1.1	Первая ступень (ступень без выдержки времени)	а), б), в), г)	Отстройка от КЗ на шинах ПС Б, примыкающей к противоположному концу ЛЭП Л-1
1.2			Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС на ответвлениях ЛЭП Л-1
1.3			Проверка зоны охвата ЛЭП при металлических КЗ
1.4			Обеспечение чувствительности при КЗ через переходное сопротивление в начале ЛЭП Л-1 и в конце зоны охвата первой ступени ДЗ (для ДЗ с полигональной характеристикой)
2.1	Вторая ступень	а), б), в), г)	Обеспечение чувствительности при КЗ на каждом противоположном конце ЛЭП Л-1
2.2		а), в)	Согласование с первой (второй) ступенью защиты 3
		в), г)	Согласование с первой (второй) ступенью защиты 10 при каскадном отключении повреждения на параллельной ЛЭП Л-5 со стороны ПС А
2.3		б), г)	Отстройка от КЗ на шинах ПС В
2.4		а), б), в), г)	Отстройка от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б
2.5		а), б), в), г)	Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС на ответвлениях ЛЭП Л-1
2.6		а), б), в), г)	Отстройка от БТН Т (АТ) ПС на ответвлениях ЛЭП Л-1
3.1	Третья ступень	а), б), в), г)	Обеспечение чувствительности при КЗ на каждом конце ЛЭП Л-1 и в зоне дальнего резервирования
3.2		а), в)	Согласование со второй (третьей) ступенью защиты 3
3.3		б), г)	Согласование со второй (третьей) ступенью защиты 3 и защиты 4
3.4		в), г)	Согласование со второй (третьей) ступенью защиты 10 при каскадном отключении повреждения на параллельной ЛЭП Л-5 со стороны ПС А
3.5		а), б), в), г)	Согласование с дистанционной или резервной токовой защитой от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС Б
3.6		а), б), в), г)	Согласование с дистанционной или резервной токовой защитой от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС на ответвлениях ЛЭП Л-1
3.7		а), б), в), г)	Отстройка от нагрузочных режимов работы энергосистем
3.8		а), б), в), г)	Отстройка от БТН Т (АТ) ПС на ответвлениях ЛЭП Л-1
Примечание — В данной таблице под сокращением «ПС» следует понимать подстанции и/или электростанции.			

7.3 Расчет параметров настройки ДЗ с круговыми характеристиками

7.3.1 Перечень параметров настройки ДЗ ЛЭП с круговыми характеристиками срабатывания, которые требуется определить в процессе расчета, приведен в таблице 7.2.

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания первой ступени ДЗ приводятся с учетом того, что ступень может иметь общее сопротивление срабатывания ДО от всех видов КЗ ($Z^{I}_{уст}$) или может иметь независимое регулирование сопротивления срабатывания ДО от междуфазных КЗ ($Z^{I}_{устфф}$) и ДО от КЗ на землю ($Z^{I}_{устфз}$).

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания вторых и третьих ступеней ДЗ приводятся для ДО от междуфазных КЗ.

Таблица 7.2 — Перечень параметров ДЗ с круговыми характеристиками

Ступень защиты	Обозначение параметра	Наименование параметра
Первая ступень	$Z^{I}_{уст1}$	Общее сопротивление срабатывания ДО первой ступени от всех видов КЗ
	$Z^{I}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО первой ступени от междуфазных КЗ
	$Z^{I}_{уст1фз}$	Сопротивление срабатывания ДО первой ступени от КЗ на землю
Вторая ступень	$Z^{II}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО второй ступени от междуфазных КЗ
Третья ступень	$Z^{III}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО третьей ступени от междуфазных КЗ

7.3.2 Расчет и выбор параметров настройки первой ступени ДЗ от всех видов КЗ

Основное требование, предъявляемое к первой ступени ДЗ, — обеспечение селективного отключения всех видов КЗ на защищаемой ЛЭП.

7.3.2.1 Первая ступень защиты 1 для типовых конфигураций электрической сети (рисунок 7.1, а) — г)) выполняется без выдержки времени с учетом 7.2.1.7 по замедлению действия первой ступени ДЗ на отключение.

7.3.2.2 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}$ первой ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах ПС Б (позиция 1.1, таблица 7.1) проводится по неравенству (7.1) в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}$ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.2.2, и указаниями 7.2.1.1, 7.2.1.2.

Дополнительно при расчете сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фз}$ ДО от КЗ на землю необходимо учитывать 7.2.1.4 и указания приложения Б по расчету коэффициентов компенсации для ЛЭП с ответвлениями.

$$Z^{I}_{уст1} \le k_{отс} \cdot \frac{\left|\underline{Z}_{р}\right|}{\cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_{р}\right)}, \tag{7.1}$$

где $|\underline{Z}_{р}|$ и $\varphi_{р}$ — модуль и угол расчетного сопротивления;

$\varphi_{мч}$ — угол максимальной чувствительности круговой характеристики;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.3.

Для ЛЭП без учета емкостной проводимости расчетное сопротивление $\underline{Z}_{р}$ при металлических междуфазных КЗ на шинах ПС Б (рисунок 7.3) определяется по формуле

$$\underline{Z}_{р} = \underline{Z}_{I} + \frac{\underline{Z}_{II}}{k_{т\,II}} + \frac{\underline{Z}_{III}}{k_{т\,III}}, \tag{7.2}$$

где $\underline{Z}_{I}$, $\underline{Z}_{II}$, $\underline{Z}_{III}$ — сопротивления прямой последовательности участков ЛЭП Л-1;

$k_{т\,II}$, $k_{т\,III}$ — коэффициенты токораспределения.

Коэффициенты токораспределения при КЗ на шинах ПС Б определяются по формулам:

$$k_{т\,II} = \frac{\underline{I}_{I}}{\underline{I}_{II}}, \quad k_{т\,III} = \frac{\underline{I}_{I}}{\underline{I}_{III}}. \tag{7.3}$$

При наличии параллельной ЛЭП (рисунок 7.1, в), г)) определение коэффициентов токораспределения при междуфазных КЗ на шинах ПС Б также проводится по формулам (7.3).

Расчетными являются такие значения коэффициентов $k_{т\,II}$, $k_{т\,III}$, которым соответствует наименьшее сопротивление срабатывания согласно неравенству (7.1).

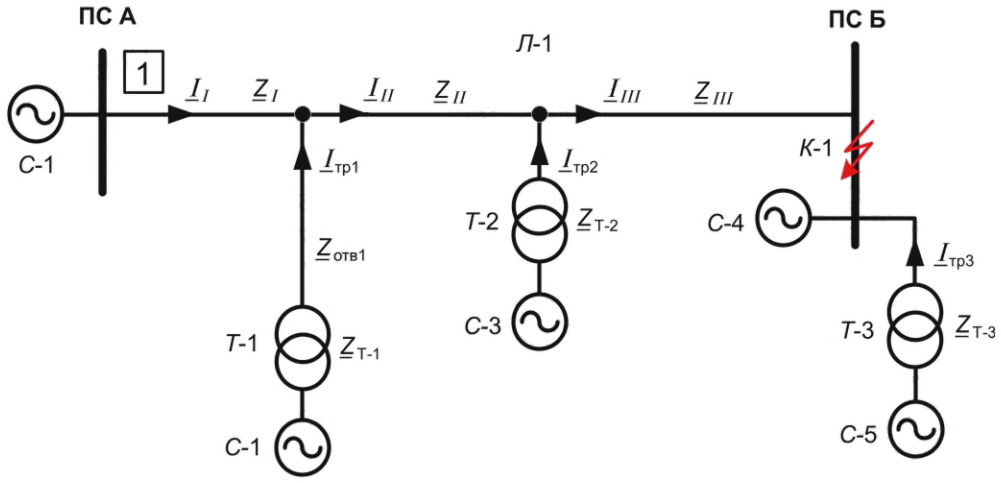


Рисунок 7.3 — Определение коэффициентов токораспределения при КЗ в точке К-1

7.3.2.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}$ первой ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах НН (СН) Т (АТ) ПС на ответвлениях ЛЭП Л-1 (позиция 1.2, таблица 7.1) проводится по неравенству (7.1) в соответствии с 7.2.1.1—7.2.1.3, 7.2.1.6.

Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фз}$ ДО от КЗ на землю по данному расчетному условию не проводится, если обмотка Т (АТ) на стороне НН (СН) собрана в Δ или Y без заземленной нейтрали.

Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}$ ДО от междуфазных КЗ по условию отстройки от КЗ на шинах НН Т (АТ) ПС на ответвлениях проводится при трехфазных и двухфазных КЗ, при двухфазных КЗ необходимо учитывать влияние схемы соединения обмоток силовых Т Y/Δ на дистанционные замеры.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ и при междуфазных КЗ через расчетные переходные сопротивления в нормальной и ремонтных схемах сети при нулевом доаварийном перетоке мощности по защищаемой ЛЭП, а также с учетом доаварийных перетоков мощности, характерных для рассматриваемых схем сети.

Для ЛЭП без учета емкостной проводимости сопротивления $\underline{Z}_р$ при металлических трехфазных КЗ на шинах НН (СН) Т (АТ) ПС на ответвлениях ЛЭП Л-1 рассчитываются по формулам:

$$\underline{Z}_р = \underline{Z}_I + \frac{\underline{Z}_{отв1} + \underline{Z}_{Т\text{-}1}}{k_{т\ Т\text{-}1}}; \tag{7.4}$$

$$\underline{Z}_р = \underline{Z}_I + \frac{\underline{Z}_{II}}{k_{т\ II}} + \frac{\underline{Z}_{Т\text{-}2}}{k_{т\ Т\text{-}2}}, \tag{7.5}$$

где $\underline{Z}_{отв1}$ — сопротивление первого ответвления;

$\underline{Z}_{Т\text{-}1}$, $\underline{Z}_{Т\text{-}2}$ — сопротивления Т (АТ) Т-1, Т-2;

$k_{т\ II}$, $k_{т\ Т\text{-}1}$, $k_{т\ Т\text{-}2}$ — коэффициенты токораспределения.

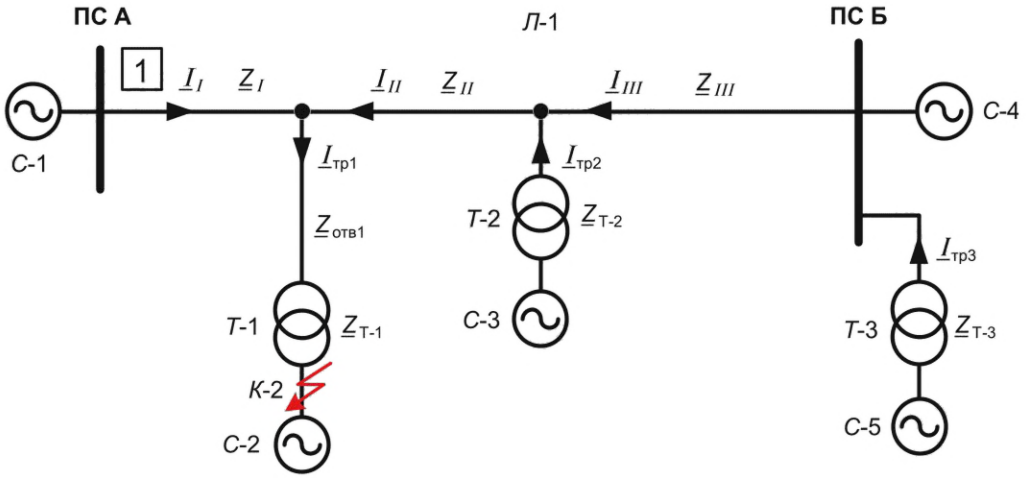
При наличии на Т (АТ) Т-1, Т-2 регулирования напряжения под нагрузкой при расчете $\underline{Z}_р$ следует учитывать минимальные значения сопротивлений $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$, $\underline{Z}_{Т\text{-}2}$, рассчитанные при крайних (фактических) положениях переключателей РПН.

Коэффициент токораспределения при междуфазных КЗ на шинах НН (СН) первой ответвительной ПС ЛЭП Л-1 (К-2, рисунок 7.4) определяется по формуле

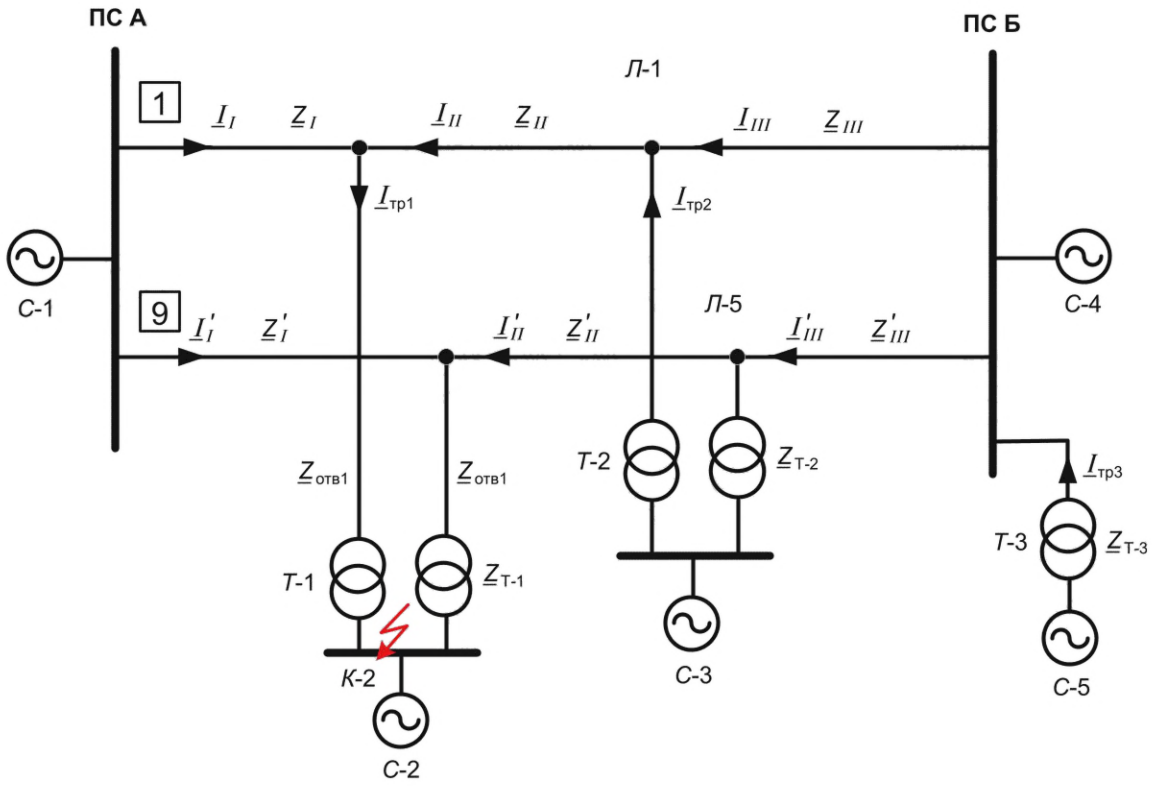
$$k_{т\ Т\text{-}1} = \frac{\underline{I}_I}{\underline{I}_{тр1}}. \tag{7.6}$$

Коэффициенты токораспределения при междуфазных КЗ на шинах НН (СН) второй ответвительной ПС ЛЭП Л-1 (К-3, рисунок 7.5) определяются по формулам:

$$k_{т\ II} = \frac{\underline{I}_I}{\underline{I}_{II}}, \quad k_{т\ Т\text{-}2} = \frac{\underline{I}_I}{\underline{I}_{тр2}}. \tag{7.7}$$



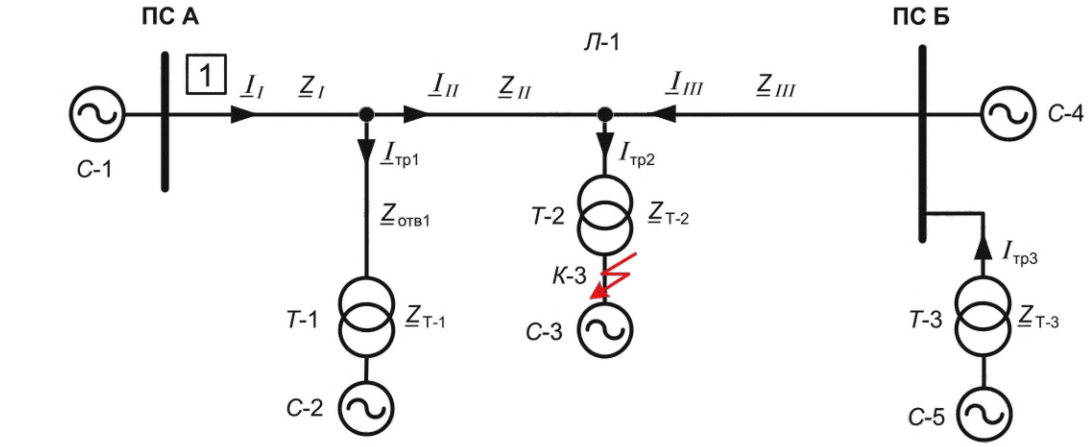
1)



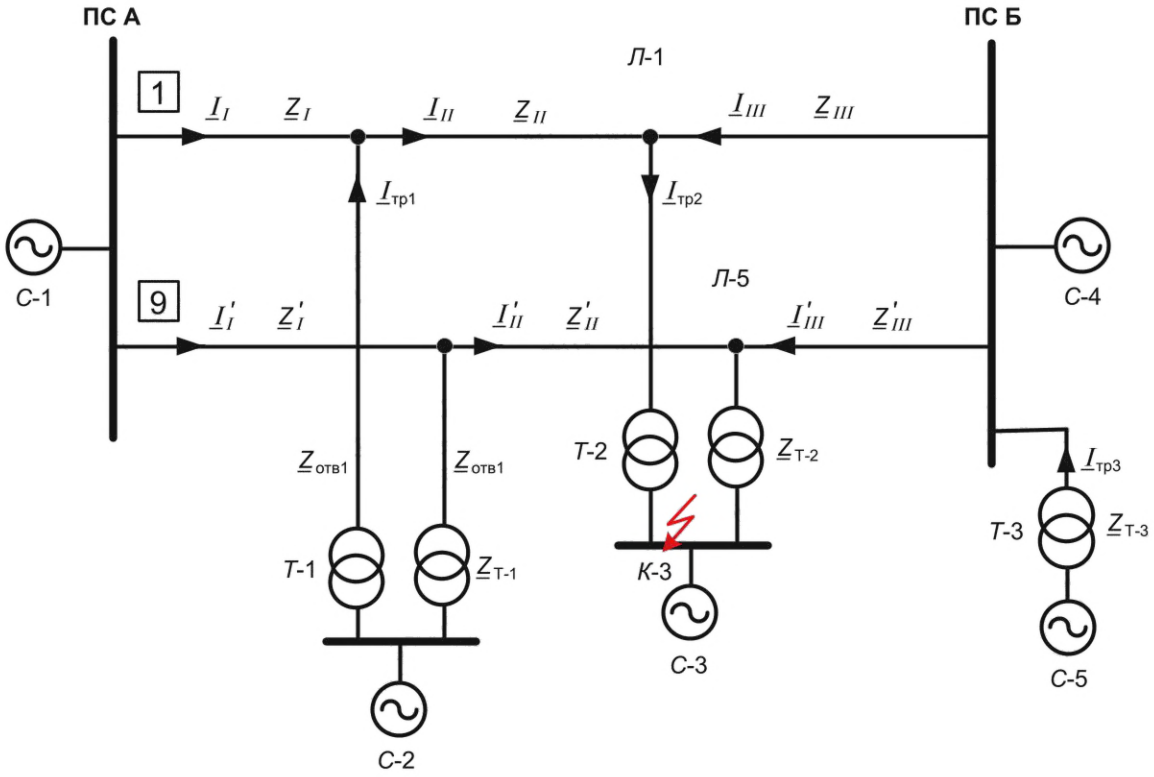
2)

1) для схем «а» и «б»; 2) для схем «в» и «г».

Рисунок 7.4 — Определение коэффициентов токораспределения при КЗ в точке К-2



1)



2)

1) для схем «а» и «б»; 2) для схем «в» и «г»

Рисунок 7.5 — Определение коэффициентов токораспределения при КЗ в точке К-3

Расчетным является такое значение коэффициента токораспределения, которому соответствует наименьшее значение сопротивления срабатывания согласно неравенству (7.1).

При наличии на ПС ответвлений выключателей на стороне ВН Т (АТ) допускается проводить расчет сопротивления срабатывания первой ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах ВН ПС на ответвлениях. Это может быть целесообразно в тех случаях, когда на ЛЭП имеется несколько отпаечных ПС и отключение КЗ на стороне ВН одной из них не должно приводить к обесточиванию других. Однако отстройка от КЗ на шинах ВН ПС на ответвлениях вместо отстройки от КЗ на шинах СН (НН) приводит к существенному сокращению зоны охвата ЛЭП первой ступенью защиты 1. Возможность использования данного условия необходимо оценивать, исходя из конкретных схемно-режимных условий и состава устройств РЗ ЛЭП Л-1 и оборудования ПС на ответвлениях.

7.3.2.4 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}$ первой ступени защиты 1 по условию обеспечения перекрытия зон первых ступеней ДЗ с двух сторон защищаемой ЛЭП (позиция 1.3, таблица 7.1) проводится по неравенству (5.2) в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}$ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.2.3.

7.3.3 Расчет и выбор параметров настройки второй ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Требования, предъявляемые ко второй ступени ДЗ, — обеспечение надежного отключения междуфазных КЗ по всей длине и на каждом конце защищаемой ЛЭП и обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие второй ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

7.3.3.1 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а) — г)) по обеспечению чувствительности к КЗ на каждом конце ЛЭП Л-1, противоположному месту установки защиты 1 (позиция 2.1, таблица 7.1) проводится по неравенству (5.3) в соответствии с 5.3.3.1, 7.2.1.1, 7.2.1.2.

Если на защищаемой ЛЭП с ответвлениями значительной длины не удается одновременно обеспечить требуемую чувствительность второй ступени ДЗ при КЗ в конце длинного ответвления и селективность с защитами смежных присоединений, в этом случае необходимо обеспечить требуемую чувствительность третьей ступени ДЗ при КЗ на каждом конце защищаемой ЛЭП в соответствии с 4.2.5.4. Чувствительность второй ступени ДЗ к КЗ в конце длинного ответвления допускается обеспечить в режиме каскадного отключения ЛЭП с противоположной стороны при условии обеспечения:

- требуемой чувствительности второй ступени ДЗ с противоположной стороны ЛЭП без каскада;
- селективности защит прилегающей смежной сети с учетом каскадного действия защит с двух сторон ЛЭП при ликвидации КЗ в конце длинного ответвления.

7.3.3.2 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 по условию согласования с дистанционными и/или резервными токовыми защитами смежных присоединений от междуфазных КЗ требуется проводить методом поиска конца зоны действия ступени защиты, с которой проводится согласование с учетом возможного сокращения ее зоны, и отстройкой от полученного расчетного замера по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left|\underline{Z}_{р}\right| \cdot d, \tag{7.8}$$

где $|\underline{Z}_{р}|$ — модуль расчетного сопротивления;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7 и/или 4.2.4.1;

d — параметр, который учитывает возможное различие угла максимальной чувствительности круговой характеристики второй ступени защиты 1 и угла расчетного сопротивления $\underline{Z}_{р}$, определяется по формуле

$$d = \frac{1}{\cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_{р}\right)}. \tag{7.9}$$

Расчетные выражения по условиям согласования или отстройки с использованием параметров схемы замещения элементов электрической сети приводятся далее для пояснения принципов расчета и справедливы для частного случая однородных ЛЭП без емкостной проводимости при равных углах максимальной чувствительности круговых характеристик согласуемых защит.

При согласовании ДЗ смежных сетевых элементов с разнотипными характеристиками срабатывания необходимо учитывать 4.2.2.9.

При согласовании ДЗ с резервными токовыми защитами смежных сетевых элементов от междуфазных КЗ необходимо учитывать 4.2.4.1 и 4.2.4.2.

7.3.3.3 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а), в)) по согласованию с первой ступенью защиты 3 (позиция 2.2, таблица 7.1) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left|\underline{Z}_{I} + \frac{\underline{Z}_{II}}{k_{т\ II}} + \frac{\underline{Z}_{III}}{k_{т\ III}} + \frac{1-\alpha}{k_{т\ IV}} \cdot Z^{I}_{уст3}\right| \cdot d, \tag{7.10}$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7;

α — коэффициент, учитывающий сокращение зоны ступени ДЗ, с которой проводится согласование, определяется согласно 4.2.1;

$Z^{I}_{уст3}$ — сопротивление срабатывания ДО первой ступени от междуфазных КЗ защиты 3;

$k_{т\ II}$, $k_{т\ III}$, $k_{т\ IV}$ — коэффициенты токораспределения;

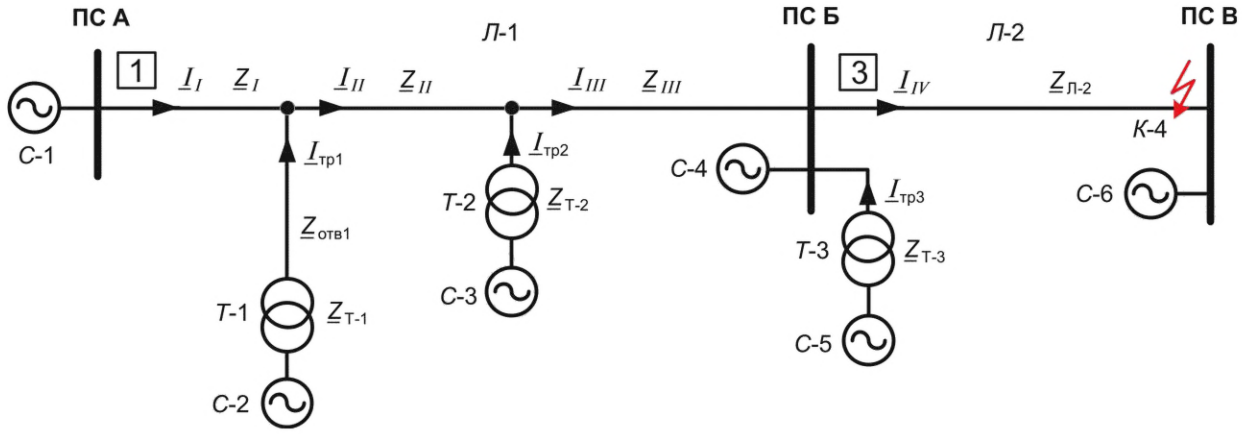
d — определяется по формуле (7.9) в случае круговой характеристики.

Коэффициенты токораспределения при согласовании с первой ступенью защиты 3 (К-4, рисунок 7.6) $k_{т\ II}$, $k_{т\ III}$ определяются по формуле (7.3), коэффициент токораспределения $k_{т\ IV}$ определяется по формуле

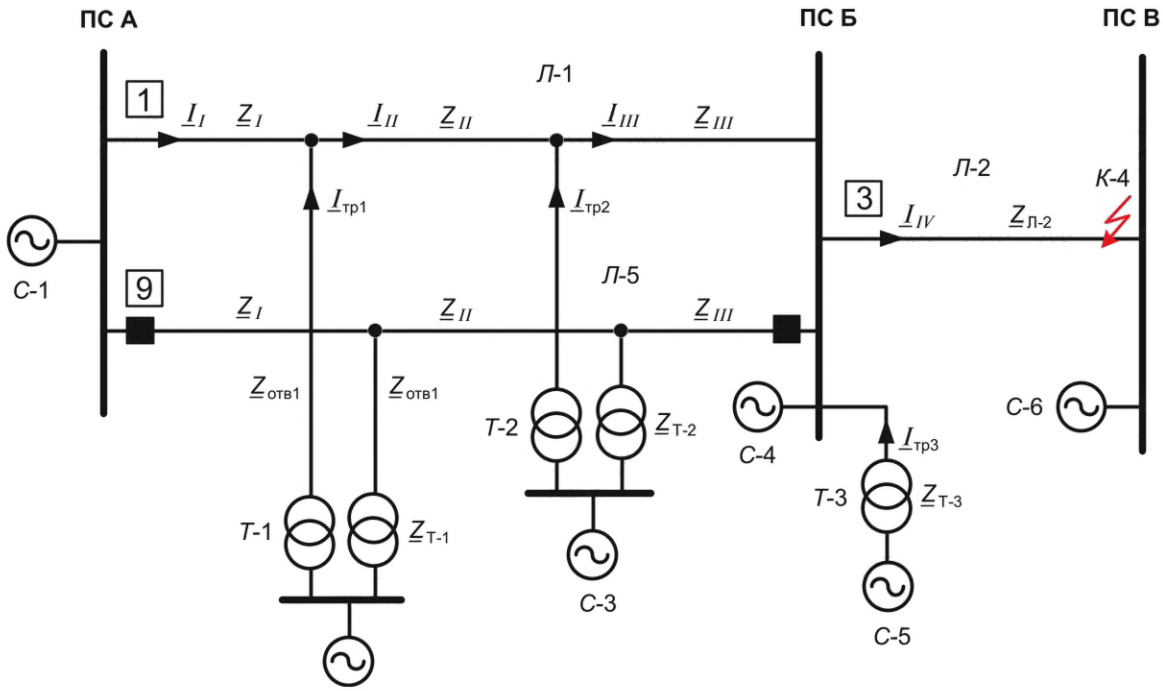
$$k_{т\ IV} = \frac{\underline{I}_{I}}{\underline{I}_{IV}}. \qquad (7.11)$$

Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а), в)) по согласованию с первой ступенью защиты 3 в режиме каскадного отключения КЗ со стороны ПС В необходимо проводить с учетом коэффициента возврата ДО второй ступени защиты 1 в соответствии с 5.3.3.3.

Согласование с первой ступенью защиты 3 (К-4, рисунок 7.6) для схемы «в» проводится при отключенной параллельной ЛЭП Л-5.



1)



2)

1) для схемы «а»; 2) для схемы «в»

Рисунок 7.6 — Определение коэффициентов токораспределения при КЗ в точке К-4

Если сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1, выбранное по согласованию с первой ступенью защиты 3, не удовлетворяет требованию обеспечения чувствительности (см. 7.3.3.1), согласование следует проводить со второй ступенью защиты 3.

7.3.3.4 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, в), г)) по согласованию с первой ступенью защиты 10 при каскадном отключении повреждения на параллельной ЛЭП Л-5 со стороны ПС А (позиция 2.2, таблица 7.1) проводится в соответствии с неравенством

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_I + \frac{\underline{Z}_{II}}{k_{т\ II}} + \frac{\underline{Z}_{III}}{k_{т\ III}} + \frac{1-\alpha}{k'_{т\ III}} \cdot Z^{I}_{уст10} \right| \cdot d, \qquad (7.12)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7;

α — коэффициент, учитывающий сокращение зоны ступени ДЗ, с которой проводится согласование, определяется согласно 4.2.1;

$Z^{I}_{уст10}$ — сопротивление срабатывания ДО первой ступени от междуфазных КЗ защиты 10;

$k_{т\ II}$, $k_{т\ III}$, $k'_{т\ III}$ — коэффициенты токораспределения;

d — определяется по формуле (7.9) в случае круговой характеристики.

Коэффициенты токораспределения при согласовании с первой ступенью защиты 10 (К-5, рисунок 7.7) определяются по формулам:

$$k_{т\ II} = \frac{\underline{I}}{\underline{I}_{II}}, \quad k_{т\ III} = \frac{\underline{I}_I}{\underline{I}_{III}}, \quad k'_{т\ III} = \frac{\underline{I}}{\underline{I}'_{III}}. \qquad (7.13)$$

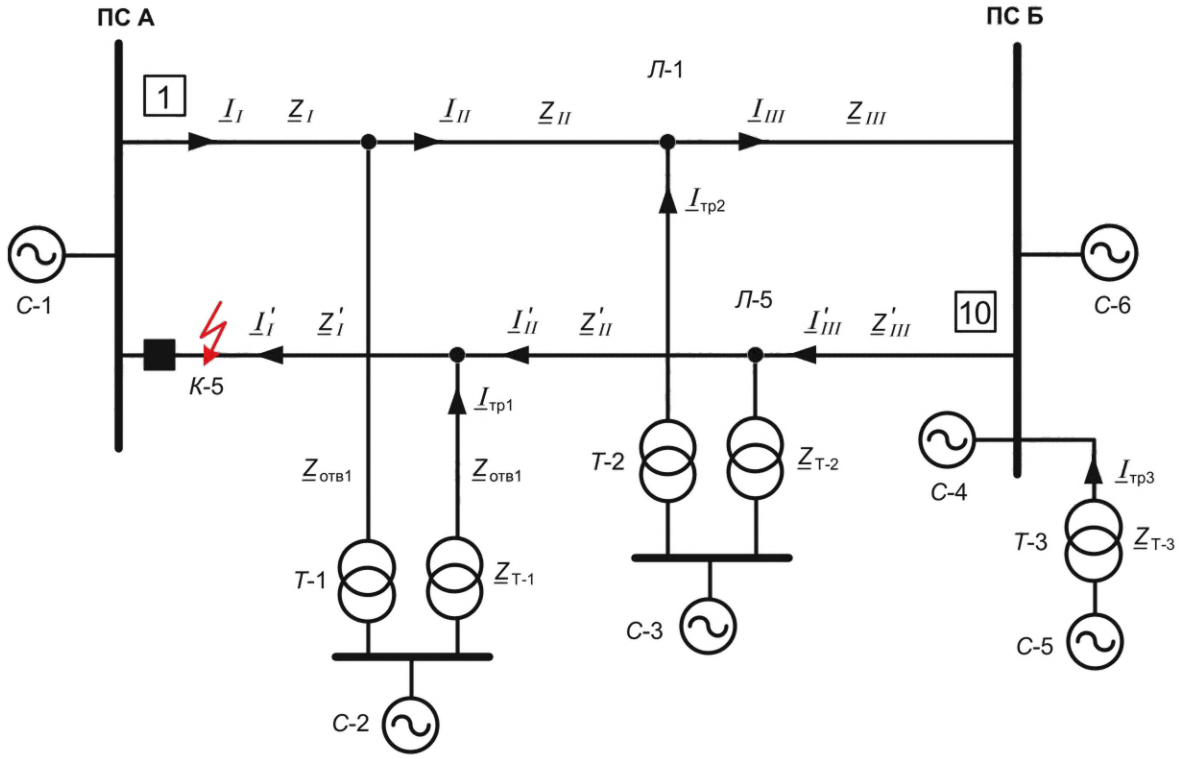


Рисунок 7.7 — Определение коэффициентов токораспределения для КЗ в точке К-5

Если сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1, выбранное по согласованию с первой ступенью защиты 10, не удовлетворяет требованию обеспечения чувствительности (см. 7.3.3.1), согласование следует проводить со второй ступенью защиты 10.

7.3.3.5 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схемы (рисунок 7.1, б), г)) по условию отстройки от междуфазных КЗ на шинах ПС В (позиция 2.3, таблица 7.1), проводится в соответствии с неравенством

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_I + \frac{\underline{Z}_{II}}{k_{т\ II}} + \frac{\underline{Z}_{III}}{k_{т\ III}} + \frac{\dfrac{\underline{Z}_{Л\text{-}2} \cdot \underline{Z}_{Л\text{-}3}}{\left(\underline{Z}_{Л\text{-}2} + \underline{Z}_{Л\text{-}3}\right)}}{k_{т\ IV}} \right| \cdot d, \qquad (7.14)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.6;

$\underline{Z}_{Л\text{-}2}$, $\underline{Z}_{Л\text{-}3}$ — сопротивления ЛЭП Л-2 и Л-3;

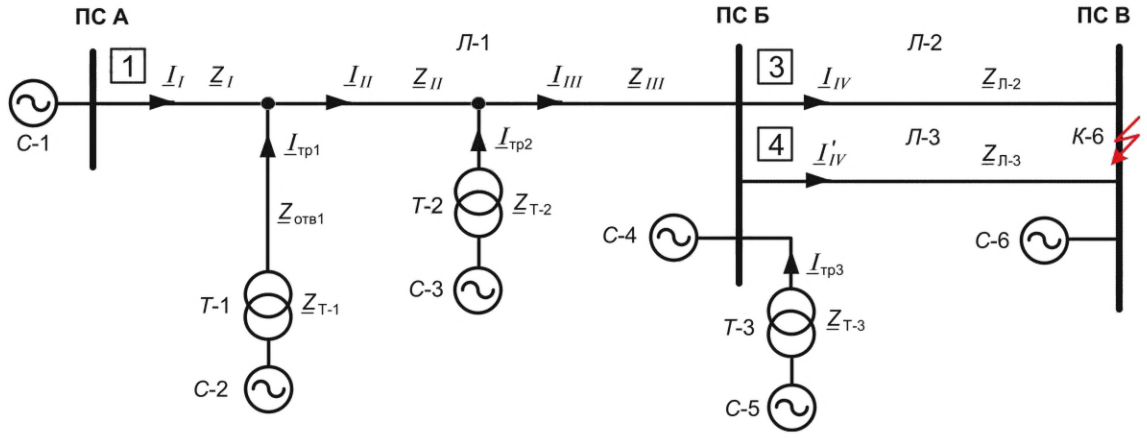
$k_{т\ II}$, $k_{т\ III}$, $k_{т\ IV}$ — коэффициенты токораспределения;

d — определяется по формуле (7.9) в случае круговой характеристики.

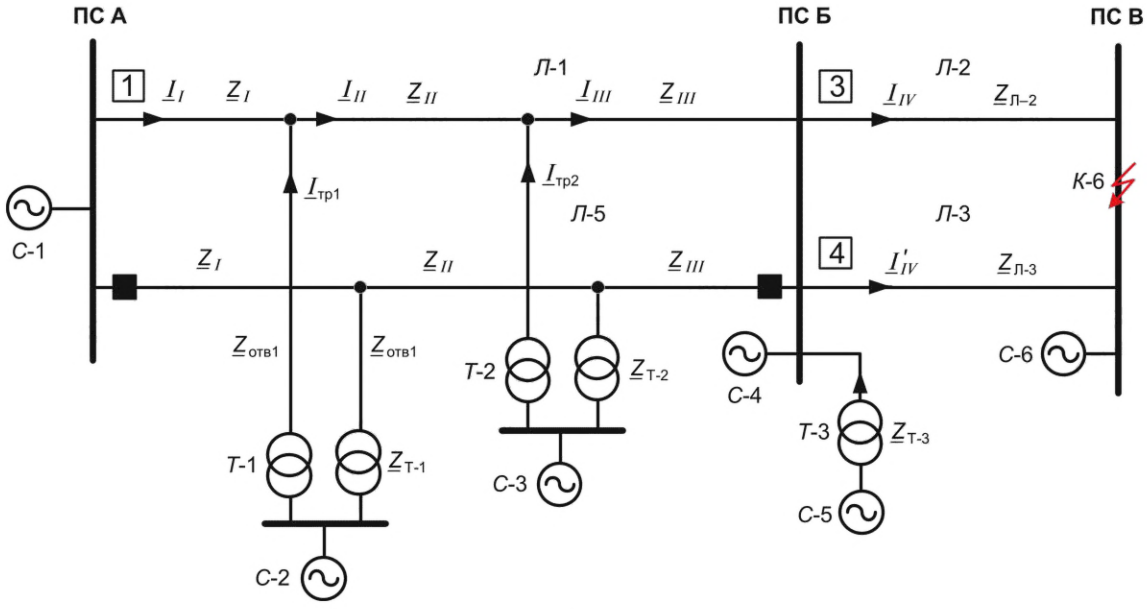
Коэффициенты токораспределения $k_{т\ II}$, $k_{т\ III}$ при отстройке от КЗ на шинах ПС В (К-6, рисунок 7.8) определяются по формуле (7.3).

Коэффициент токораспределения $k_{т\ IV}$ при отстройке от КЗ на шинах ПС В (К-6, рисунок 7.8) определяется при включенных параллельных ЛЭП Л-2, Л-3 по формуле

$$k_{т\ IV} = \frac{\underline{I}_I}{\underline{I}_{IV} + \underline{I}'_{IV}}. \qquad (7.15)$$



1)



2)

1) для схемы «б»; 2) для схемы «г»

Рисунок 7.8 — Определение коэффициентов токораспределения при КЗ в точке К-6

Отстройка от КЗ на шинах ПС В (К-6, рисунок 7.8) для схемы «г» проводится при отключенной параллельной ЛЭП Л-5 и включенных ЛЭП Л-2 и Л-3.

Если сопротивление срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1, выбранное по условию отстройки от КЗ на шинах ПС В, не удовлетворяет требованию обеспечения чувствительности (см. 7.3.3.1), в этом случае выбор сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 выполняется в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.3.5.

7.3.3.6 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схемы (рисунок 7.1, а) — г)) по условию отстройки от междуфазных КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б (позиция 2.4, таблица 7.1), проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_I + \frac{\underline{Z}_{II}}{k_{т\ II}} + \frac{\underline{Z}_{III}}{k_{т\ III}} + \frac{\underline{Z}_{Т\text{-}3}}{k_{т\ Т\text{-}3}} \right| \cdot d, \qquad (7.16)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.5;

$\underline{Z}_{Т\text{-}3}$ — эквивалентное сопротивление параллельно работающих Т (АТ) Т-3;

$k_{т\ II}$, $k_{т\ III}$, $k_{т\ Т\text{-}3}$ — коэффициенты токораспределения;

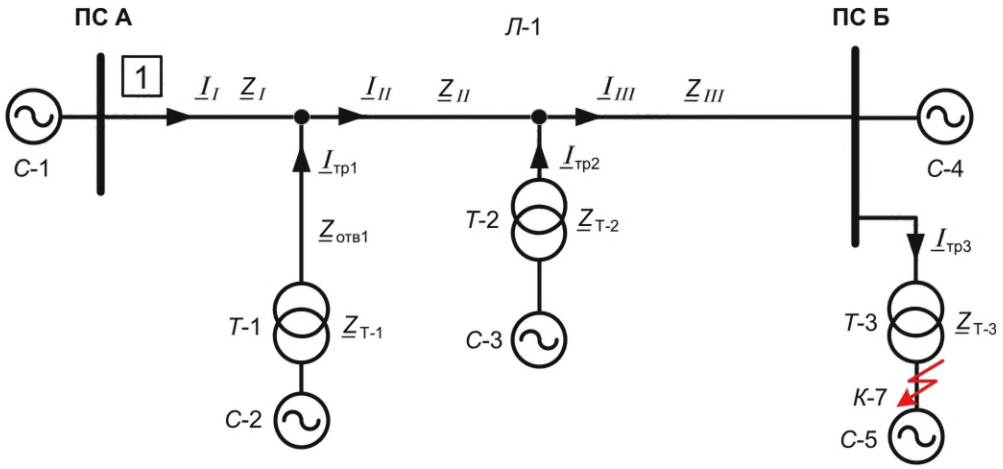
d — определяется по формуле (7.9) в случае круговой характеристики.

При наличии на Т (АТ) Т-3 регулирования напряжения под нагрузкой при расчете $Z^{II}_{уст1фф}$ следует учитывать минимальные возможные значения $\underline{Z}_{Т\text{-}3}$, рассчитанные при крайних положениях переключателей РПН.

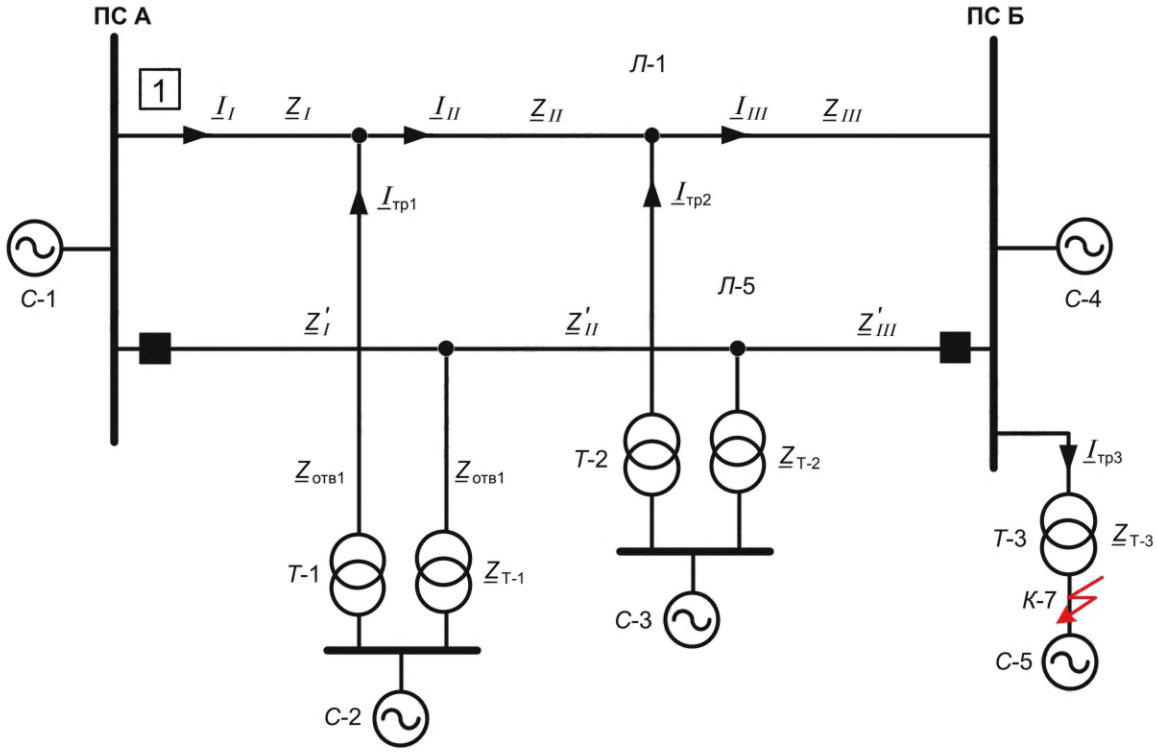
Коэффициенты токораспределения $k_{т\ II}$, $k_{т\ III}$ при отстройке от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б (К-7, рисунок 7.9) определяются по формуле (7.3).

Коэффициент токораспределения $k_{т\ Т\text{-}3}$ при отстройке от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б (К-7, рисунок 7.9) определяется по формуле

$$k_{т\ Т\text{-}3} = \frac{\underline{I}_I}{\underline{I}_{тр3}} \qquad (7.17)$$



1)



1) для схем «а» и «б»; 2) для схем «в» и «г»

Рисунок 7.9 — Определение коэффициентов токораспределения при КЗ в точке К-7

Отстройка от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б (К-7, рисунок 7.9) для схем «в», «г» проводится при отключенной ЛЭП Л-5.

Если сопротивление срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1, выбранное по условию отстройки, не удовлетворяет требованию обеспечения чувствительности (см. 7.3.3.1), в этом случае расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 выполняется по согласованию с резервными защитами Т (АТ) ПС Б от междуфазных КЗ в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.3.7.

7.3.3.7 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах НН (СН) ПС на ответвлениях ЛЭП Л-1 (позиция 2.5, таблица 7.1) проводится в соответствии с расчетом сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}$ первой ступени защиты 1, указания по расчету приведены в 7.3.2.3.

Если сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1, выбранное по условию отстройки от КЗ на шинах НН (СН) ПС на ответвлениях, не удовлетворяет требованию обеспечения чувствительности (см. 7.3.3.1), в этом случае расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 выполняется по согласованию с резервными защитами от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС на ответвлениях. Указания по расчету соответствуют указаниям по расчету сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ одиночной ЛЭП, приведенным в 5.3.3.7.

7.3.3.8 Расчет выдержки времени второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а) — г)) проводится по неравенству (5.19) в соответствии с 5.3.3.8.

В целях предотвращения подачи напряжения на поврежденный Т (АТ) устройством АПВ ЛЭП допускается ступень селективности принять равной ΔT = 0,12 с аналогично рекомендациям по замедлению действия первой ступени ДЗ на отключение, приведенным в 7.2.1.7.

7.3.3.9 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 по условию отстройки от БТН Т (АТ) ПС ответвлений (позиция 2.6, таблица 7.1) проводится при использовании АУ данной ступени. Указания по расчету параметров настройки автоматически ускоряемой ступени ДЗ приведены в 11.2 и приложении Ж.

7.3.4 Расчет и выбор параметров настройки третьей ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Основные требования, предъявляемые к третьей ступени ДЗ, — обеспечение резервирования устройств РЗ своей ЛЭП и защит или выключателей смежных элементов (дальнее резервирование), а также обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие третьей ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

В соответствии с пунктом 25 требований [2] при невозможности одновременного выполнения требований по обеспечению чувствительности и селективности параметров настройки ступени ДЗ ЛЭП, выполняющей функции дальнего резервирования, приоритет должен быть отдан требованию обеспечения чувствительности.

7.3.4.1 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности к междуфазным КЗ на каждом конце защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования (позиция 3.1, таблица 7.1) проводится по неравенству (5.21) с учетом указаний по расчету сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ одиночной ЛЭП, приведенных в 5.3.4.1.

Если чувствительность третьей ступени к междуфазным КЗ в зоне дальнего резервирования невозможно обеспечить по другим расчетным условиям или по техническим данным защиты, то допускается:

- не резервировать КЗ на стороне смежного напряжения Т (АТ) ПС Б и ПС на ответвлениях;
- не резервировать КЗ на смежных ЛЭП 110 кВ и выше при наличии УРОВ и при условии обеспечения ближнего резервирования на смежных ЛЭП;
- обеспечивать дальнее резервирование без учета редких ремонтных схем и при каскадном действии защит смежных присоединений;
- предусматривать возможность неселективного действия третьей ступени ДЗ при КЗ на смежных элементах, исправляемого действием АПВ и АВР;
- не согласовывать по чувствительности ступени ДЗ, предназначенные для дальнего резервирования, если неотключение КЗ вследствие недостаточной чувствительности защиты последующего элемента может привести к тяжелым последствиям.

7.3.4.2 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а) — г)) по условию согласования со второй (третьей) ступенью защит 3(4) смежных ЛЭП (позиция 3.2, 3.3, таблица 7.1) проводится аналогично расчету при согласовании второй ступени защиты 1 с первой (второй) ступенью защиты 3(4) с учетом 7.3.3.3.

Общие указания по расчету и выбору сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ для ЛЭП с ответвлениями по условию согласования с ДЗ смежных ЛЭП соответствуют 5.3.4.2.

7.3.4.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, в), г)) по условию согласования со второй (третьей) ступенью защиты 10 при каскадном отключении параллельной ЛЭП со стороны ПС А (позиция 3.4, таблица 7.1) проводится аналогично расчету при согласовании второй ступени защиты 1 с первой ступенью защиты 10 с учетом указаний, приведенных в 7.3.3.4.

7.3.4.4 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 по согласованию с дистанционной или резервной токовой защитой от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС Б (позиция 3.5, таблица 7.1) проводится в случае, если рассчитанное по предыдущим условиям сопротивление срабатывания третьей ступени защиты 1 не отстроено от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б.

Указания по согласованию ДЗ ЛЭП при наличии ответвлений с резервными защитами от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС Б соответствуют 5.3.3.7.

Если согласование с резервными защитами Т (АТ) ПС Б приводит к ограничению чувствительности или значительному увеличению времени действия третьей ступени защиты 1, расчет сопротивления срабатывания проводится по согласованию с резервными защитами от междуфазных КЗ присоединений стороны смежного напряжения ПС Б.

7.3.4.5 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 по согласованию с дистанционной или резервной токовой защитой от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС на ответвлениях (позиция 3.6, таблица 7.1) проводится в случае, если рассчитанное по предыдущим условиям сопротивление срабатывания третьей ступени защиты 1 не отстроено от КЗ на шинах НН (СН) ПС на ответвлениях.

Указания по согласованию ДЗ ЛЭП при наличии ответвлений с резервными защитами от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС на ответвлениях соответствуют 5.3.3.7.

Если согласование с резервными защитами Т (АТ) ПС на ответвлениях приводит к ограничению чувствительности или значительному увеличению времени действия третьей ступени защиты 1, выбор сопротивления срабатывания проводится по согласованию с резервными защитами от междуфазных КЗ присоединений стороны НН (СН) ПС на ответвлениях.

7.3.4.6 Расчет выдержки времени третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а) — г)) проводится в соответствии с указаниями по расчету ДЗ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.4.5.

7.3.4.7 Расчет сопротивления срабатывания третьей ступени защиты 1 по условию отстройки от БТН Т (АТ) ПС ответвлений (позиция 3.8, таблица 7.1) проводится только при использовании АУ данной ступени защиты. Указания по расчету параметров настройки автоматически ускоряемых ступеней ДЗ приведены в 11.2 и приложении Ж.

7.3.4.8 Расчет параметров настройки круговых характеристик защиты 1 по отстройке от нагрузочных режимов работы энергосистем (позиция 3.7, таблица 7.1) проводится в соответствии с указаниями 4.3.

Если для отстройки от нагрузочных режимов выполняется смещение характеристики третьей ступени в первый квадрант комплексной плоскости, необходимо выполнить проверку надежного зацепления характеристик второй и третьей ступеней ДЗ в соответствии с 4.2.5.1.

7.4 Расчет параметров настройки ДЗ с полигональными характеристиками

7.4.1 Перечень параметров настройки ДЗ с полигональными характеристиками срабатывания, которые требуется определить в процессе расчета, приведен в таблице 7.3.

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания первой ступени ДЗ с полигональной характеристикой приводятся с учетом того, что ступень может иметь общую уставку полного (реактивного) сопротивления срабатывания от всех видов КЗ $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$ или может иметь независимое регулирование уставки полного (реактивного) сопротивления срабатывания ДО от междуфазных КЗ $Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$ и ДО от КЗ на землю $Z^{I}_{уст1фз}(X^{I}_{уст1фз})$.

Параметры настройки $R^{I}_{уст1фф}$ и $R^{I}_{уст1фз}$, определяющие положение боковых сторон полигональной характеристики, как правило, имеют независимое регулирование для ДО от междуфазных КЗ и ДО от КЗ на землю.

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания вторых и третьих ступеней ДЗ с полигональными характеристиками приводятся для ДО от междуфазных КЗ.

Таблица 7.3 — Перечень параметров ДЗ с полигональными характеристиками

Ступень защиты	Обозначение параметра	Наименование параметра
Первая ступень	$Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$	Общее полное (реактивное) сопротивление срабатывания ДО первой ступени от всех видов КЗ
	$Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$	Полное (реактивное) сопротивление ДО первой ступени от междуфазных КЗ
	$Z^{I}_{уст1фз}(X^{I}_{уст1фз})$	Полное (реактивное) сопротивление срабатывания ДО первой ступени от КЗ на землю
	$R^{I}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО первой ступени от междуфазных КЗ
	$R^{I}_{уст1фз}$	Активное сопротивление ДО первой ступени от КЗ на землю
Вторая ступень	$Z^{II}_{уст1фф}\left(X^{II}_{уст1фф}\right)$	Полное (реактивное) сопротивление ДО второй ступени от междуфазных КЗ
	$R^{II}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО второй ступени от междуфазных КЗ

Окончание таблицы 7.3

Ступень защиты	Обозначение параметра	Наименование параметра
Третья ступень	$Z^{III}_{уст1фф}\left(X^{III}_{уст1фф}\right)$	Сопротивление срабатывания ДО третьей ступени от междуфазных КЗ
	$R^{III}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО третьей ступени от междуфазных КЗ

7.4.2 Расчет и выбор параметров настройки первой ступени ДЗ от всех видов КЗ

Основное требование, предъявляемое к первой ступени ДЗ, — обеспечение селективного отключения всех видов КЗ на защищаемой ЛЭП.

7.4.2.1 Первая ступень защиты 1 ЛЭП Л-1 для типовых конфигураций электрической сети (рисунок 7.1, а) — г)) выполняется без выдержки времени с учетом рекомендаций по замедлению действия первой ступени ДЗ на отключение, приведенных в 7.2.1.7.

7.4.2.2 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$ первой ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах ПС Б (позиция 1.1, таблица 7.1) проводится по неравенствам (5.23), (5.24), (7.1), (7.2) в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.4.2.2, и указаниями 7.2.1.1, 7.2.1.2.

Дополнительно при расчете сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фз}$ ДО от КЗ на землю необходимо учитывать 7.2.1.4 и приложение Б.

7.4.2.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1}(X^{I}_{уст1})$ первой ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах НН (СН) Т ПС на ответвлениях ЛЭП Л-1 (позиция 1.2, таблица 7.1) проводится по неравенствам (5.23), (5.24) в соответствии с указаниями 7.2.1.1, 7.2.1.2, 7.2.1.3, 7.2.1.6.

Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фз}(X^{I}_{уст1фз})$ ДО от КЗ на землю по данному расчетному условию не проводится, если обмотка силового Т ПС на ответвлении на стороне НН собрана в Δ или Y без заземленной нейтрали.

Расчет сопротивления срабатывания ДО от междуфазных КЗ $Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$ по условию отстройки от КЗ на шинах НН Т ПС на ответвлениях проводится при трехфазных и двухфазных КЗ, при двухфазных КЗ необходимо учитывать влияние схемы соединения обмоток силовых Т Y/Δ на замеры ДО.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ и при междуфазных КЗ через расчетные переходные сопротивления в нормальной и ремонтных схемах сети при нулевом перетоке мощности по защищаемой ЛЭП, а также с учетом доаварийных перетоков мощности, характерных для рассматриваемых схем сети.

Для ЛЭП без учета емкостной проводимости расчетные сопротивления $\underline{Z}_D$ при трехфазных КЗ на шинах НН (СН) Т (АТ) ПС на ответвлениях определяются по формулам (7.4) и (7.5) с учетом коэффициентов токораспределения, определяемых по формулам (7.6) и (7.7).

Выбор параметров настройки ступени ДЗ с полигональной характеристикой по условию отстройки от КЗ на шинах НН (СН) Т (АТ) ПС на ответвлениях рекомендуется проводить графическим способом.

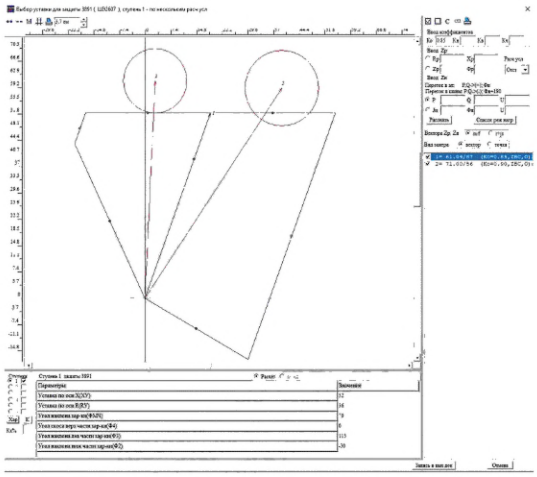


Рисунок 7.10 — Графический выбор параметров настройки ступени ДЗ по условию отстройки от КЗ на стороне НН Т

На рисунке 7.10 приведен пример отстройки характеристики ДЗ от замеров при трехфазном КЗ (замер 1) и при двухфазном КЗ (замер 2) на шинах НН Т со схемой соединения обмоток Y/Δ-11 при нулевом перетоке мощности по защищаемой ЛЭП. Для отстройки от замера при двухфазном КЗ (замер 2) требуется уменьшение сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$ или применение угла наклона (скоса) $\varphi_{ск}$ верхней грани характеристики срабатывания. Указания по выбору угла $\varphi_{ск}$ приведены в 5.4.2.4.

7.4.2.4 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$ первой ступени защиты 1 по условию обеспечения перекрытия зон первых ступеней ДЗ с двух сторон защищаемой ЛЭП (позиция 1.3, таблица 7.1) проводится по неравенствам (5.25) и (5.26) в соответствии с 5.4.2.3.

7.4.2.5 Если сопротивление срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$ первой ступени защиты 1 по условию отстройки при внешних КЗ через расчетные переходные сопротивления не удовлетворяет условию 7.4.2.4, необходимо обеспечить требуемый охват ЛЭП при металлических КЗ, а для отстройки от внешних КЗ через переходные сопротивления применить угол наклона (скоса) $\varphi_{ск}$ верхней грани характеристики (при наличии параметра).

7.4.2.6 Если согласно техническим данным защиты 1 угол наклона (скоса) верхней грани характеристики отсутствует или полученное значение угла $\varphi_{ск}$ превышает диапазон регулирования данного параметра, необходимо для расчетных режимов, где не выполняется условие 7.4.2.2 или получены неудовлетворительные результаты по 7.4.2.5, выполнить отстройку характеристики срабатывания первой ступени защиты 1 при КЗ через переходное сопротивление на шинах ПС Б уставкой активного сопротивления $R^{I}_{уст1}$ по неравенству (5.27) в соответствии с 5.4.2.5.

7.4.2.7 Расчет активного сопротивления срабатывания $R^{I}_{уст1}$ первой ступени защиты 1 по условию обеспечения чувствительности к КЗ через переходное сопротивление (позиция 1.4, таблица 7.1) проводится по неравенству (5.28) в соответствии с 5.4.2.6, 5.4.2.7.

7.4.2.8 Выбор угла φ_{IV} ограничения полигональной характеристики срабатывания в четвертом квадранте комплексной плоскости первой ступени защиты 1 выполняется в соответствии с 5.4.2.8.

7.4.3 Расчет и выбор параметров настройки второй ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Требования, предъявляемые ко второй ступени ДЗ, — обеспечение надежного отключения междуфазных КЗ по всей длине и на каждом конце защищаемой ЛЭП и обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие второй ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

7.4.3.1 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}\left(X^{II}_{уст1фф}\right)$ второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности при междуфазных КЗ на каждом конце ЛЭП Л-1, противоположном месту установки защиты 1 (позиция 2.1, таблица 7.1), проводится по неравенствам (5.30) и (5.31) в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}\left(X^{II}_{уст1фф}\right)$ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.4.3.1.

Если на защищаемой ЛЭП с ответвлениями значительной длины не удается одновременно обеспечить чувствительность второй ступени ДЗ к повреждениям в конце длинного ответвления и селективность с защитами смежных сетевых элементов, в этом случае чувствительность второй ступени ДЗ при КЗ в конце длинного ответвления допускается обеспечивать в соответствии с 7.3.3.1.

7.4.3.2 Расчет активного сопротивления срабатывания $R^{II}_{уст1}$ второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности при междуфазных КЗ через переходное сопротивление на каждом конце ЛЭП Л-1, противоположном месту установки защиты 1 (позиция 2.1, таблица 7.1) проводится по неравенству (5.32) в соответствии с 5.4.3.2.

7.4.3.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 по условию согласования с резервными защитами смежных присоединений от междуфазных КЗ проводится поиском конца зоны действия ступени защиты, с которой проводится согласование, и отстройкой от расчетного замера по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left|\underline{Z}_{р}\right| \cdot d, \qquad (7.18)$$

где $|\underline{Z}_{р}|$ — модуль расчетного сопротивления;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7, 4.2.2.8 и/или 4.2.4.1, 4.2.4.2;

d — параметр, который при согласовании защит учитывает возможное различие угла наклона $\varphi_{хар}$ полигональной характеристики второй ступени защиты 1 и угла расчетного сопротивления $\underline{Z}_{р}$:

$$d = \frac{\sin\varphi_{р}}{\sin\varphi_{хар}}. \quad (7.19)$$

При согласовании ДЗ смежных сетевых элементов с разнотипными характеристиками срабатывания необходимо учитывать 4.2.2.9.

7.4.3.4 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ и выдержек времени второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а) — г)) по условиям обеспечения селективности при междуфазных КЗ на смежных участках сети проводится по всем расчетным условиям (позиции 2.2—2.5, таблица 7.1) и выполняется аналогично расчету параметров настройки второй ступени защиты 1 с круговой характеристикой согласно 7.3.3.2—7.3.3.8, при этом в выражениях для расчета сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ параметр d следует определять по формуле (7.19).

Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}\left(X^{II}_{уст1фф}\right)$ ДО от междуфазных КЗ по условию отстройки от КЗ на шинах НН Т (АТ) ПС на ответвлениях проводится при трехфазных и двухфазных КЗ, при двухфазных КЗ необходимо учитывать влияние схемы соединения обмоток силовых Т Y/Δ на дистанционные замеры.

7.4.3.5 Расчет реактивного сопротивления срабатывания $X^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 проводится на основании принятого значения уставки полного сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ по формуле (5.35).

7.4.3.6 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 по условию отстройки от БТН Т (АТ) ПС ответвлений (позиция 2.6, таблица 7.1) проводится только при использовании АУ данной ступени защиты. Указания по расчету параметров настройки автоматически ускоряемых ступеней ДЗ приведены в 11.2 и приложении Ж.

7.4.4 Расчет и выбор параметров настройки третьей ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Основные требования, предъявляемые к третьей ступени ДЗ, — обеспечение резервирования действия защит своей ЛЭП и защит или выключателей смежных элементов при междуфазных КЗ (дальнее резервирование), а также обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие третьей ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

В соответствии с пунктом 25 требований [2] при невозможности одновременного выполнения требований по обеспечению чувствительности и селективности параметров настройки ступени ДЗ ЛЭП, выполняющей функции дальнего резервирования, приоритет должен быть отдан требованию обеспечения чувствительности.

7.4.4.1 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}\left(X^{III}_{уст1фф}\right)$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности к металлическим междуфазным КЗ на каждом конце защищаемой ЛЭП Л-1 и в зоне дальнего резервирования (позиция 3.1, таблица 7.1) проводится по неравенствам (5.36) и (5.37).

Если обеспечение чувствительности третьей ступени защиты 1 к междуфазным КЗ через переходные сопротивления в зоне дальнего резервирования невозможно обеспечить по другим расчетным условиям или по техническим данным защиты, чувствительность обеспечивается в соответствии с 7.3.4.1.

7.4.4.2 Расчет активного сопротивления срабатывания $R^{III}_{уст1}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а) — г)) по условию обеспечения чувствительности при междуфазных КЗ через переходное сопротивление на каждом конце защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования (позиция 3.1, таблица 7.1) проводится по неравенству (5.38).

7.4.4.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ и выдержки времени третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 7.1, а) — г)) по условиям обеспечения селективности при междуфазных КЗ на смежных участках сети проводится по всем расчетным условиям (позиции 3.2—3.6, таблица 7.1) и выполняется аналогично расчету параметров настройки третьей ступени защиты 1 с круговой характеристикой согласно 7.3.4.2—7.3.4.6. В выражениях для расчета сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ параметр d следует определять по формуле (7.19).

7.4.4.4 Расчет реактивного сопротивления срабатывания $X^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 проводится на основании принятого значения уставки полного сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ по формуле (5.39).

7.4.4.5 Расчет параметров настройки полигональных характеристик защиты 1 по отстройке от нагрузочных режимов работы энергосистем (позиция 3.7, таблица 7.1) проводится в соответствии с 4.3.

7.4.4.6 Расчет сопротивления срабатывания третьей ступени защиты 1 по условию отстройки от БТН Т (АТ) ПС ответвлений (позиция 3.8, таблица 7.1) проводится только при использовании АУ данной ступени защиты. Указания по расчету параметров настройки автоматически ускоряемой ступени ДЗ приведены в 11.2 и приложении Ж.

8 Расчет и выбор параметров настройки дистанционной защиты линии электропередачи, работающей по схеме блока трансформатор (автотрансформатор) — линия

8.1 Типовые схемы участков сети

Указания по расчету и выбору параметров настройки трехступенчатой ДЗ ЛЭП напряжением 110 кВ и выше, работающей по схеме блока Т (АТ) — линия при подключении защиты к ТН, установленным на стороне НН (СН) Т (АТ) блока, приводятся для типовых схем смежной электрической сети (рисунок 8.1).

При использовании ТН на стороне ВН Т (АТ) блока необходимо при выборе параметров настройки ступеней ДЗ, направленных в сторону ЛЭП, руководствоваться указаниями раздела 5.

Типовые схемы электрической сети при наличии на смежных участках ЛЭП с проходными ПС или ЛЭП с односторонним питанием в настоящем разделе не рассматриваются. Указания по расчету и выбору параметров настройки ДЗ ЛЭП с учетом данных схем приведены в разделах 5, 6 и аналогичны для ЛЭП, работающей по схеме блока.

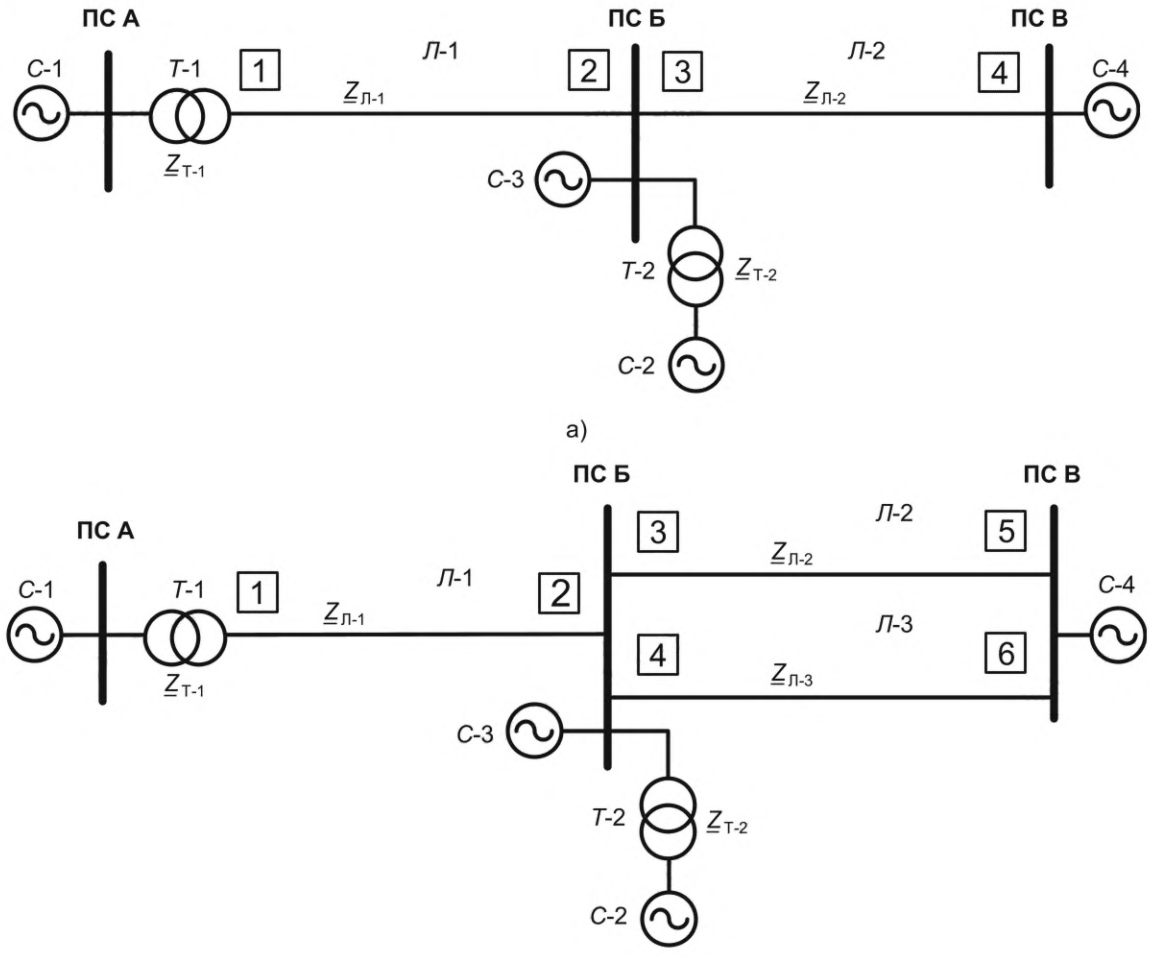


Рисунок 8.1 — Примеры типовых схем участков сети с ЛЭП, работающей по схеме блока Т (АТ) — линия

Приведенные на рисунке 8.1 примеры типовых конфигураций электрической сети применимы также для ЛЭП, отходящих от шин электрических станций.

8.2 Общие указания по расчету и перечень расчетных условий

8.2.1 Общие указания по расчету ДЗ блока Т (АТ) — линия

Расчет параметров настройки ДЗ ЛЭП, работающей по схеме блока Т (АТ) — линия имеет ряд особенностей, которые связаны с тем, что при блочной схеме ПС ТН на стороне ВН Т (АТ) могут не устанавливаться.

В схеме блока с двухобмоточным Т с группой соединения обмоток Y/Δ- 11 ДЗ по цепям переменного напряжения подключается к ТН на стороне НН Т блока, при этом с целью обеспечения корректного замера при КЗ на ЛЭП в защите используются фазные напряжения относительно нулевой точки, которые соответствуют междуфазным напряжениям стороны ВН. По цепям переменного тока, как правило, ДЗ включается на разность фазных токов ТТ, установленных на стороне ВН Т блока.

В схеме блока с трехобмоточным Т (АТ) с группой соединения обмоток Y/Y/Δ-11 при подключении ДЗ к ТН на стороне НН Т (АТ) в защите также используются фазные напряжения относительно нулевой точки, при подключении ДЗ к ТН на стороне СН используются междуфазные напряжения. По цепям переменного тока, как правило, ДЗ включается на разность фазных токов ТТ, установленных на стороне ВН Т (АТ) блока.

При таком подключении по цепям переменного тока и напряжения ДЗ действует только при междуфазных КЗ на ЛЭП и в прилегающей сети ВН, в замер ДО входит сопротивление двухобмоточного Т или эквивалентное сопротивление трехобмоточного Т (АТ) блока.

В случае трехобмоточного Т (АТ) дистанционный замер зависит от того, на какой стороне установлен ТН, и от наличия тока подпитки с той стороны, где ТН не установлен.

При подключении ДЗ к ТН на стороне НН и ТТ на стороне ВН трехобмоточного Т (АТ) напряжение в месте установки ТН при металлическом междуфазном КЗ в конце защищаемой ЛЭП (К-1, рисунок 8.2) определяется по формуле

$$\underline{U}_{р} = \underline{I}_{I} \cdot \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \underline{I}_{I} \cdot \underline{Z}_{I} + (\underline{I}_{I} - \underline{I}_{II}) \cdot \underline{Z}_{III}, \quad (8.1)$$

где $\underline{Z}_{Л\text{-}1}$ — сопротивление прямой последовательности ЛЭП;

$\underline{Z}_{I}$, $\underline{Z}_{III}$ — сопротивления прямой последовательности сторон ВН и НН трехобмоточного Т (АТ), приведенные к напряжению стороны ВН (стороны защищаемой ЛЭП).

Дистанционный замер определяется по формуле

$$\underline{Z}_{р} = \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \underline{Z}_{I} + \left(1 - \frac{\underline{I}_{II}}{\underline{I}_{I}}\right) \cdot \underline{Z}_{III}. \quad (8.2)$$

При отсутствии подпитки со стороны СН дистанционный замер будет равен суммарному сопротивлению от места установки ТН до места повреждения:

$$\underline{Z}_{р} = \underline{Z}_{Л\text{-}1} + (\underline{Z}_{I} + \underline{Z}_{III}) = \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \underline{Z}_{Т\text{-}1}. \quad (8.3)$$

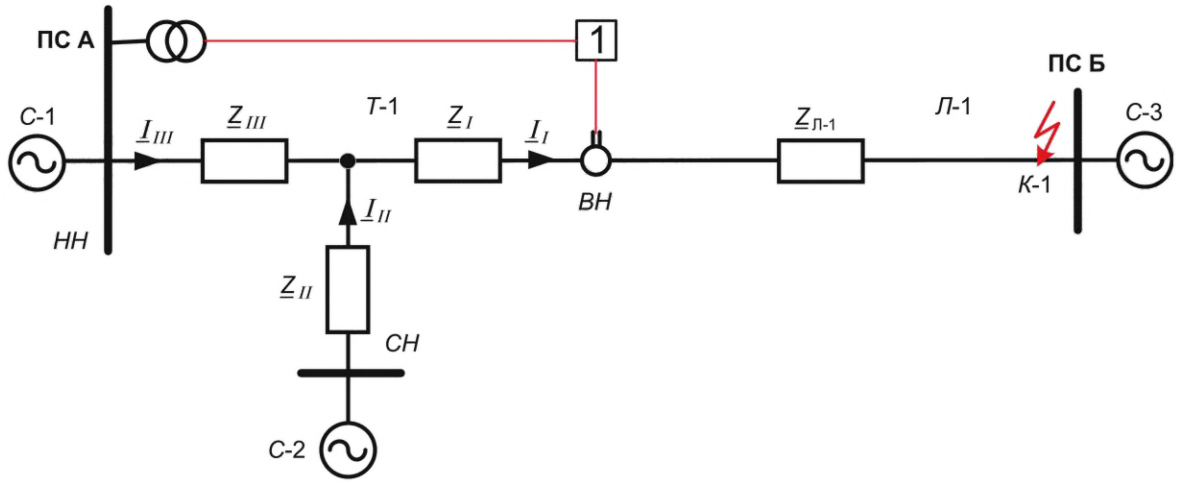


Рисунок 8.2 — Вариант схемы подключения ДЗ блока трехобмоточный Т (АТ) — линия к ТТ и ТН

При подключении ДЗ к ТН на стороне СН и ТТ на стороне ВН трехобмоточного Т (АТ) дистанционный замер при КЗ в конце ЛЭП определяется по формуле

$$\underline{Z}_{р} = \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \underline{Z}_{I} + \left(1 - \frac{\underline{I}_{III}}{\underline{I}_{I}}\right) \cdot \underline{Z}_{II}. \quad (8.4)$$

При отсутствии подпитки со стороны НН дистанционный замер будет равен суммарному сопротивлению от места установки ТН до места повреждения:

$$\underline{Z}_{р} = \underline{Z}_{Л\text{-}1} + (\underline{Z}_{I} + \underline{Z}_{II}) = \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \underline{Z}_{Т\text{-}1}. \quad (8.5)$$

Далее расчетные выражения для выбора сопротивления срабатывания ДЗ по условиям согласования или отстройки с использованием сопротивления двухобмоточного Т или эквивалентного сопротивления трехобмоточного Т (АТ) блока приведены для случаев:

- включения ДЗ на ТН, установленные на стороне НН Т блока двухобмоточный Т — линия или трехобмоточный Т — линия (в случае отсутствия питания со стороны СН или равенства нулю сопротивления обмотки НН);
- включения ДЗ на ТН, установленные на стороне СН Т блока трехобмоточный Т (АТ) — линия (в случае отсутствия питания со стороны НН или равенства нулю сопротивления обмотки СН).

Расчетные выражения с использованием сопротивления $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ корректны также при наличии питания со стороны НН (СН) трехобмоточного Т (АТ) блока и неравенстве нулю сопротивления обмотки Т, со стороны которой установлен ТН. При этом защита выполняется с компенсацией падения напряжения в сопротивлении обмотки Т, на стороне которой установлен ТН. В этом случае $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ соответствует сопротивлению обмотки ВН трехобмоточного Т (АТ) блока.

Включение сопротивления Т (АТ) в зону ДЗ блока приводит к сокращению длины ЛЭП, охватываемой первой ступенью защиты, и снижению чувствительности второй и третьей ступеней по сравнению со случаем установки отдельной ДЗ ЛЭП.

На значение сопротивления, измеряемого ДО защиты, оказывают влияние следующие факторы:

- полное сопротивление Т (АТ);
- угол полного сопротивления Т (АТ);
- наличие встроенного регулирования напряжения под нагрузкой.

В зависимости от соотношений сопротивлений защищаемой ЛЭП и Т (АТ) угол суммарного сопротивления блока может быть близок к 75°—85°. Рекомендуется для ДЗ блока угол максимальной чувствительности $\varphi_{мч}$ круговой характеристики или угол наклона $\varphi_{хар}$ полигональной характеристики принимать близким к значению угла суммарного сопротивления блока.

При наличии регулирования напряжения под нагрузкой сопротивление Т (АТ) блока рассчитывается с учетом положений РПН. Указания по расчету реактивных сопротивлений Т (АТ) при наличии РПН приведены в приложении Г.

При выборе сопротивления срабатывания ДЗ по условию отстройки (селективности) следует принять минимальные значения сопротивлений Т (АТ), по условию обеспечения чувствительности следует принять максимальные значения сопротивлений Т (АТ), рассчитанные при крайних положениях РПН. Если при этом невозможно одновременно выполнить условия селективности и чувствительности, расчет сопротивления срабатывания выполняют с учетом значений $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ блока, рассчитанных при возможных фактических положениях РПН.

ЛЭП, работающие по схеме блока Т (АТ) — линия, опробуются напряжением, как правило, со стороны линии. Если предусматривается опробование ЛЭП со стороны Т (АТ), при использовании АУ ступени ДЗ сопротивление срабатывания данной ступени отстраивается от БТН Т (АТ) блока. Указания по расчету приведены в 11.2 и приложении Ж.

При расчете вторичного сопротивления срабатывания $Z_{с.р}$ требуется учитывать схему соединения вторичных обмоток ТТ.

При подключении ДЗ к ТТ и ТН, установленным на стороне НН Т (АТ) блока:

$$Z_{с.р} = \frac{n_{Т}^{(Н)}}{3 \cdot n_{Н}^{(Н)} \cdot n_{ТР}^{2}} \cdot Z_{уст}. \quad (8.6)$$

При подключении ДЗ к ТН, установленным на стороне НН и ТТ на стороне ВН Т (АТ) блока:

$$Z_{с.р} = \frac{n_{Т}^{(В)}}{\sqrt{3} \cdot n_{Н}^{(Н)} \cdot n_{ТР}} \cdot Z_{уст}. \quad (8.7)$$

При подключении ДЗ к ТН, установленным на стороне СН и ТТ на стороне ВН Т (АТ) блока:

$$Z_{с.р} = \frac{n_{Т}^{(В)}}{n_{Н}^{(С)} \cdot n_{ТР}} \cdot Z_{уст}, \quad (8.8)$$

где $Z_{уст}$ — сопротивление срабатывания защиты, Ом первичных;

$n_{ТР}$ — коэффициент трансформации Т (АТ) блока между стороной ВН и стороной установки ТН, рекомендуется учитывать максимально возможный коэффициент трансформации с учетом возможного регулирования напряжения под нагрузкой;

$n_{Т}^{(Н)}$, $n_{Т}^{(В)}$ — коэффициенты трансформации ТТ, установленных, соответственно, на сторонах НН и ВН Т (АТ) блока;

$n_{Н}^{(Н)}$, $n_{Н}^{(С)}$ — коэффициенты трансформации ТН, установленных, соответственно, на сторонах НН и СН Т (АТ) блока.

Формулы (8.6)—(8.8) для расчета вторичного сопротивления срабатывания $Z_{с.р.}$ приведены при подключении защиты:

- на фазные напряжения относительно нулевой точки системы при подключении к ТН, установленным на стороне НН;
- на междуфазные напряжения при подключении к ТН, установленным на стороне СН;
- на разность фазных токов при подключении к ТТ, установленным на стороне НН Т (АТ) блока при соединении обмоток ТТ в треугольник;
- на разность фазных токов при подключении к ТТ, установленным на стороне ВН Т (АТ) блока при соединении обмоток ТТ в звезду.

8.2.2 Перечень расчетных условий для выбора параметров настройки ДЗ ЛЭП, работающей по схеме блока Т (АТ) — линия

В таблице 8.1 приведен перечень расчетных условий для выбора параметров настройки трехступенчатой ДЗ 1 ЛЭП Л-1 с круговыми и полигональными характеристиками срабатывания для типовых схем смежной электрической сети (рисунок 8.1, а), б)).

Таблица 8.1 — Расчетные условия для выбора параметров настройки ДЗ

№ условия	Ступень защиты	Схема (рисунок 8.1)	Расчетные условия
1.1	Первая ступень (ступень без выдержки времени)	а), б)	Отстройка от КЗ на шинах ПС Б, примыкающей к противоположному концу ЛЭП Л-1
1.2			Проверка зоны охвата линии при металлических КЗ
1.3			Обеспечение чувствительности при КЗ через переходное сопротивление в начале ЛЭП Л-1 и в конце зоны охвата первой ступени (для защит с полигональной характеристикой срабатывания)
2.1	Вторая ступень	а), б)	Обеспечение чувствительности при КЗ в конце ЛЭП Л-1
2.2		а)	Согласование с первой (второй) ступенью защиты 3
2.3		б)	Отстройка от КЗ на шинах ПС В
2.4		а), б)	Отстройка от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б
3.1	Третья ступень	а), б)	Обеспечение чувствительности при КЗ в конце ЛЭП Л-1 и в зоне дальнего резервирования
3.2		а), б)	Согласование со второй (третьей) ступенью защиты 3 (и защиты 4 для схемы «б»)

Окончание таблицы 8.1

№ условия	Ступень защиты	Схема (рисунок 8.1)	Расчетные условия
3.3	Третья ступень	а), б)	Согласование с дистанционной или резервной токовой защитой от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС Б
3.4		а), б)	Отстройка от нагрузочных режимов работы энергосистем
Примечание — В данной таблице под сокращением ПС следует понимать подстанции и/или электростанции.			

8.3 Расчет параметров настройки ДЗ с круговыми характеристиками

8.3.1 Перечень параметров настройки трехступенчатой ДЗ ЛЭП с круговыми характеристиками срабатывания, которые следует определить в процессе расчета, приведен в таблице 8.2.

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания первой, второй и третьей ступеней ДЗ приводятся для ДО от междуфазных КЗ.

Таблица 8.2 — Перечень параметров ДЗ с круговыми характеристиками

Ступень защиты	Обозначение параметра	Наименование параметра
Первая ступень	$Z^{I}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО первой ступени от междуфазных КЗ
Вторая ступень	$Z^{II}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО второй ступени от междуфазных КЗ
Третья ступень	$Z^{III}_{уст1фф}$	Сопротивление срабатывания ДО третьей ступени от междуфазных КЗ

8.3.2 Расчет и выбор параметров настройки первой ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Основное требование, предъявляемое к первой ступени ДЗ, — обеспечение селективного отключения междуфазных КЗ на защищаемой ЛЭП.

8.3.2.1 Первая ступень защиты 1 для типовых конфигураций электрической сети (рисунок 8.1, а), б)) выполняется без выдержки времени.

8.3.2.2 Расчет сопротивления срабатывания первой ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах ПС Б (позиция 1.1, таблица 8.1) проводится по неравенству

$$Z^{I}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \frac{\left|\underline{Z}_{р}\right|}{\cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_{р}\right)}, \qquad (8.9)$$

где $|\underline{Z}_{р}|$ и $\varphi_{р}$ — модуль и угол расчетного сопротивления;

$\varphi_{мч}$ — угол максимальной чувствительности круговой характеристики;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.3.

Для ЛЭП без учета емкостной проводимости расчетное сопротивление $\underline{Z}_{р}$ при металлических трехфазных КЗ на шинах ПС Б равно суммарному сопротивлению блока $\underline{Z}_{БЛ}$, которое определяется по формуле

$$\underline{Z}_{БЛ} = \underline{Z}_{Т\text{-}1} + \underline{Z}_{Л\text{-}1}, \qquad (8.10)$$

где $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ — сопротивление Т (АТ) блока, рассчитывается согласно 8.2.1;

$\underline{Z}_{Л\text{-}1}$ — сопротивление прямой последовательности ЛЭП Л-1.

При наличии на Т (АТ) блока регулирования напряжения под нагрузкой расчет следует проводить с учетом минимального значения сопротивления $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$, рассчитанного при крайнем или возможных фактических положениях РПН.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ и при междуфазных КЗ через расчетные переходные сопротивления на шинах ПС Б в нормальной и ремонтных схемах сети при нулевом доаварийном перетоке мощности по защищаемой ЛЭП, а также с учетом доаварийных перетоков мощности, характерных для рассматриваемых схем сети.

Указания по расчету переходных сопротивлений при всех видах КЗ, учету доаварийной нагрузки при расчетах аварийных режимов для выбора параметров настройки ДЗ приведены в приложениях Б, Д.

8.3.2.3 Расчет сопротивления срабатывания первой ступени защиты 1 по условию обеспечения перекрытия зон первых ступеней ДЗ с двух сторон защищаемой ЛЭП (позиция 1.2, таблица 8.1) проводится по неравенству

$$Z^{I}_{\text{уст1фф}} \geq k_{\text{охв}} \cdot |\underline{Z}_{\text{БЛ}}|, \tag{8.11}$$

где $|\underline{Z}_{\text{БЛ}}|$ — суммарное сопротивление блока;

$k_{\text{охв}}$ — коэффициент охвата, принимается из диапазона 0,65—0,75.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{\text{уст1фф}}$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ в конце защищаемой ЛЭП.

При наличии на Т (АТ) блока регулирования напряжения под нагрузкой необходимо учитывать максимальное значение сопротивления $\underline{Z}_{\text{Т-1}}$ блока, рассчитанное при крайнем или возможном фактическом положении РПН.

8.3.2.4 Если расчетное сопротивление срабатывания первой ступени по условию 8.3.2.2 при КЗ через переходные сопротивления не удовлетворяет условию 8.3.2.3, необходимо обеспечить требуемый охват ЛЭП при металлических КЗ, а для отстройки от внешних КЗ через переходные сопротивления использовать изменение вида круговой характеристики (эллипс, линза) или угла максимальной чувствительности при наличии технической возможности регулирования параметра.

8.3.3 Расчет и выбор параметров настройки второй ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Требования, предъявляемые ко второй ступени ДЗ, — обеспечение надежного отключения междуфазных КЗ по всей длине защищаемой ЛЭП и обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие второй ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

8.3.3.1 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по обеспечению чувствительности к КЗ в конце защищаемой ЛЭП (позиция 2.1, таблица 8.1) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{\text{уст1фф}} \geq k_{\text{чZ}} \cdot \frac{|\underline{Z}_{\text{р}}|}{\cos\left(\varphi_{\text{мч}} - \varphi_{\text{р}}\right)}, \tag{8.12}$$

где $|\underline{Z}_{\text{р}}|$ и $\varphi_{\text{р}}$ — модуль и угол расчетного сопротивления;

$\varphi_{\text{мч}}$ — угол максимальной чувствительности круговой характеристики;

$k_{\text{чZ}}$ — коэффициент чувствительности, принимается согласно 4.2.5.4.

При наличии на Т (АТ) блока регулирования напряжения под нагрузкой расчет следует проводить с учетом наибольшего значения $\underline{Z}_{\text{Т-1}}$ блока, рассчитанного при крайних или возможных фактических положениях РПН.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{II}_{\text{уст1фф}}$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ и междуфазных КЗ через расчетные переходные сопротивления в конце защищаемой ЛЭП в нормальной и ремонтных схемах сети.

8.3.3.2 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 по условию согласования с дистанционными и/или резервными токовыми защитами смежных присоединений от междуфазных КЗ требуется проводить методом поиска конца зоны действия ступени защиты, с которой проводится согласование, с учетом возможного сокращения ее зоны и отстройкой от полученного расчетного замера по неравенству

$$Z^{II}_{\text{уст1фф}} \leq k_{\text{отс}} \cdot \left|\underline{Z}_{\text{р}}\right| \cdot d, \tag{8.13}$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7, 4.2.2.8 и/или 4.2.4.1, 4.2.4.2;

d — параметр, который учитывает возможное различие угла максимальной чувствительности круговой характеристики второй ступени защиты 1 и угла расчетного сопротивления $\underline{Z}_{\text{р}}$, определяется по формуле

$$d = \frac{1}{\cos\left(\varphi_{\text{мч}} - \varphi_{\text{р}}\right)}. \tag{8.14}$$

Расчетные выражения по условиям согласования или отстройки с использованием параметров схемы замещения элементов электрической сети приводятся далее для пояснения принципов расчета

и справедливы для частного случая однородных ЛЭП без емкостной проводимости при равных углах максимальной чувствительности круговых характеристик согласуемых защит.

При согласовании ДЗ смежных сетевых элементов с разнотипными характеристиками срабатывания необходимо учитывать 4.2.2.9.

Расчет сопротивлений срабатывания ступеней ДЗ с выдержками времени по условию отстройки или согласования проводится при металлических КЗ без учета изменения модулей и углов ЭДС генераторов в течение аварийного режима.

8.3.3.3 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по согласованию с первой ступенью защиты 3 смежной ЛЭП (позиция 2.2, таблица 8.1) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_{Т\text{-}1} + \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{1-\alpha}{k_т} \cdot Z^{I}_{уст3} \right| \cdot d, \qquad (8.15)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7;

α — коэффициент, учитывающий сокращение зоны ступени ДЗ, с которой проводится согласование, определяется согласно 4.2.1;

$Z^{I}_{уст3}$ — сопротивление срабатывания первой ступени защиты 3 от междуфазных КЗ;

$k_т$ — коэффициент токораспределения;

$\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ — сопротивление Т (АТ) блока, рассчитывается согласно 8.2.1;

d — определяется по формуле (8.14) в случае круговой характеристики.

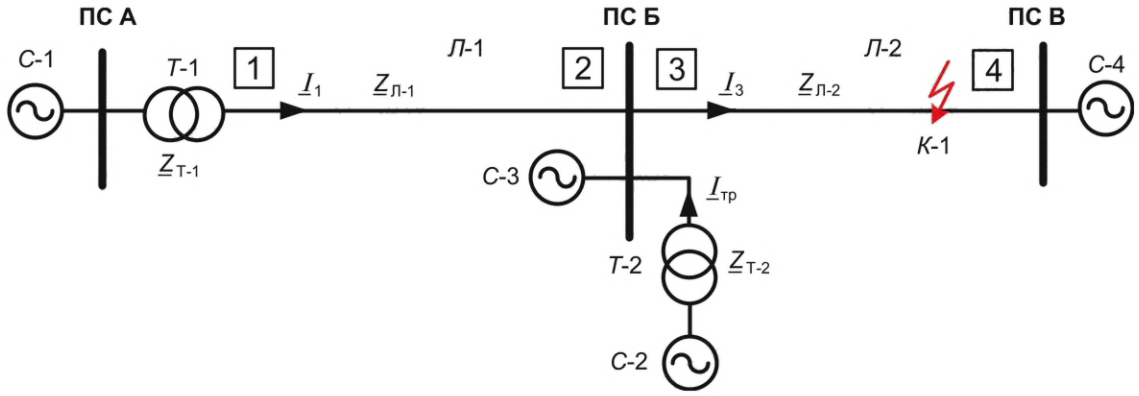


Рисунок 8.3 — Определение коэффициента токораспределения при КЗ в точке К-1

Коэффициент токораспределения при согласовании защиты 1 с защитой 3 (К-1, рисунок 8.3) определяется по формуле

$$k_т = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_3}. \qquad (8.16)$$

Расчетным является значение коэффициента $k_т$ в такой реально возможной схеме сети, которой соответствует наименьшее сопротивление срабатывания согласно неравенству (8.15).

Согласование с первой ступенью защиты 3 смежной ЛЭП допускается проводить в режиме каскадного отключения КЗ защитой противоположного конца ЛЭП со стороны ПС В, если согласование с учетом значения $k_т$ до начала каскадного отключения из-за наличия влияния обходных связей приводит к значительному загрублению сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1. В этом случае должен быть учтен коэффициент возврата ДО второй ступени защиты 1, поскольку ДО может сработать до начала каскадного отключения.

Согласование в каскаде проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le \frac{k_{отс}}{k_в} \cdot \left| \underline{Z}_{Т\text{-}1} + \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{1-\alpha}{k_т} \cdot Z^{I}_{уст3} \right| \cdot d, \qquad (8.17)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7;

$k_в$ — коэффициент возврата, определяется по техническим данным защиты;

$k_т$ — коэффициент токораспределения, определяется по формуле (8.16);

d — определяется по формуле (8.14) в случае круговой характеристики.

Если сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1, выбранное по согласованию с первой ступенью защиты 3, не удовлетворяет требованию обеспечения чувствительности (см. 8.3.3.1), согласование следует производить со второй ступенью защиты 3.

8.3.3.4 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по согласованию с резервной токовой защитой от междуфазных КЗ защиты 3 при выполнении последней с помощью токовой отсечки, отсечки по напряжению или комбинированной отсечки по току и напряжению (позиция 2.2, таблица 8.1) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_{Т\text{-}1} + \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{\underline{Z}_{расч}}{k_т} \right| \cdot d, \qquad (8.18)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.4.1;

$\underline{Z}_{расч}$ — сопротивление участка смежной ЛЭП, надежно (с коэффициентом надежности $k_н$ = 1,1) охватываемой токовой защитой, с которой проводится согласование в расчетных для согласования условиях при металлическом междуфазном КЗ;

$\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ — сопротивление Т (АТ) блока, рассчитывается согласно 8.2.1;

$k_т$ — коэффициент токораспределения, равен отношению тока, протекающего в месте установки защиты 1, к току в месте установки защиты, с которой проводится согласование;

d — определяется по формуле (8.14) в случае круговой характеристики.

Общие указания при согласовании ступеней ДЗ с резервными токовыми защитами от междуфазных КЗ приведены в 4.2.4.

8.3.3.5 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схемы (рисунок 8.1, б)) по условию отстройки от междуфазных КЗ на шинах ПС В (позиция 2.3, таблица 8.1) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_{Т\text{-}1} + \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{1}{k_т} \cdot 0{,}5 \cdot \underline{Z}_{Л\text{-}2} \right| \cdot d, \qquad (8.19)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.6;

$\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ — сопротивление Т (АТ) блока, рассчитывается согласно 8.2.1;

$k_т$ — коэффициент токораспределения;

d — определяется по формуле (8.14) в случае круговой характеристики.

Расчетное неравенство (8.19) приведено для случая равенства сопротивлений прямой последовательности параллельных ЛЭП Л-2 и Л-3.

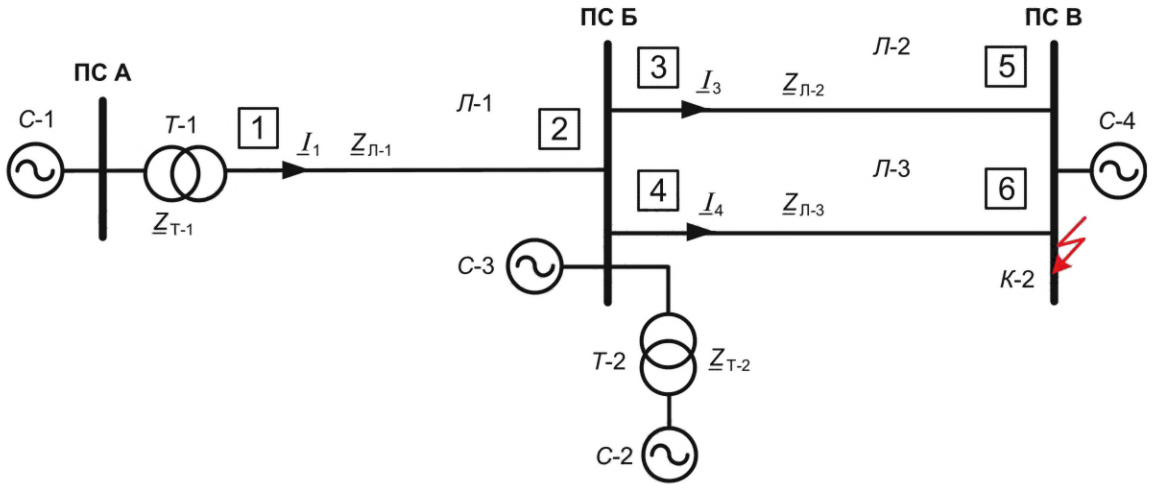


Рисунок 8.4 — Определение коэффициента токораспределения при КЗ в точке К-2

Коэффициент токораспределения при отстройке от КЗ на шинах ПС В (К-2, рисунок 8.4) определяется при включенных параллельных ЛЭП Л-2 и Л-3 по формуле

$$k_{т} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_3 + \underline{I}_4}. \quad (8.20)$$

Расчетным является значение коэффициента $k_{т}$ в такой реально возможной схеме сети, которому соответствует наименьшее сопротивление срабатывания согласно неравенству (8.19).

Если сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1, выбранное по условию отстройки, не удовлетворяет требованию обеспечения чувствительности (см. 8.3.3.1), в этом случае выбор сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 выполняется по согласованию со второй ступенью защиты 3(4) смежных ЛЭП по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_{Т\text{-}1} + \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{1-\alpha}{k_{т}} \cdot Z^{II}_{уст3(4)} \right| \cdot d. \quad (8.21)$$

Если вторая ступень защиты 3(4) смежной ЛЭП имеет большую выдержку времени и согласование с ней приводит к значительному увеличению времени действия второй ступени защиты 1, в этом случае сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1 необходимо принять по условию обеспечения чувствительности к КЗ в конце защищаемой ЛЭП и обеспечить:

1) согласование с первой ступенью защит 3 и 4 при каскадном отключении повреждения со стороны ПС В при наличии в работе быстродействующей защиты шин ПС В и защит ЛЭП Л-2 и Л-3, обеспечивающих каскадное отключение КЗ без выдержки времени со стороны ПС В;

2) при наличии СВ (ШСВ) на ПС В отстройку от КЗ на шинах ПС В после отключения СВ (ШСВ) при условии ввода в работу делительной защиты, действующей на отключение СВ (ШСВ) при выводе из работы быстродействующей защиты шин на ПС В;

3) согласование с резервными защитами от междуфазных КЗ ЛЭП, отходящих от ПС В.

При согласовании в режиме каскада должен быть учтен коэффициент возврата ДО второй ступени защиты 1, поскольку ДО может сработать до начала каскадного отключения. Согласование с учетом коэффициента возврата проводится по неравенству (8.17) с учетом коэффициента токораспределения, равного отношению тока в защите 1 к току в защите, с которой проводится согласование в режиме каскада.

Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 по условию отстройки от междуфазных КЗ на шинах ПС В после отключения СВ (ШСВ) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le \frac{k_{отс}}{k_{в}} \cdot \left| \underline{Z}_{Т\text{-}1} + \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{1}{k_{т}} \cdot \underline{Z}_{Л\text{-}2} \right| \cdot d, \quad (8.22)$$

где $k_{в}$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.6;

$k_{т}$ — коэффициент токораспределения, равен отношению тока, протекающего в месте установки защиты 1, к току в месте установки защиты, с которой проводится согласование в режиме каскада;

d — определяется по формуле (8.14) в случае круговой характеристики.

8.3.3.6 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по условию отстройки от междуфазных КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б (позиция 2.4, таблица 8.1) проводится по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_{Т\text{-}1} + \underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{\underline{Z}_{Т\text{-}2}}{k_{т}} \right| \cdot d, \quad (8.23)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.5;

$\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ — сопротивление Т (АТ) блока, рассчитывается согласно 8.2.1;

$\underline{Z}_{Т\text{-}2}$ — эквивалентное сопротивление параллельно работающих Т (АТ) Т-2;

$k_{т}$ — коэффициент токораспределения, равный отношению первичного тока в защите 1 к первичному току в рассматриваемом участке;

d — определяется по формуле (8.14) в случае круговой характеристики.

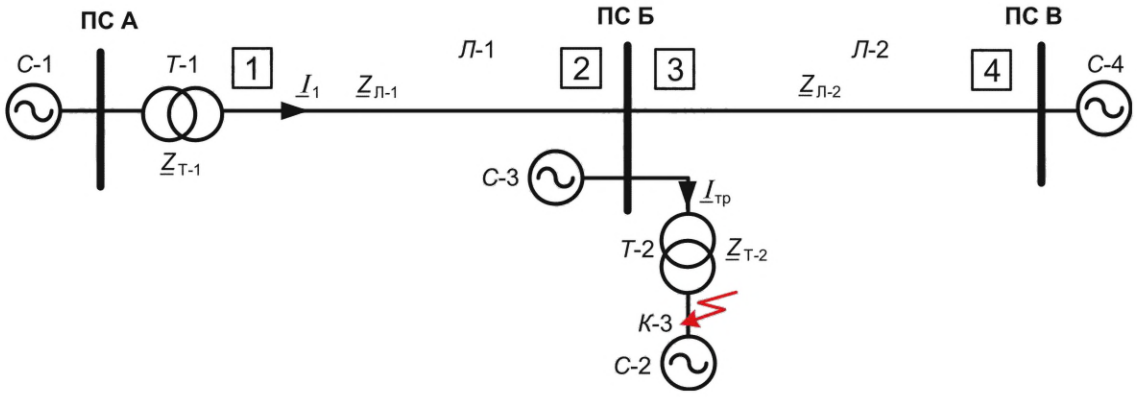


Рисунок 8.5 — Определение коэффициента токораспределения при КЗ в точке К-3

При наличии на Т (АТ) Т-2 регулирования напряжения под нагрузкой при расчете $Z^{II}_{уст1фф}$ следует учитывать минимальные значения сопротивлений $\underline{Z}_{Т-2}$, рассчитанные при крайних или возможных фактических положениях РПН.

Коэффициент токораспределения при отстройке защиты 1 от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б (К-3, рисунок 8.5) определяется по формуле

$$k_т = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_{ТР}}. \quad (8.24)$$

Расчетным является значение коэффициента $k_т$ в такой реально возможной схеме сети, которой соответствует наименьшее сопротивление срабатывания согласно неравенству (8.23).

В случае отстройки от КЗ на стороне СН (НН) трехобмоточных Т с многосторонним питанием и АТ необходимо рассматривать режим отключения подпитки со стороны НН (СН). В случае отстройки от КЗ на стороне ВН (НН) трехобмоточных Т с многосторонним питанием и АТ, необходимо рассматривать режим отключения подпитки со стороны НН (ВН).

Рассматриваются замеры сопротивлений при металлических междуфазных КЗ в нормальной и ремонтных схемах сети при нулевом перетоке мощности по линии без учета изменения модулей и углов ЭДС генераторов в течение аварийного режима.

Если сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1, выбранное по условию отстройки, не удовлетворяет требованию обеспечения чувствительности (см. 8.3.3.1), выбор сопротивления срабатывания проводится по согласованию с дистанционными или резервными токовыми защитами от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС Б.

Если согласование с резервными защитами Т (АТ) ПС Б приводит к значительному увеличению времени действия второй ступени защиты 1, расчет сопротивления срабатывания проводится по согласованию с резервными защитами от междуфазных КЗ присоединений стороны смежного напряжения ПС Б.

Согласование второй ступени защиты 1 с резервными защитами Т (АТ) ПС Б от междуфазных КЗ или резервными защитами от междуфазных КЗ присоединений стороны смежного напряжения ПС Б проводится методом поиска конца зоны действия ступени защиты, с которой проводится согласование, и отстройкой от полученного замера $\underline{Z}_р$ по неравенству (8.13).

Согласование второй ступени защиты 1 с ДЗ Т (АТ) ПС Б проводится с учетом схем подключения последней к ТТ и ТН, а также направленности отдельных ступеней.

Расчет и выбор сопротивлений срабатывания ступеней ДЗ ЛЭП с выдержками времени по условию согласования с резервными защитами Т (АТ) проводится при металлических КЗ без учета изменения модулей и углов ЭДС генераторов в течение аварийного режима.

При согласовании ДЗ с разнотипными характеристиками необходимо учитывать 4.2.2.9, при согласовании ступеней ДЗ с резервными токовыми защитами Т (АТ) от междуфазных КЗ необходимо учитывать 4.2.4.2.

8.3.3.7 Расчет выдержки времени срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) проводится в соответствии с указаниями по расчету ДЗ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.3.8.

8.3.4 Расчет и выбор параметров настройки третьей ступени ДЗ от междуфазных КЗ.

Основные требования, предъявляемые к третьей ступени ДЗ, — обеспечение резервирования защит ЛЭП и защит или выключателей смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ (дальнее резервирование), а также обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие третьей ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

В соответствии с пунктом 25 требований [2] при невозможности одновременного выполнения требований по обеспечению чувствительности и селективности параметров настройки ступени ДЗ, выполняющей функции дальнего резервирования, приоритет должен быть отдан требованию обеспечения чувствительности.

8.3.4.1 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по условию обеспечения чувствительности к междуфазным КЗ в конце защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования (позиция 3.1, таблица 8.1) проводится по неравенству (5.21).

Если обеспечение чувствительности третьей ступени защиты 1 к междуфазным КЗ через переходные сопротивления в зоне дальнего резервирования невозможно обеспечить по другим расчетным условиям или по техническим данным защиты, чувствительность обеспечивается в соответствии с указаниями по расчету сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ одиночной ЛЭП, приведенными в 5.3.4.1.

8.3.4.2 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по согласованию со второй (третьей) ступенью защиты 3 и защиты 4 смежных ЛЭП (позиция 3.2, таблица 8.1) проводится аналогично расчету при согласовании второй ступени защиты 1 с первой (второй) ступенью защиты 3, приведенному в 8.3.3.3.

Общие указания для расчета сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ по условию согласования с резервными защитами смежных сетевых элементов для ЛЭП, работающих по схеме блока Т (АТ) — линия, соответствуют указаниям, приведенным в 5.3.4.2.

8.3.4.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по согласованию с дистанционной или резервной токовой защитой от междуфазных КЗ Т (АТ) ПС Б проводится в случае, если рассчитанное по предыдущим условиям сопротивление срабатывания третьей ступени защиты 1 не отстроено от КЗ на шинах смежного напряжения ПС Б (позиция 3.3, таблица 8.1).

Если согласование с резервными защитами Т (АТ) ПС Б приводит к ограничению чувствительности или значительному увеличению времени действия третьей ступени защиты 1, расчет сопротивления срабатывания проводится по согласованию с резервными защитами от междуфазных КЗ присоединений стороны смежного напряжения ПС Б.

8.3.4.4 Выдержка времени третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) принимается на ступень селективности ΔT больше выдержки времени ступени защиты смежного сетевого элемента, с которой проводилось согласование по чувствительности, в соответствии с указаниями, приведенными в 5.3.4.5.

8.3.4.5 Выбор параметров настройки круговых характеристик защиты 1 по отстройке от нагрузочных режимов работы энергосистем (пункт 3.4, таблица 8.1) проводится в соответствии с указаниями 4.3.

8.4 Расчет параметров настройки ДЗ с полигональными характеристиками

8.4.1 Перечень параметров настройки ДЗ с полигональными характеристиками, которые требуется определить в процессе расчета, приведен в таблице 8.3.

Указания по расчету и выбору сопротивлений срабатывания первой, второй и третьей ступеней ДЗ с полигональными характеристиками приводятся для ДО от междуфазных КЗ.

Таблица 8.3 — Перечень параметров ДЗ с полигональными характеристиками

Ступень защиты	Обозначение параметра	Наименование параметра
Первая ступень	$Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$	Полное (реактивное) сопротивление ДО первой ступени от междуфазных КЗ
	$R^{I}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО первой ступени от междуфазных КЗ
Вторая ступень	$Z^{II}_{уст1фф}\left(X^{II}_{уст1фф}\right)$	Полное (реактивное) сопротивление ДО второй ступени от междуфазных КЗ
	$R^{II}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО второй ступени от междуфазных КЗ

Окончание таблицы 8.3

Ступень защиты	Обозначение параметра	Наименование параметра
Третья ступень	$Z^{III}_{уст1фф}\left(X^{III}_{уст1фф}\right)$	Полное (реактивное) сопротивление ДО третьей ступени от междуфазных КЗ
	$R^{III}_{уст1фф}$	Активное сопротивление ДО третьей ступени от междуфазных КЗ

8.4.2 Расчет и выбор параметров настройки первой ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Основное требование, предъявляемое к первой ступени ДЗ, — обеспечение селективного отключения междуфазных КЗ на защищаемой ЛЭП.

8.4.2.1 Первая ступень защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) выполняется без выдержки времени.

8.4.2.2 Расчет сопротивления срабатывания первой ступени защиты 1 по условию отстройки от КЗ на шинах ПС Б (позиция 1.1, таблица 8.1) проводится по неравенствам:

- полное сопротивление срабатывания

$$Z^{I}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \frac{|\underline{Z}_p| \cdot \sin\varphi_p}{\sin\varphi_{хар}}; \quad (8.25)$$

- реактивное сопротивление срабатывания

$$X^{I}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot |\underline{Z}_p| \cdot \sin\varphi_p, \quad (8.26)$$

где $|\underline{Z}_p|$ и φ_p — модуль и угол расчетного полного сопротивления;

$\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.3.

Для ЛЭП без учета емкостной проводимости расчетное сопротивление $\underline{Z}_p$ при металлических междуфазных КЗ на шинах ПС Б равно суммарному сопротивлению блока $\underline{Z}_{БЛ}$ и определяется по формуле (8.10) с учетом указаний 8.2.1.

При наличии на Т (АТ) блока регулирования напряжения под нагрузкой расчет следует проводить с учетом минимального значения сопротивления $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ блока, рассчитанного при крайних или возможных фактических положениях РПН.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}(X^{I}_{уст1фф})$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ и при междуфазных КЗ через расчетные переходные сопротивления на шинах ПС Б в нормальной и ремонтных схемах сети при нулевом доаварийном перетоке мощности по защищаемой ЛЭП, а также с учетом доаварийных перетоков мощности, характерных для рассматриваемых схем сети.

8.4.2.3 Расчет сопротивления срабатывания первой ступени защиты 1 по условию обеспечения перекрытия зон первых ступеней ДЗ с двух сторон защищаемой ЛЭП (позиция 1.2, таблица 8.1) проводится по неравенствам

- полное сопротивление срабатывания

$$Z^{I}_{уст1фф} \ge k_{охв} \cdot |\underline{Z}_p|; \quad (8.27)$$

- реактивное сопротивление срабатывания

$$X^{I}_{уст1фф} \ge k_{охв} \cdot |\underline{Z}_p| \cdot \sin\varphi_p, \quad (8.28)$$

где $|\underline{Z}_p|$ и φ_p — модуль и угол расчетного полного сопротивления;

$k_{охв}$ — коэффициент охвата, принимается из диапазона 0,65—0,75.

Для выбора сопротивления срабатывания $Z^{I}_{уст1фф}$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ в конце защищаемой ЛЭП.

При наличии на Т (АТ) блока регулирования напряжения под нагрузкой необходимо учитывать максимальное расчетное значение сопротивления $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ блока при крайнем положении РПН.

Если при металлических КЗ не получается одновременно обеспечить отстройку и охват с учетом сопротивления $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ блока, рассчитанного при крайних положениях РПН, необходимо выполнить расчет сопротивления срабатывания с учетом $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ блока при возможных фактических положениях РПН.

8.4.2.4 Если расчетное сопротивление срабатывания первой ступени защиты 1 по условию 8.4.2.2 при КЗ через переходные сопротивления не удовлетворяет условию 8.4.2.3, необходимо обеспечить требуемый охват при металлических КЗ, а для отстройки от внешних КЗ через переходные сопротивления применить угол наклона (скоса) верхней грани полигональной характеристики (при наличии параметра) в соответствии с 5.4.2.4.

8.4.2.5 Если согласно техническим данным защиты 1 угол наклона (скоса) верхней грани характеристики отсутствует или полученное значение угла превышает диапазон регулирования, необходимо для расчетных режимов, где не выполняются условия 8.4.2.2 или получены неудовлетворительные результаты по 8.4.2.4, выполнить отстройку характеристики срабатывания первой ступени защиты 1 от замеров $\underline{Z}_р$ при КЗ через переходное сопротивление на шинах ПС Б уставкой активного сопротивления $R^{I}_{уст1}$ по неравенству (5.27) в соответствии с 5.4.2.5.

8.4.2.6 Расчет активного сопротивления срабатывания $R^{I}_{уст1фф}$ первой ступени защиты 1 по условию обеспечения чувствительности к КЗ через переходное сопротивление (позиция 1.3, таблица 8.1) проводится по неравенству (5.28) в соответствии с 5.4.2.6, 5.4.2.7.

8.4.2.7 Выбор угла φ_{IV} полигональной характеристики проводится по условию обеспечения чувствительности при КЗ через переходные сопротивления в начале защищаемой ЛЭП, расчет выполняется согласно 5.4.2.8.

8.4.3 Расчет и выбор параметров настройки второй ступени ДЗ с полигональной характеристикой срабатывания

Требования, предъявляемые ко второй ступени ДЗ, — обеспечение надежного отключения междуфазных КЗ по всей длине защищаемой ЛЭП и обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие второй ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

8.4.3.1 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по условию обеспечения чувствительности при металлических междуфазных КЗ в конце защищаемой ЛЭП (позиция 2.1, таблица 8.1) проводится по неравенствам:

- полное сопротивление срабатывания

$$Z^{II}_{уст1фф} \geq k_{чZ} \cdot \frac{\left|\underline{Z}_р\right| \cdot \sin\varphi_р}{\sin\varphi_{хар}}; \tag{8.29}$$

- реактивное сопротивление срабатывания

$$X^{II}_{уст1фф} \geq k_{чX} \cdot \left|\underline{Z}_р\right| \cdot \sin\varphi_р, \tag{8.30}$$

где $|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного полного сопротивления;

$\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики;

$k_{чZ}$, $k_{чX}$ — коэффициенты чувствительности, принимаются согласно 4.2.5.4.

При наличии на Т (АТ) блока регулирования напряжения под нагрузкой расчет следует проводить с учетом максимального значения $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ блока, рассчитанного при крайнем или возможных фактических положениях РПН.

Для выбора $Z^{II}_{уст1фф}$ рассматриваются результаты расчета при металлических междуфазных КЗ и междуфазных КЗ через расчетные переходные сопротивления в конце защищаемой ЛЭП в нормальной и ремонтных схемах сети.

8.4.3.2 Расчет активного сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по условию обеспечения чувствительности при междуфазных КЗ через переходное сопротивление в конце защищаемой ЛЭП (позиция 2.1, таблица 8.1) проводится по неравенству

$$R^{II}_{уст1фф} \geq \left|\underline{Z}_р\right| \cdot \frac{\sin\left(\varphi_{прав} - \varphi_р\right) + \left(k_ч - 1\right)}{\sin\varphi_{прав}}, \tag{8.31}$$

где $|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного полного сопротивления;

$\varphi_{прав}$ — угол наклона правой боковой стороны характеристики;

$k_ч$ — коэффициент чувствительности, принимается согласно 4.2.5.4.

При наличии на Т (АТ) блока регулирования напряжения под нагрузкой расчет следует проводить с учетом максимального значения $\underline{Z}_{Т\text{-}1}$ блока, рассчитанного при крайнем или возможных фактических положениях РПН.

Для выбора $R^{II}_{уст1фф}$ рассматриваются результаты расчета при междуфазных КЗ через расчетные переходные сопротивления в конце защищаемой ЛЭП в нормальной и ремонтных схемах сети.

8.4.3.3 Расчет сопротивления срабатывания второй ступени защиты 1 по условию согласования с дистанционными и/или резервными токовыми защитами смежных присоединений от междуфазных КЗ требуется проводить методом поиска конца зоны действия ступени защиты, с которой проводится согласование с учетом возможного сокращения ее зоны, и отстройкой от полученного расчетного замера по неравенству

$$Z^{II}_{уст1фф} \le k_{отс} \cdot \left|\underline{Z}_р\right| \cdot d, \tag{8.32}$$

где $|\underline{Z}_р|$ — модуль расчетного сопротивления;

$k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2.7, 4.2.2.8 и/или 4.2.4.1, 4.2.4.2;

d — параметр, который при согласовании защит учитывает возможное различие угла наклона полигональной характеристики второй ступени защиты 1 и угла расчетного сопротивления $\underline{Z}_р$:

$$d = \frac{\sin\varphi_р}{\sin\varphi_{хар}}. \tag{8.33}$$

8.4.3.4 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ и выдержек времени второй ступени защиты 1 с полигональной характеристикой для схем (рисунок 8.1, а), б)) по условиям обеспечения селективности при междуфазных КЗ на смежных участках сети проводится по всем расчетным условиям (позиции 2.2—2.4, таблица 8.1) и выполняется аналогично расчету параметров настройки второй ступени защиты 1 с круговой характеристикой согласно указаниям, приведенным в 8.3.3.2—8.3.3.7. В выражениях для расчета сопротивления срабатывания $Z^{II}_{уст1фф}$ параметр d следует определять по формуле (8.33).

8.4.3.5 Расчет реактивного сопротивления срабатывания $X^{II}_{уст1фф}$ второй ступени защиты 1 проводится на основании принятого значения уставки полного сопротивления $Z^{II}_{уст1фф}$ по формуле

$$X^{II}_{уст1фф} = Z^{II}_{уст1фф} \cdot \sin\varphi_{хар}. \tag{8.34}$$

8.4.4 Расчет и выбор параметров настройки третьей ступени ДЗ от междуфазных КЗ

Основные требования, предъявляемые к третьей ступени ДЗ, — обеспечение резервирования защит своей ЛЭП и защит или выключателей смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ (дальнее резервирование), а также обеспечение селективности с защитами смежных сетевых элементов при междуфазных КЗ. Действие третьей ступени ДЗ выполняется с выдержкой времени.

В соответствии с пунктом 25 требований [2] при невозможности одновременного выполнения требований по обеспечению чувствительности и селективности параметров настройки ступени ДЗ ЛЭП, выполняющей функции дальнего резервирования, приоритет должен быть отдан требованию обеспечения чувствительности.

8.4.4.1 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}\left(X^{III}_{уст1фф}\right)$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по условию обеспечения чувствительности к металлическим междуфазным КЗ в конце защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования проводится по неравенствам (5.36) и (5.37).

Если обеспечение чувствительности третьей ступени защиты 1 к междуфазным КЗ в зоне дальнего резервирования невозможно обеспечить по другим расчетным условиям или по техническим данным защиты, чувствительность обеспечивается в соответствии с указаниями по расчету, приведенными в 5.3.4.1.

8.4.4.2 Расчет активного сопротивления срабатывания $R^{III}_{уст1}$ третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по условию обеспечения чувствительности при междуфазных КЗ через переходное сопротивление в конце защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования (позиция 3.1, таблица 8.1) проводится по неравенству (5.38) с учетом 5.4.4.2.

8.4.4.3 Расчет сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ и выдержки времени третьей ступени защиты 1 для схем (рисунок 8.1, а), б)) по условиям обеспечения селективности при междуфазных КЗ на смежных участках сети проводится по всем расчетным условиям (позиции 3.2, 3.3, таблица 8.1) и выполняется аналогично расчету параметров настройки третьей ступени $Z^{III}_{уст1фф}$ защиты 1 с круговой

характеристикой согласно 8.3.4.2-8.3.4.4. В выражениях для расчета сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ параметр d следует определять по формуле (8.33).

8.4.4.4 Расчет реактивного сопротивления срабатывания третьей ступени защиты 1 $X^{III}_{уст1фф}$ проводится на основании принятой уставки сопротивления срабатывания $Z^{III}_{уст1фф}$ по формуле

$$X^{III}_{уст1фф} = Z^{II}_{уст1фф} \cdot \sin\varphi_{хар}. \quad (8.35)$$

8.4.4.5 Выбор параметров настройки полигональных характеристик защиты 1 по отстройке от нагрузочных режимов работы энергосистем (позиция 3.4, таблица 8.1) проводится в соответствии с 4.3.

9 Пусковые органы, токовый контроль и проверка чувствительности по току точной работы дистанционной защиты линий электропередачи

9.1 Расчет параметров настройки пусковых органов ДЗ

В устройствах РЗ пусковые органы предназначены для фиксации факта и вида КЗ в энергосистеме.

Пусковые органы ДЗ могут осуществлять ввод в работу всех ступеней ДЗ либо каждой ступени по отдельности, в этом случае они выполняют функцию токового контроля.

Пусковые органы защиты могут выполнять раздельный пуск ступеней ДЗ от междуфазных КЗ или ступеней ДЗ от КЗ на землю. В некоторых защитах пусковые органы могут дополнительно выполнять фазоселективную функцию (определять вид повреждения и поврежденные фазы), а также функцию отстройки от нагрузочных режимов (вырез нагрузки).

В качестве пусковых органов могут использоваться:

- пусковые органы, включенные на фазные токи;
- комбинированные пусковые органы по току и напряжению, включенные на фазные токи и междуфазные напряжения;
- пусковые органы по току обратной последовательности;
- пусковые органы по току и напряжению нулевой последовательности;
- пусковые органы устройства БК;
- дистанционные пусковые органы.

Указания по расчету и выбору параметров настройки пусковых органов ДЗ приводятся ниже для одиночных и параллельных ЛЭП, ЛЭП при наличии ответвлений и ЛЭП, работающих по схеме блока Т (АТ) — линия.

9.1.1 Пусковые органы, включенные на фазные токи

Пусковой орган максимального тока контролирует фазные токи на превышение заданной уставки, в некоторых защитах может выполнять функцию определения поврежденных фаз, а также действовать на пуск защиты помимо дистанционных пусковых органов при их наличии.

9.1.1.1 Расчет первичного тока срабатывания по отстройке от максимального рабочего тока по ЛЭП в нагрузочных режимах проводится по неравенству

$$I_{с.з} \geq \frac{k_н}{k_в} I_{раб\ макс}, \quad (9.1)$$

где $I_{раб\ макс}$ — максимальный рабочий ток нагрузочного режима ЛЭП;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты.

9.1.1.2 Расчет первичного тока срабатывания по отстройке от тока нагрузки по ЛЭП в условиях самозапуска двигателей в составе нагрузки ПС, питающихся от рассматриваемой ЛЭП, при успешном АПВ или АВР проводится по неравенству

$$I_{с.з} \geq \frac{k_н k_{самозап}}{k_в} I_{раб\ макс}, \quad (9.2)$$

где $I_{раб\ макс}$ — максимальный рабочий ток нагрузочного режима ЛЭП;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты;

$k_{самозап}$ — коэффициент, учитывающий увеличение тока при самозапуске двигателей нагрузки ПС, питающихся от рассматриваемой ЛЭП, принимается равным 1,5—2,0 в зависимости от расчетных условий.

В случае, если режим самозапуска возникает не после возникновения КЗ (например, в результате действия АВР), коэффициент возврата $k_в$ в неравенстве (9.2) не учитывается.

9.1.1.3 Расчет первичного тока срабатывания по отстройке от максимального тока в неповрежденной фазе при близких несимметричных КЗ проводится по неравенству

$$I_{с.з} \geq k_н I_{неп}, \tag{9.3}$$

где $I_{неп}$ — максимальное значение первичного тока в неповрежденной фазе при однофазном или двухфазном КЗ на землю вблизи места установки защиты;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2.

9.1.1.4 Расчет первичного тока срабатывания по обеспечению чувствительности при КЗ в расчетной точке проводится по неравенству

$$I_{с.з} \leq \frac{I_{кз\ мин}}{k_ч}, \tag{9.4}$$

где $I_{кз\ мин}$ — первичный фазный ток в месте установки защиты при металлическом КЗ в расчетной точке в режиме, при котором этот ток имеет наименьшее значение; расчетная точка и вид КЗ определяются в зависимости от функции, которую выполняет данный пусковой орган;

$k_ч$ — коэффициент чувствительности.

Для ЛЭП при наличии ответвлений проверка чувствительности пускового органа, включенного на фазные токи, выполняется также при трехфазных и двухфазных КЗ на шинах НН Т (АТ) ПС на ответвлениях, в случае двухфазных КЗ необходимо учитывать схему соединения обмоток силовых Т Y/Δ.

Чувствительность токовых пусковых органов проверяется при КЗ в конце зоны действия ступени ДЗ, ввод в работу которой разрешается от данного пускового органа. Требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени ДЗ с охватом защищаемой ЛЭП: $k_ч \geq 1,5$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени, осуществляющей функцию дальнего резервирования: $k_ч \geq 1,2$.

9.1.2 Комбинированный пусковой орган по току и напряжению, включенный на фазные токи и междуфазные напряжения

В составе комбинированного пускового органа по току и напряжению орган максимального тока контролирует фазные токи на превышение заданной уставки, орган минимального напряжения контролирует снижение междуфазного напряжения относительно заданной уставки.

9.1.2.1 Расчет первичного напряжения срабатывания по отстройке от минимального напряжения в нагрузочных режимах проводится по неравенству

$$U_{с.з} \leq \frac{U_{нагр\ мин}}{k_н k_в}, \tag{9.5}$$

где $U_{нагр\ мин}$ — минимальное значение первичного междуфазного напряжения в месте установки защиты в нагрузочных режимах;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты.

9.1.2.2 Расчет первичного напряжения срабатывания по отстройке от напряжения в условиях самозапуска двигателей в составе нагрузки ПС, питающихся от рассматриваемой ЛЭП, проводится по неравенству

$$U_{с.з} \leq \frac{U_{мин}}{k_н}, \tag{9.6}$$

где $U_{мин}$ — первичное междуфазное напряжение в условиях самозапуска двигателей, ориентировочно может быть принято равным $0,7U_{ном}$;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2.

9.1.2.3 Расчет первичного напряжения срабатывания по отстройке от напряжения между неповрежденной и поврежденной фазами проводится по неравенству

$$U_{с.з} \le \frac{U_{неп}}{k_н}, \quad (9.7)$$

где $U_{неп}$ — первичное значение напряжения между неповрежденной и поврежденной фазами при металлическом однофазном или двухфазном КЗ;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2.

9.1.2.4 Расчет первичного тока срабатывания по отстройке от максимального рабочего тока нагрузочного режима ЛЭП проводится без учета самозапуска двигателей ПС, питающихся от рассматриваемой ЛЭП, по неравенству

$$I_{с.з} \ge \frac{k_н}{k_в} I_{раб\ макс}, \quad (9.8)$$

где $I_{раб\ макс}$ — максимальный рабочий ток нагрузочного режима ЛЭП;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты.

9.1.2.5 Расчет первичного тока и напряжения срабатывания по обеспечению чувствительности при КЗ в расчетной точке проводится по неравенствам:

$$U_{с.з} \ge k_ч \cdot U_{макс\ кз}, \quad (9.9)$$

$$I_{с.з} \le \frac{I_{кз\ мин}}{k_ч}, \quad (9.10)$$

где $U_{макс\ кз}$ — первичное значение междуфазного напряжения в месте установки защиты при металлическом междуфазном КЗ в расчетной точке в режиме, при котором это напряжение имеет наибольшее значение;

$I_{кз\ мин}$ — первичное значение фазного тока в месте установки защиты при металлическом междуфазном КЗ в расчетной точке в режиме, при котором ток имеет наименьшее значение;

$k_ч$ — коэффициент чувствительности.

Для ЛЭП при наличии ответвлений проверка чувствительности выполняется также при трехфазных и двухфазных КЗ на шинах НН Т (АТ) ПС на ответвлениях, в случае двухфазных КЗ необходимо учитывать схему соединения обмоток Т (АТ) Y/Δ.

Для комбинированного пускового органа требуется одновременное обеспечение чувствительности согласно неравенствам (9.9) и (9.10) при КЗ в одной и той же расчетной точке и в одном и том же расчетном режиме.

Чувствительность комбинированного пускового органа проверяется при КЗ в конце зоны действия ступени ДЗ, ввод в работу которой разрешается от данного пускового органа. Требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени ДЗ с охватом защищаемой ЛЭП: $k_ч \ge 1,5$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени, осуществляющей функцию дальнего резервирования: $k_ч \ge 1,2$.

9.1.3 Пусковой орган по току обратной последовательности

Пусковой орган по току обратной последовательности контролирует значение тока I_2 и осуществляет ввод в работу ступеней ДЗ при превышении заданных параметров настройки.

9.1.3.1 Первичный ток срабатывания рассчитывается по условию отстройки от суммарного тока небаланса в нагрузочном режиме:

$$I_{2с.з} \ge \frac{k_н}{k_в}\left(I_{2нб} + I_{2н.р}\right), \quad (9.11)$$

где $I_{2нб}$ — ток небаланса в рассматриваемом режиме, обусловленный погрешностями ТТ и фильтра тока обратной последовательности, определяется по формуле

$$I_{2нб} = k_{2нб} I_{раб\ макс}, \quad (9.12)$$

где $I_{раб\ макс}$ — максимальный рабочий ток нагрузочного режима ЛЭП;

$k_{2нб}$ — коэффициент небаланса, принимается равным 0,03;

$I_{2н.р}$ — ток обратной последовательности, обусловленный несимметрией в системе в нагрузочном режиме, при отсутствии несимметрии принимается $I_{2н.р} = 0$;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты.

9.1.3.2 Расчет первичного тока срабатывания по обеспечению чувствительности при КЗ в расчетной точке проводится по неравенству

$$I_{2с.з} \le \frac{I^{(1,1)}_{2кз\ мин}}{k_ч}, \tag{9.13}$$

где $I^{(1,1)}_{2кз\ мин}$ — первичный ток обратной последовательности в месте установки защиты при двухфазном КЗ на землю в расчетной точке в режиме, при котором этот ток имеет наименьшее значение.

Чувствительность пускового органа по току обратной последовательности проверяется при КЗ в конце зоны действия ступени ДЗ, ввод в работу которой разрешается от данного пускового органа. Требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени ДЗ с охватом защищаемой ЛЭП: $k_ч \ge 1,5$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени, осуществляющей функцию дальнего резервирования: $k_ч \ge 1,2$.

9.1.4 Пусковые органы по току и напряжению нулевой последовательности

Данные пусковые органы контролируют утроенные значения тока и напряжения нулевой последовательности и осуществляют ввод в работу ступеней ДЗ от КЗ на землю при превышении заданных параметров настройки.

9.1.4.1 Расчет первичного тока срабатывания по отстройке от небаланса в нагрузочном режиме проводится по неравенству

$$3I_{0с.з} \ge \frac{k_н}{k_в}(I_{0нб} + 3I_{0н.р}), \tag{9.14}$$

где $I_{0нб}$ — ток небаланса в нулевом проводе ТТ в рассматриваемом режиме, обусловленный погрешностями ТТ, определяется по формуле

$$I_{0нб} = k_{0нб} I_{раб\ макс}, \tag{9.15}$$

где $I_{раб\ макс}$ — максимальный рабочий ток нагрузочного режима ЛЭП;

$k_{0нб}$ — коэффициент небаланса, принимается равным 0,05 при значении $I_{раб\ макс}$, не превышающей удвоенного-утроенного $I_{ном\ ТТ}$ первичного номинального тока ТТ;

$3I_{0н.р}$ — утроенный ток нулевой последовательности, обусловленный наличием несимметрии в системе, при отсутствии несимметрии принимается равным $3I_{0н.р} = 0$;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты.

9.1.4.2 Расчет первичного напряжения срабатывания по отстройке от небаланса в нагрузочном режиме проводится по неравенству

$$3U_{0с.з} \ge \frac{k_н}{k_в}(U_{0нб} + 3U_{0н.р}), \tag{9.16}$$

где $U_{0нб}$ — напряжение небаланса в нагрузочном режиме, может быть принято равным первичному значению напряжения небаланса, соответствующему 1-2 В (вторичных);

$3U_{0н.р}$ — утроенное напряжение нулевой последовательности, обусловленное несимметрией в системе, при отсутствии несимметрии принимается равным $3U_{0н.р} = 0$;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты.

9.1.4.3 Расчет первичного тока и напряжения срабатывания нулевой последовательности по обеспечению чувствительности при КЗ в расчетной точке проводится по неравенствам

$$3I_{0с.з} \le \frac{3I^{(1)}_{0кз\ мин}}{k_ч}; \quad (9.17)$$

$$3U_{0с.з} \le \frac{3U^{(1)}_{0кз\ мин}}{k_ч}, \quad (9.18)$$

где $3I^{(1)}_{0кз\ мин}$ — первичный утроенный ток нулевой последовательности в месте установки защиты при однофазном КЗ на землю в расчетной точке в режиме, при котором этот ток имеет наименьшее значение;

$3U^{(1)}_{0кз\ мин}$ — первичное утроенное напряжение нулевой последовательности в месте установки защиты при однофазном КЗ на землю в расчетной точке в режиме, при котором это напряжение имеет наименьшее значение;

$k_ч$ — коэффициент чувствительности.

Чувствительность пускового органа по параметрам нулевой последовательности проверяется при КЗ в конце зоны действия ступени ДЗ, ввод в работу которой разрешается от данного пускового органа. Требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени ДЗ с охватом защищаемой ЛЭП: $k_ч \ge 1,5$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени, осуществляющей функцию дальнего резервирования: $k_ч \ge 1,2$.

9.1.5 Пусковые органы устройства БК

Расчет и выбор параметров настройки пусковых органов устройств БК, которые обеспечивают ввод в работу ДЗ ЛЭП, проводится в соответствии с 10.2, 10.3, 10.4.

9.1.6 Дистанционные пусковые органы

В микропроцессорных устройствах РЗ дистанционные пусковые органы осуществляют ввод в работу ступеней ДЗ от междуфазных КЗ и ступеней ДЗ от замыканий на землю.

Для дистанционных пусковых органов, как правило, используются те же измерения, что и для ступеней ДЗ. Для пуска ДЗ при междуфазных КЗ используются замеры линейных напряжений и разности токов соответствующих фаз. Для пуска ДЗ при КЗ на землю используются замеры фазных напряжений и фазных токов с компенсацией тока нулевой последовательности. Значение коэффициента компенсации тока нулевой последовательности для дистанционного пускового органа должно соответствовать коэффициенту компенсации самой чувствительной ступени ДЗ от КЗ на землю. В некоторых устройствах РЗ для пуска ДЗ при КЗ на землю могут использоваться фазные напряжения и фазные токи без компенсации тока нулевой последовательности.

На рисунке 9.1 приведен пример ненаправленной полигональной характеристики дистанционного пускового органа. Уставки по реактивному и активному сопротивлениям срабатывания, как правило, имеют независимое регулирование для пусковых органов, которые осуществляют раздельный пуск ступеней ДЗ при междуфазных КЗ и при КЗ на землю.

Параметры, определяющие полигональную характеристику дистанционного пускового органа:

$X_{уст\ фф}$ — реактивное сопротивление срабатывания при междуфазных КЗ;

$R_{уст\ фф}$ — активное сопротивление срабатывания при междуфазных КЗ;

$X_{уст\ фз}$ — реактивное сопротивление срабатывания при КЗ на землю;

$R_{уст\ фз}$ — активное сопротивление срабатывания при КЗ на землю;

$R_{уст\ нагр}$ и $\varphi_{уст\ нагр}$ — активное сопротивление и угол выреза нагрузки.

Характеристику дистанционного пускового органа требуется согласовать по чувствительности с характеристиками срабатывания самых чувствительных ступеней ДЗ и отстроить от нагрузочных режимов работы энергосистем.

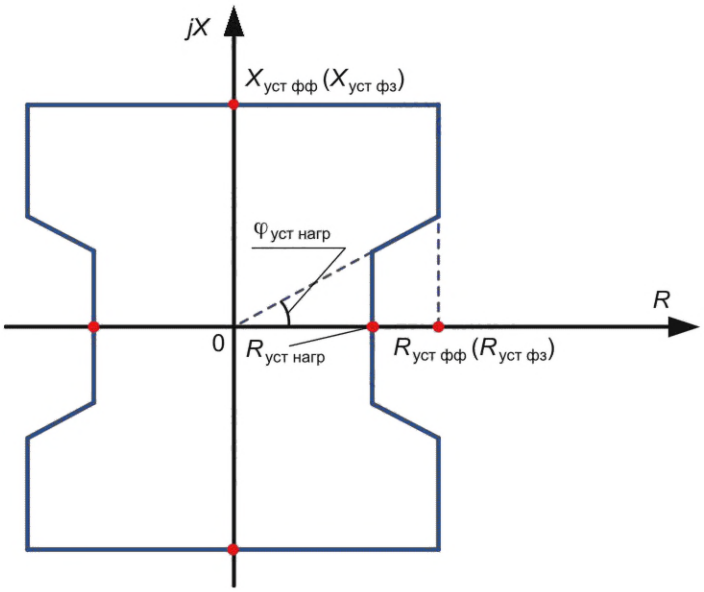


Рисунок 9.1 — Пример ненаправленной полигональной характеристики дистанционного пускового органа

9.1.6.1 Расчет первичных сопротивлений срабатывания дистанционного пускового органа по условию охвата характеристик срабатывания ДО ступеней ДЗ проводится в соответствии с неравенствами:

$$X_{уст\ фф} \geq k_н \cdot X^N_{уст\ фф}; \tag{9.19}$$

$$R_{уст\ фф} \geq k_н \cdot \left(R^N_{уст\ фф} + \frac{X^N_{уст\ фф}}{\operatorname{tg}\varphi_{прав}} \right); \tag{9.2}$$

$$X_{уст\ фз} \geq k_н \cdot X^N_{уст\ фз}; \tag{9.21}$$

$$R_{уст\ фз} \geq k_н \cdot \left(R^N_{уст\ фз} + \frac{X^N_{уст\ фз}}{\operatorname{tg}\varphi_{прав}} \right), \tag{9.22}$$

где $X^N_{уст\ фф}$, $R^N_{уст\ фф}$ — реактивное и активное сопротивления срабатывания самой чувствительной ступени ДЗ от междуфазных КЗ;

$X^N_{уст\ фз}$, $R^N_{уст\ фз}$ — реактивное и активное сопротивления срабатывания самой чувствительной ступени ДЗ от КЗ на землю;

$\varphi_{прав}$ — угол наклона правой боковой стороны характеристики самой чувствительной ступени ДЗ;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается из диапазона 1,2—1,25.

9.1.6.2 Отстройка характеристики срабатывания дистанционного пускового органа от нагрузочных режимов работы энергосистемы проводится в соответствии с 4.3.

9.2 Проверка чувствительности по току точной работы

Ток точной работы — это ток, при котором сопротивление срабатывания ДО может отклоняться от заданного значения не более чем на 10 %.

Для правильной работы ДО при КЗ в пределах защищаемой зоны требуется, чтобы минимальный ток КЗ в месте установки защиты с необходимым запасом превышал минимальное значение тока точной работы, а максимальный ток КЗ в месте установки защиты не превышал максимального значения тока точной работы.

Для ДЗ на электромеханической элементной базе диапазоны значений тока точной работы устанавливаются для каждой ступени ДЗ, для микропроцессорных защит, как правило, указывается одно значение тока точной работы для всего располагаемого диапазона сопротивлений срабатывания ДО.

Проверка чувствительности по току точной работы проводится при КЗ в конце защищаемой зоны действия ступени ДЗ по формуле

$$k_{ч\ т.р} = \frac{I_{кз\ мин}}{I_{т.р}}, \quad (9.23)$$

где $I_{кз\ мин}$ — первичный ток КЗ в месте установки защиты при рассматриваемом виде повреждения в расчетном режиме, при котором ток имеет наименьшее значение, вид повреждения определяется в соответствии с функциональным назначением ступени ДЗ;

$I_{т.р}$ — первичное значение минимального тока точной работы рассматриваемой ступени ДЗ или защиты в целом, принимается по техническим данным конкретного устройства РЗ;

$k_{ч\ т.р}$ — коэффициент чувствительности по току точной работы, требуется обеспечить минимальное значение не менее 1,3.

В случае, если чувствительность по току точной работы не обеспечивается, в ДЗ на электромеханической (микроэлектронной) элементной базе, при наличии технической возможности, возможно перейти на более чувствительный диапазон токов точной работы.

В случае, если для микропроцессорной защиты не указано значение тока точной работы, проверку по формуле (9.23) необходимо проводить, принимая в качестве $I_{т.р}$ минимальное значение рабочего диапазона токового аналогового входа микропроцессорной защиты.

9.3 Токовый контроль ступеней ДЗ

При отсутствии отдельных пусковых органов ДЗ или при использовании дистанционных пусковых органов в защите может быть реализован токовый контроль отдельных ступеней ДЗ.

Токовый контроль по фазному току (разности фазных токов) используется для ступеней ДЗ от междуфазных КЗ, токовый контроль по утроенному току нулевой последовательности $3I_0$ — для ступеней ДЗ от КЗ на землю.

Расчет первичного тока срабатывания токового контроля по обеспечению чувствительности при КЗ в расчетной точке проводится по неравенствам:

$$I_{ф\ т.конт} \le \frac{I_{ф\ кз\ мин}}{k_ч}, \quad (9.24)$$

$$3I_{0\ т.конт} \le \frac{3I_{0\ кз\ мин}}{k_ч}, \quad (9.25)$$

где $I_{ф\ кз\ мин}$ — первичное значение фазного тока (разности фазных токов) в месте установки защиты при металлическом междуфазном КЗ в расчетной точке в режиме, при котором ток имеет наименьшее значение;

$3I_{0кз\ мин}$ — первичное значение утроенного тока нулевой последовательности при металлическом однофазном КЗ на землю в расчетной точке в режиме, при котором ток имеет наименьшее значение;

$k_ч$ — коэффициент чувствительности.

Чувствительность токового контроля ступеней ДЗ проверяется при КЗ в конце защищаемой зоны. Требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени с охватом защищаемой ЛЭП: $k_ч \ge 1,5$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени, осуществляющей функцию дальнего резервирования: $k_ч \ge 1,2$.

10 Расчет параметров настройки устройств БК

10.1 Назначение и принципы выполнения устройств БК

Возникновение асинхронного режима в энергосистеме или режима синхронных качаний сопровождается периодическими колебаниями напряжений, токов и мощностей, периодическим изменением взаимного угла ЭДС генераторов электростанций и наличием разности частот между частями энергосистемы при сохранении электрической связи между ними. Токи при этом могут быть значительно больше максимальных токов в нагрузочных режимах, а напряжения в точках сети, близких к электрическому

центру качаний, могут снизиться в пределе до нуля. Сопротивление, измеряемое ДО, из области нагрузочных режимов переходит в область характеристик срабатывания, что без принятия специальных мер приводит к неправильным действиям ДЗ и отключениям ЛЭП и оборудования при отсутствии КЗ.

Для исключения неправильных действий ДЗ необходимы дополнительные устройства и схемные решения, позволяющие различить асинхронный режим и режим КЗ даже в тех случаях, когда сопротивления, измеряемые ДО, в этих режимах одинаковы.

Два основных фактора, по которым можно различить режимы качаний и КЗ:

- появление при КЗ несимметрии трехфазной системы токов или напряжений (хотя бы кратковременной в случае трехфазных КЗ) и отсутствие несимметрии (или малые ее значения) в режимах качаний;
- наличие существенных изменений (приращений) электрических величин (фазных, линейных, симметричных составляющих) за малые промежутки времени при КЗ и незначительных изменений этих же величин за такие же малые промежутки времени при качаниях, что обусловлено более плавными изменениями величин при качаниях в энергосистеме по сравнению с изменениями при КЗ.

По принципам выполнения и реагирования на указанные факторы устройства БК можно разделить на две группы:

- группа I — устройства, обеспечивающие пуск ДЗ при КЗ на время, достаточное для срабатывания, с последующим выводом из действия;
- группа II — устройства, обеспечивающие постоянную готовность ДЗ к срабатыванию и блокирующие защиту только при возникновении синхронных качаний или асинхронного режима.

Под действие устройства БК должны заводиться ступени ДЗ, выдержка времени которых не превышает 1,5 с. Допускается блокировать ступени с большими выдержками времени при обосновании или в связи с техническими особенностями применяемого устройства защиты.

10.2 Расчет параметров настройки устройств БК с пуском по напряжению обратной последовательности и току нулевой последовательности (КРБ-121, КРБ-123, КРБ-125)

Устройства БК типа КРБ-121, КРБ-123, КРБ-125 относятся к группе I и широко применяются в слаборазветвленных сетях с длинными ЛЭП и маломощными источниками питания. При КЗ на ЛЭП, отходящих от мощных источников питания при малых сопротивлениях обратной последовательности системы, примыкающей к месту установки защиты, устройство БК данного типа может оказаться нечувствительным. В этом случае более целесообразно применение устройства БК типа КРБ-126.

В устройствах БК данного типа используются комбинированные пусковые органы, реагирующие на величину $|\underline{U}_2| + |k\underline{I}_0|$.

В устройстве задаются (см. таблицу 10.1) следующие параметры настройки (уставки):

$U_{2уст}$ — пуск по напряжению обратной последовательности;

$3I_{0уст}$ — пуск по утроенному току нулевой последовательности.

Таблица 10.1 — Диапазон значений параметров настройки устройств БК

Параметр	Диапазон значений		
	КРБ-121	КРБ-123	КРБ-125
$U_{2уст}$, В (вторичных)	2,0; 3,0; 4,0	2,0; 3,0; 4,0	2,0; 3,0; 4,0; 6,0; 8,0
$3I_{0уст}$, А (вторичных)	1,0; 1,5; 2,0 для исполнения на номинальный ток 5 А 0,2; 0,3; 0,4 для исполнения на номинальный ток 1 А	1,0; 1,5; 2,0 для исполнения на номинальный ток 5 А 0,2; 0,3; 0,4 для исполнения на номинальный ток 1 А	1,0; 1,5; 2,0 для исполнения на номинальный ток 5 А 0,2; 0,3; 0,4 для исполнения на номинальный ток 1 А

Расчет параметров настройки устройства БК проводится на основании характеристик срабатывания и кривых чувствительности, приведенных в информации завода-изготовителя. При достаточной чувствительности пуска по $U_{2уст}$ пуск по $3I_{0уст}$ может не использоваться в устройстве.

Ниже приводится пример расчета параметров настройки КРБ121, расчет параметров настройки КРБ-123 и КРБ-125 проводится аналогично. Расчет параметров настройки БК проводится во вторичных величинах.

10.2.1 Расчет параметров настройки устройства БК, когда ток $3I_0$ не используется в устройстве

Напряжение срабатывания $U_{2уст}$ выбирается по условию отстройки от максимально возможного напряжения небаланса обратной последовательности в нагрузочном режиме и напряжения обратной последовательности, обусловленного наличием источников несимметрии в энергосистеме:

$$U_{2уст} \geq \frac{k_н}{k_в} U_{2расч}, \quad (10.1)$$

где $U_{2расч}$ — расчетное вторичное напряжение обратной последовательности в нагрузочном режиме, определяется по формуле (10.2);

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, находится в пределах 0,75—0,9, ориентировочно может быть принят равным 0,8.

$$U_{2расч} = U_{2нб} + U_{2н.р}, \quad (10.2)$$

где $U_{2нб}$ — напряжение небаланса, обусловленное погрешностями ТН, фильтра напряжения обратной последовательности в нагрузочном режиме;

$U_{2н.р}$ — напряжение обратной последовательности, обусловленное наличием источников несимметрии в энергосистеме.

Условие отстройки от небаланса в режиме качаний не рассматривается в предположении, что значения $U_{2нб}$ и $U_{2н.р}$ в указанном режиме не превышают таковых в нагрузочном режиме.

Значение $U_{2нб}$ зависит от конструктивного выполнения фильтра обратной последовательности, наличия возможных отклонений частоты сети от номинального значения, наличия высших гармонических составляющих в кривой напряжения, а также от падения напряжения в соединительных проводах цепей напряжения от тока нагрузки ТН. Поэтому точный расчет $U_{2нб}$ является затруднительным.

На основании данных опыта эксплуатации в расчетах может быть принято значение $U_{2нб}$, не превышающее 1—2 В (фазных вторичных).

Для ЛЭП, питающих тяговые ПС постоянного тока, при отсутствии других источников несимметрии напряжение $U_{2н.р}$ определяется высшими гармониками и с учетом выполнения рекомендаций по подавлению высших гармоник в устройствах БК в расчетах может быть принято значение $U_{2н.р}$, равное 1 В (фазных вторичных).

Для ЛЭП, питающих тяговые ПС переменного тока, напряжение $U_{2н.р}$, обусловленное однофазной тяговой нагрузкой, может изменяться в широких пределах.

В расчетах могут быть приняты следующие ориентировочные значения:

- $U_{2н.р}$ = 10 В фазных вторичных для ЛЭП напряжением 110 кВ;
- $U_{2н.р}$ = 4 В фазных вторичных для ЛЭП напряжением 220 кВ.

10.2.2 Расчет параметров настройки устройства БК, когда ток $3I_0$ используется в устройстве

Комбинированные пусковые органы $|\underline{U}_2| + |k\underline{I}_0|$ позволяют повысить чувствительность устройства БК при двухфазных КЗ на землю и должны применяться, если расчетом выявлена недостаточная чувствительность пуска по напряжению обратной последовательности при данном виде КЗ.

Использование тока $3I_0$ в устройстве может привести к увеличению уставки $U_{2уст}$ по сравнению со случаем неиспользования тока $3I_0$, а значит, и к снижению чувствительности при двухфазных КЗ. Указанное увеличение уставки $U_{2уст}$ может оказаться необходимым для отстройки от тока небаланса в нулевом проводе ТТ защиты в режиме качаний.

Выбор параметров настройки устройства БК в рассматриваемом случае проводится исходя из режима качаний по неравенству

$$I_{с.р} \geq \frac{k_н}{k_в} \cdot I_{р.расч}, \quad (10.3)$$

где $I_{с.р}$ — ток срабатывания поляризованного реле, реагирующего на выпрямленные значения напряжения обратной последовательности и утроенного тока нулевой последовательности;

$I_{р.расч}$ — ток в реле, соответствующий сумме выпрямленных значений максимального напряжения обратной последовательности $U_{2расч}$ и максимального утроенного тока нулевой последовательности $3I_{0\ расч}$, от которых устройство должно быть отстроено;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2.

В неравенстве (10.3) может быть приближенно принято:

$$\frac{k_н}{k_в} \approx \frac{1}{0,7}. \quad (10.4)$$

С учетом (10.3) и (10.4) расчет параметров настройки проводится по отношению

$$\frac{I_{р.расч}}{I_{с.р}} \le 0,7. \quad (10.5)$$

На рисунке 10.1 приведены характеристики чувствительности устройства БК типа КРБ-121, дающие кратности тока в поляризованном реле в зависимости от подводимых величин $3I_0$ и U_2 при заданных уставках $U_{2уст}$ и $3I_{0уст}$. С помощью этих кривых для исходных значений $U_{2расч}$ и $3I_{0расч}$, определяемых в режиме качаний по формулам (10.2) и (10.7) соответственно, подбираются уставки $U_{2уст}$ и $3I_{0уст}$, при которых отношение $I_р$ / $I_{с.р}$ равно или несколько меньше 0,7:

$$\frac{I_р}{I_{с.р}} = \frac{I_{р.расч}}{I_{с.р}} \le 0,7. \quad (10.6)$$

Расчетный ток $3I_{0расч}$ для режима качаний может быть определен по формуле

$$3I_{0расч} = I_{0нб} + 3I_{0н.р}, \quad (10.7)$$

где $I_{0нб}$ — ток небаланса в нулевом проводе ТТ в рассматриваемом режиме;

$3I_{0н.р}$ — утроенный ток нулевой последовательности, обусловленный несимметрией в системе, при отсутствии несимметрии принимается равным $3I_{0н.р} = 0$.

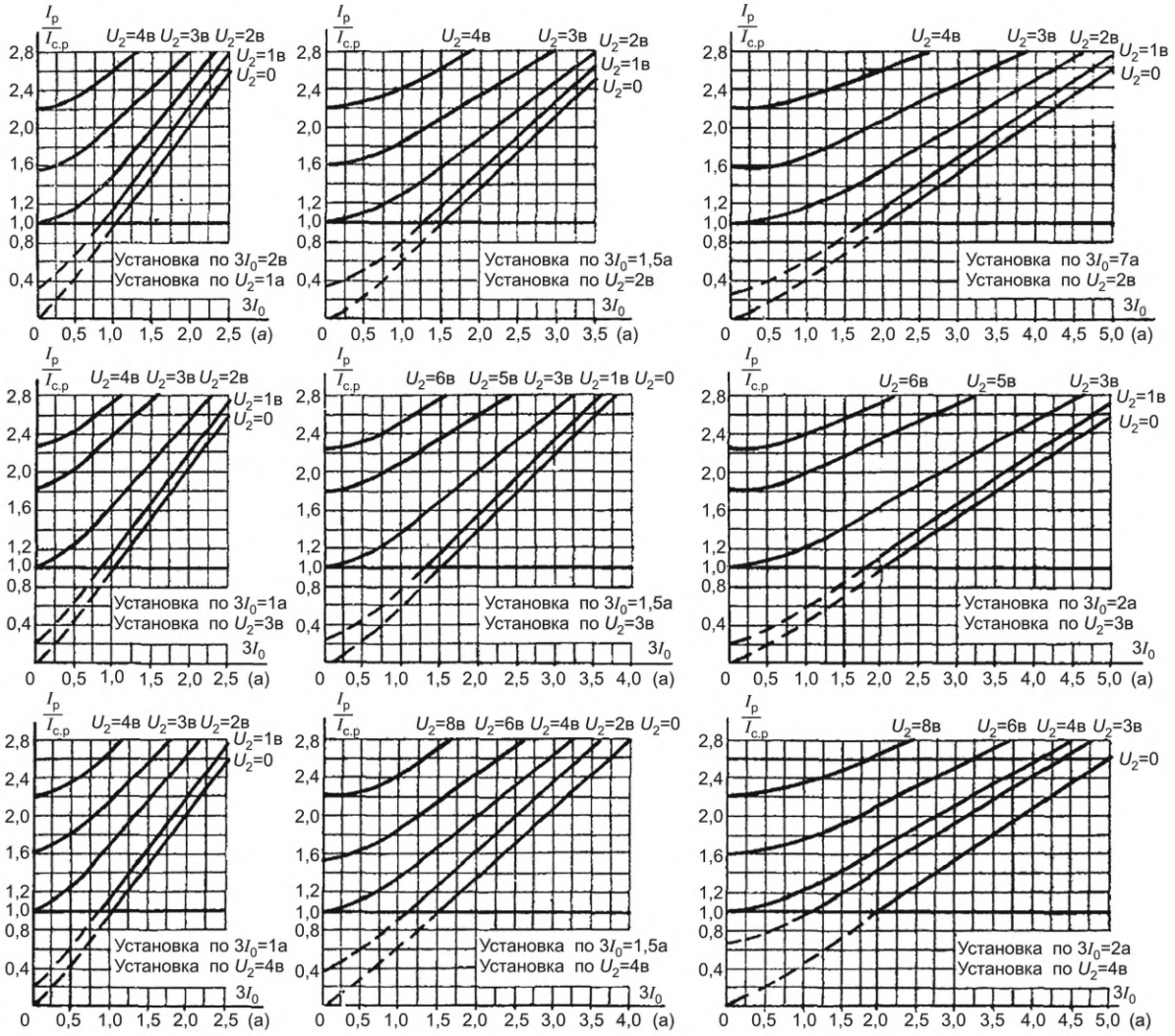
Ток $I_{0нб}$ в режиме качаний определяется по формуле

$$I_{0нб\ кач} = k_{0нб} \cdot I_{кач}, \quad (10.8)$$

где $I_{кач}$ — максимальное значение фазного тока в режиме качаний;

$k_{0нб}$ — коэффициент небаланса, принимается равным 0,05 при значении тока $I_{кач}$, не превышающем значения (2—3) $\cdot I_{номТТ}$, при больших кратностях тока $I_{кач}$ значение коэффициента $k_{0нб}$ принимается из диапазона 0,05-0,1.

В случаях, когда устройство БК при расчете $I_{0нб\ кач}$ по формуле (10.8) не удовлетворяет требованиям чувствительности при двухфазном КЗ на землю, значение $I_{0нб\ кач}$ следует определять более точно с использованием кривых намагничивания стали ТТ.



$I_р$ — ток в обмотке реле РН; $I_{с.р}$ — ток срабатывания реле РН; $3I_0$ — утроенный ток нулевой последовательности; U_2 — фазное напряжение обратной последовательности

Рисунок 10.1 — Характеристики чувствительности устройства БК типа КРБ-121

Примечание — Уставки по $3I_0$ и значения токов $3I_0$ даны для исполнения устройства на номинальный ток 5 А.

10.2.3 Проверка чувствительности

Чувствительность устройства БК типа КРБ-121, КРБ-123, КРБ-125 проверяется при КЗ в конце зоны действия блокируемых при качаниях ступеней ДЗ, а также в конце зоны действия неблокируемых ступеней ДЗ, ввод в действие которых осуществляется устройством БК.

Требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени с охватом защищаемой ЛЭП: $k_ч \geq 1,5$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени, осуществляющей функции дальнего резервирования: $k_ч \geq 1,2$.

10.2.3.1 Проверка чувствительности устройства БК, когда ток $3I_0$ не используется, проводится по формуле

$$k_ч = \frac{U_{2кз\ мин}}{U_{2уст}}, \quad (10.9)$$

где $U_{2кз\ мин}$ — минимальное вторичное значение напряжения обратной последовательности в месте установки защиты в расчетном по чувствительности режиме;

$U_{2уст}$ — уставка пуска по напряжению обратной последовательности.

В рассматриваемом случае проверка чувствительности проводится при двухфазном КЗ на землю.

В качестве расчетного для проверки чувствительности должен быть принят такой режим, при котором напряжение обратной последовательности в месте установки защиты $U_{2кз\ мин}$ наименьшее.

10.2.3.2 Проверка чувствительности устройства БК, когда ток $3I_0$ используется в устройстве, проводится при двухфазном КЗ и двухфазном КЗ на землю.

Проверка чувствительности устройства БК при двухфазном КЗ на землю проводится для минимальных значений $U_{2кз\ мин}$ и $3I_{0кз\ мин}$ в месте установки защиты и принятых уставок $U_{2уст}$ и $3I_{0уст}$ по кривым чувствительности (рисунок 10.1).

10.2.3.3 При согласовании по чувствительности сопротивлений срабатывания ступеней защиты 1 ЛЭП Л-1 и защиты 2 ЛЭП Л-2 (рисунок 10.2) необходимо проверить чувствительность устройства БК защиты 2 при КЗ в конце зоны действия ступени, с которой проводится согласование. Такая проверка необходима для предотвращения неправильного срабатывания ступени защиты 1 при КЗ в конце зоны действия ступени защиты 2 и отказе последней в действии в связи с недостаточной чувствительностью устройства БК.

При согласовании второй ступени защиты 1 с первой ступенью защиты 2 проверку проводить не требуется. Это обусловлено тем, что требуемая чувствительность устройства БК для защиты 2 должна быть обеспечена при КЗ в конце защищаемой ЛЭП, то есть необходимая по условию селективности согласуемых защит чувствительность БК первой ступени защиты 2 при КЗ в конце зоны действия ступени обеспечивается с запасом.

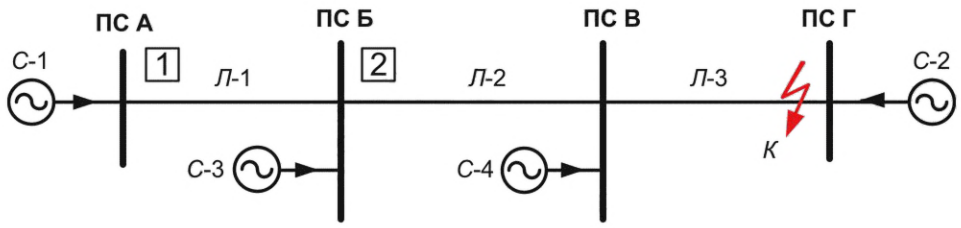


Рисунок 10.2 — Пример схемы сети ЛЭП с двусторонним питанием для расчета уставок устройства БК

10.2.4 Примеры расчета параметров настройки и проверки чувствительности устройства БК типа КРБ-121

Примеры

1 Ток $3I_0$ в устройстве БК не используется.

Исходные данные:

Расчетное значение вторичного напряжения обратной последовательности, от которого должно быть отстроено устройство БК, принято:

$$U_{2расч} = 2\ В.$$

Вторичное напряжение обратной последовательности при двухфазном КЗ на землю в конце зоны действия рассматриваемой ступени в расчетном по чувствительности режиме:

$$U_{2кз}^{(1,1)} = 3\ В.$$

Расчет уставки пуска по напряжению обратной последовательности по неравенству (10.1):

$$U_{2\ с.р.} \geq \frac{k_н}{k_в} U_{2расч} = \frac{1,2}{0,8} \cdot 2 = 3\ В.$$

Принимается: $U_{2уст} = 3$ В.

Проверка чувствительности по формуле (10.9):

$$k_ч = \frac{U_{2кз}^{(1,1)}}{U_{2уст}} = \frac{3}{3} = 1,0 < 1,5.$$

Устройство БК не удовлетворяет требованию чувствительности, необходимо использование в устройстве тока $3I_0$.

2 Ток $3I_0$ используется в устройстве.

Исходные данные:

Расчетное значение вторичного напряжения обратной последовательности, от которого должно быть отстроено устройство БК (в режиме нагрузки и в режиме качаний), принято:

$$U_{2расч} = 2\ В.$$

Расчетное значение вторичного утроенного тока нулевой последовательности, от которого должно быть отстроено устройство БК в режиме качаний, принято:

$$3I_{0расч} = 0{,}5\ А.$$

При двухфазном КЗ на землю в конце зоны действия рассматриваемой ступени ДЗ в расчетном по чувствительности режиме:

$$U_{2кз}^{(1,1)} = 3\ В;$$

$$3I_{0кз}^{(1,1)} = 2\ А.$$

При двухфазном КЗ в конце зоны действия рассматриваемой ступени ДЗ в расчетном по чувствительности режиме:

$$U_{2кз}^{(2)} = 5\ В.$$

Расчет уставок устройства БК.

Из рассмотрения кривых чувствительности (рисунок 10.1) следует, что при $U_{2расч} = 2$ В и $3I_{0расч} = 0{,}5$ А неравенство (10.5) удовлетворяется при $U_{2уст} = 3$ В и $3I_{0уст} = 2$ А (рисунок 10.3), при этом отношение:

$$\frac{I_{р.расч}}{I_{с.р}} \approx 0{,}7.$$

Принимается: $U_{2уст} = 3$ В, $3I_{0уст} = 2$ А.

Проверка чувствительности.

При двухфазном КЗ на землю по кривой чувствительности (рисунок 10.3) для $U_{2уст} = 3$ В, $3I_{0уст} = 2$ А при $U_{2кз}^{(1,1)} = 3$ В, $3I_{0кз}^{(1,1)} = 2$ А получаем:

$$\frac{I_р}{I_{с.р}} \approx 1{,}6.$$

При замыкании между двумя фазами в соответствии с формулой (10.9):

$$k_ч = \frac{U_{2кз}^{(2)}}{U_{2уст}} = \frac{5}{3} = 1{,}66.$$

Устройство удовлетворяет требованиям чувствительности.

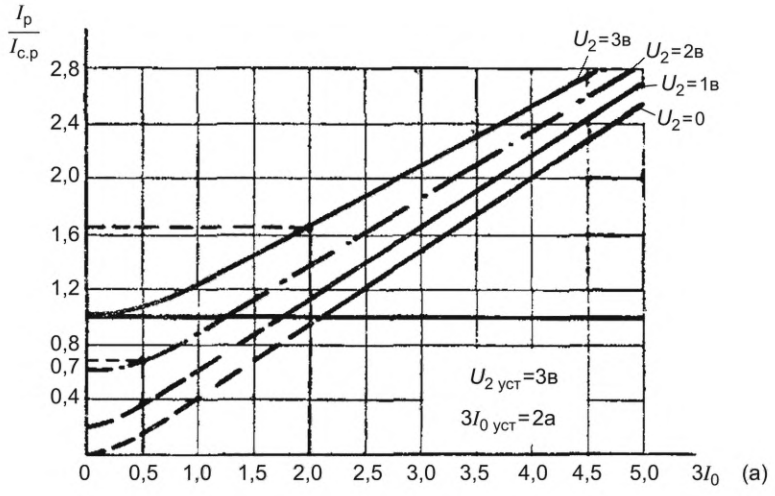


Рисунок 10.3 — Характеристики чувствительности устройства БК при качаниях типа КРБ-121

10.3 Расчет параметров настройки устройств БК с пуском по току обратной и току нулевой последовательности (КРБ-122, КРБ-124, КРБ-126)

Устройство БК типа КРБ-122, КРБ-124, КРБ-126 относится к группе I и широко применяется в разветвленных сетях с мощными источниками питания.

При КЗ в конце длинных ЛЭП, отходящих от маломощного источника питания, устройство БК данного типа может оказаться нечувствительным.

На ЛЭП, питающих тяговые ПС переменного тока, устройство БК приходится загрублять для отстройки от токов обратной последовательности, обусловленных несимметричной нагрузкой.

В устройствах БК данного типа используются комбинированные пусковые органы, реагирующие на величину $|\underline{I}_2| + |k\underline{I}_0|$ и имеющие торможение от фазного тока.

В устройстве задаются (см. таблицу 10.2) следующие параметры настройки (уставки):

- $I_{2уст}$ — пуск по току обратной последовательности;
- $3I_{0уст}$ — пуск по утроенному току нулевой последовательности;
- $k_{торм}$ — коэффициент торможения.

Расчет параметров настройки устройства БК данного типа проводится на основании характеристик срабатывания и кривых чувствительности, приведенных в информации завода-изготовителя. При достаточной чувствительности пуска по $I_{2уст}$, пуск по $3I_{0уст}$ может не использоваться.

Таблица 10.2 — Диапазон значений параметров настройки устройств БК

Параметр	Диапазон значений		
	КРБ-122	КРБ-124	КРБ-126
$I_{2уст}$, А (вторичных)	0,5; 0,75; 1,0 для исполнения на номинальный ток 5 А. 0,1; 0,15; 0,2 А для исполнения на номинальный ток 1 А	0,5; 0,75; 1,0 А для исполнения на номинальный ток 5 А. 0,1; 0,15; 0,2 А для исполнения на номинальный ток 1 А	0,5; 0,75; 1,0; 1,5 А для исполнения на номинальный ток 5 А. 0,1; 0,15; 0,2; 0,3 А для исполнения на номинальный ток 1 А
$3I_{0уст}$, А (вторичных)	1,0; 1,5; 2,0 А для исполнения на номинальный ток 5 А. 0,2; 0,3; 0,4 А для исполнения на номинальный ток 1 А	1,0; 1,5; 2,0 А для исполнения на номинальный ток 5 А. 0,2; 0,3; 0,4 А для исполнения на номинальный ток 1 А	1,5; 3,0; 6,0 А для исполнения на номинальный ток 5 А. 0,3; 0,6; 1,2 А для исполнения на номинальный ток 1 А
$k_{торм}$, % при минимальной уставке $I_{2уст}$	5; 7,5; 10	5; 7,5; 10	4; 7,0; 11

Характеристика срабатывания пускового реле, показывающая зависимость тока срабатывания от величины тормозного тока $I_{торм}$ и коэффициента торможения, приближенно определяется по формуле

$$I_{2с.р} = k_{торм} I_{торм} + I_{2уст} = \frac{k_{торм}}{100\ \%} \frac{I_{2уст}}{I_{2уст\ мин}} I_{торм} + I_{2уст}, \qquad (10.10)$$

где $I_{2с.р}$ — расчетный ток обратной последовательности, при котором происходит срабатывание пускового реле при наличии торможения;

$I_{торм}$ — тормозной ток;

$I_{2уст}$ — уставка тока срабатывания пускового реле;

$I_{2уст\ мин}$ — минимальная уставка тока срабатывания пускового реле;

$k_{торм}$ — коэффициент торможения (%).

С учетом отличия расчетов для случаев использования и неиспользования в устройстве БК тока $3I_0$ расчет параметров настройки и проверка чувствительности рассматриваются отдельно для каждого случая, расчеты проводятся во вторичных величинах.

Порядок расчета приводится для устройства БК типа КРБ-122, расчет параметров настройки КРБ-124 и КРБ-126 проводится аналогично.

10.3.1 Расчет уставок устройства БК, когда ток $3I_0$ не используется в устройстве

Ток срабатывания устройства выбирается по условию отстройки от суммарного тока обратной последовательности, определяемого в следующих режимах:

- в расчетном нагрузочном режиме:

$$I_{2\text{с.р.нагр}} \geq \frac{k_\text{н}}{k_\text{в}} I_{2\text{расч.нагр}}, \tag{10.11}$$

где $I_{2\text{расч.нагр}}$ — расчетное значение тока обратной последовательности в нагрузочном режиме, от которого должно быть отстроено устройство БК, определяется по формуле (10.12);

$k_\text{н}$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_\text{в}$ — коэффициент возврата, ориентировочно принимается равным 0,8.

$$I_{2\text{расч.нагр}} = I_{2\text{нб.нагр}} + I_{2\text{н.р.нагр}}, \tag{10.12}$$

где $I_{2\text{нб.нагр}}$ — ток небаланса фильтра тока обратной последовательности в расчетном нагрузочном режиме;

$I_{2\text{н.р.нагр}}$ — ток обратной последовательности в расчетном нагрузочном режиме, обусловленный несимметрией в системе;

- в режиме качаний:

$$I_{2\text{с.р.кач}} \geq k_\text{н} I_{2\text{расч.кач}}, \tag{10.13}$$

где $I_{2\text{расч.кач}}$ — расчетное значение тока обратной последовательности в режиме качаний, от которого должно быть отстроено устройство БК, определяется по формуле (10.14);

$k_\text{н}$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2.

$$I_{2\text{расч.кач}} = I_{2\text{нб.кач}} + I_{2\text{н.р.кач}}, \tag{10.14}$$

где $I_{2\text{нб.кач}}$ — ток небаланса фильтра тока обратной последовательности (отнесенный ко входу фильтра) в режиме качаний;

$I_{2\text{н.р.кач}}$ — ток обратной последовательности в режиме качаний, обусловленный несимметрией в системе.

Значения токов $I_{2\text{нб.нагр}}$ и $I_{2\text{нб.кач}}$ в (10.12) и (10.14) могут быть рассчитаны в предположении совпадения по фазе отдельных слагающих токов небаланса:

$$I_{2\text{нб}} = \left(k_{\text{сх}} \frac{\Delta I\%}{100} + k_{fi} \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta\Phi\%}{100} \right) I, \tag{10.15}$$

где I — максимальный фазный ток в рассматриваемом режиме;

$k_{\text{сх}}$ — коэффициент принимается равным 1/3 для расчетных условий, когда один из ТТ имеет наибольшую погрешность, а два других работают без погрешности, при подключении устройства БК к ТТ, соединенным в полную звезду с нулевым проводом;

$\Delta I\%$ — относительная погрешность ТТ:

- для нагрузочного режима принимается равной 3 %;
- при качаниях погрешность принимается равной 10 %, если ток качаний не превосходит тока, соответствующего кривым кратностей при 10 % погрешности ТТ, или определяется точнее по кривым намагничивания ТТ;

k_{fi} — коэффициент, рекомендуемое значение принимается равным 0,5;

Δf — абсолютное значение отклонения частоты сети:

- для нагрузочного режима принимается равным 1 Гц с учетом возможного длительного снижения частоты в эксплуатационных условиях;
- для режима качаний ориентировочно принимается равным 3 Гц;

f — номинальная частота сети, равная 50 Гц;

$\Delta\Phi\%$ — небаланс, обусловленный неточностью настройки фильтра:

- при токе, не превышающем значения $2I_{\text{ном}}$, принимается 1 %;
- при токе, равном $(2\text{-}10)I_{\text{ном}}$ определяется по формуле

$$\Delta\Phi\% = 5 \cdot \frac{I}{10 I_{\text{ном}}}. \tag{10.16}$$

Подставляя в неравенства (10.11) и (10.13) приведенные выше значения входящих в них величин с учетом формул (10.15) и (10.16), получаем:

- в нагрузочном режиме:

$$I_{2\text{расч.нагр}} = 0{,}03I_{\text{раб макс}} + I_{2\text{н.р.нагр}}; \tag{10.17}$$

$$I_{2\text{с.р.нагр}} \geq \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{в}}}\left(0{,}03I_{\text{раб макс}} + I_{2\text{н.р.нагр}}\right), \tag{10.18}$$

где $I_{\text{раб макс}}$ — максимальный рабочий ток нагрузочного режима ЛЭП;

- в режиме качаний (в предположении, что $\Delta I\% = 10\ \%$):

$$I_{2\text{расч.кач}} = (0{,}063 + 0{,}005I_{*\text{кач}})\, I_{\text{кач}} + I_{2\text{н.р.кач}}; \tag{10.19}$$

$$I_{2\ \text{с.р.кач}} \geq k_{\text{н}}[(0{,}063 + 0{,}005I_{*\text{кач}})\, I_{\text{кач}} + I_{2\text{н.р.кач}}], \tag{10.20}$$

где $I_{*\text{кач}}$ — кратность тока качаний по отношению к номинальному току ТТ.

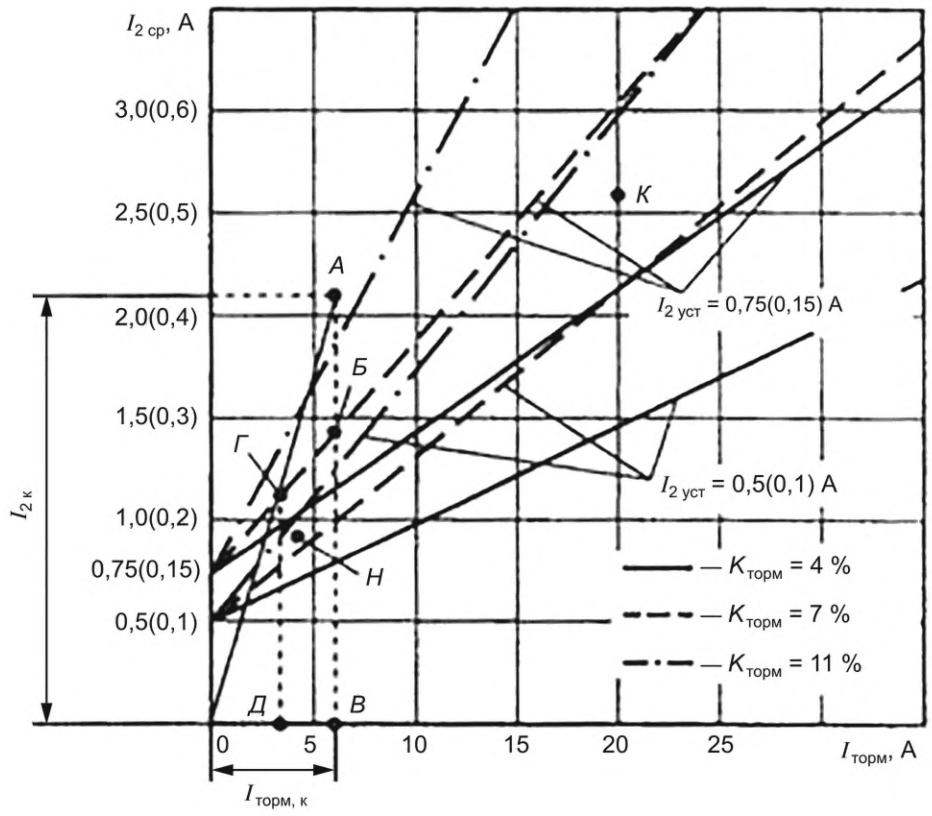


Рисунок 10.4 — Характеристики срабатывания устройства БК типа КРБ-122

Примечание — Цифры, показанные в скобках, относятся к исполнению на $I_{\text{ном}}$ = 1А.

Выбор уставок устройства БК $I_{2\ \text{уст}}$ и $k_{\text{торм}}$ проводится с помощью рисунка 10.4 в следующем порядке.

На плоскость ($I_{2\ \text{с.р}}$, $I_{\text{торм}}$) наносятся точки К и Н, ординаты которых соответствуют значениям $I_{2\text{с.р.}}$, определенным для режима качаний и режима нагрузки по неравенствам (10.20) и (10.18) соответственно, а абсциссы определяются током торможения $I_{\text{торм}}$ в рассматриваемом режиме. Положение указанных точек на плоскости координат должно соответствовать наиболее тяжелым условиям для выбора характеристики срабатывания.

В качестве расчетного нагрузочного режима (точка Н) следует принимать режимы с максимальным значением тока $I_{2\text{н.р.нагр}}$ и минимальным значением тока $I_{\text{нагр}}$; в качестве расчетного режима качаний (точка К) следует принять режим, характеризуемый максимальным значением тока $I_{\text{кач}}$.

Дополнительно следует учитывать, что в рассматриваемых режимах в качестве тока торможения $I_{торм}$ должен приниматься ток, равный наименьшему возможному току в фазе А (поскольку в данном устройстве торможение обеспечивается током этой фазы).

В качестве вариантов уставок принимаются значения $I_{2уст}$ и $k_{торм}$, соответствующие характеристикам срабатывания, ближайшим к точкам К и Н и проходящим не ниже обеих этих точек. При наличии нескольких вариантов возможных уставок лучший вариант может быть принят при проверке чувствительности устройства.

Для ЛЭП, питающих тяговые ПС на переменном токе, при отсутствии данных о значениях тока обратной последовательности, обусловленного несимметричной нагрузкой, величину $I_{2н.р.нагр}$ допустимо определять по номинальной мощности Т, установленных на ПС, по формуле

$$I_{2н.р.нагр} = m \cdot 0{,}38 \frac{k_п k_т S_н}{\sqrt{3} U_н}, \quad (10.21)$$

где m — число Т на ПС;

$k_п$ — коэффициент, учитывающий допустимую перегрузку обмоток двух наиболее загруженных фаз Т за счет недогрузки третьей фазы, принимается равным 1,1;

$k_т$ — коэффициент, учитывающий долю тяговой нагрузки в общей нагрузке Т;

$S_н$ — номинальная мощность Т;

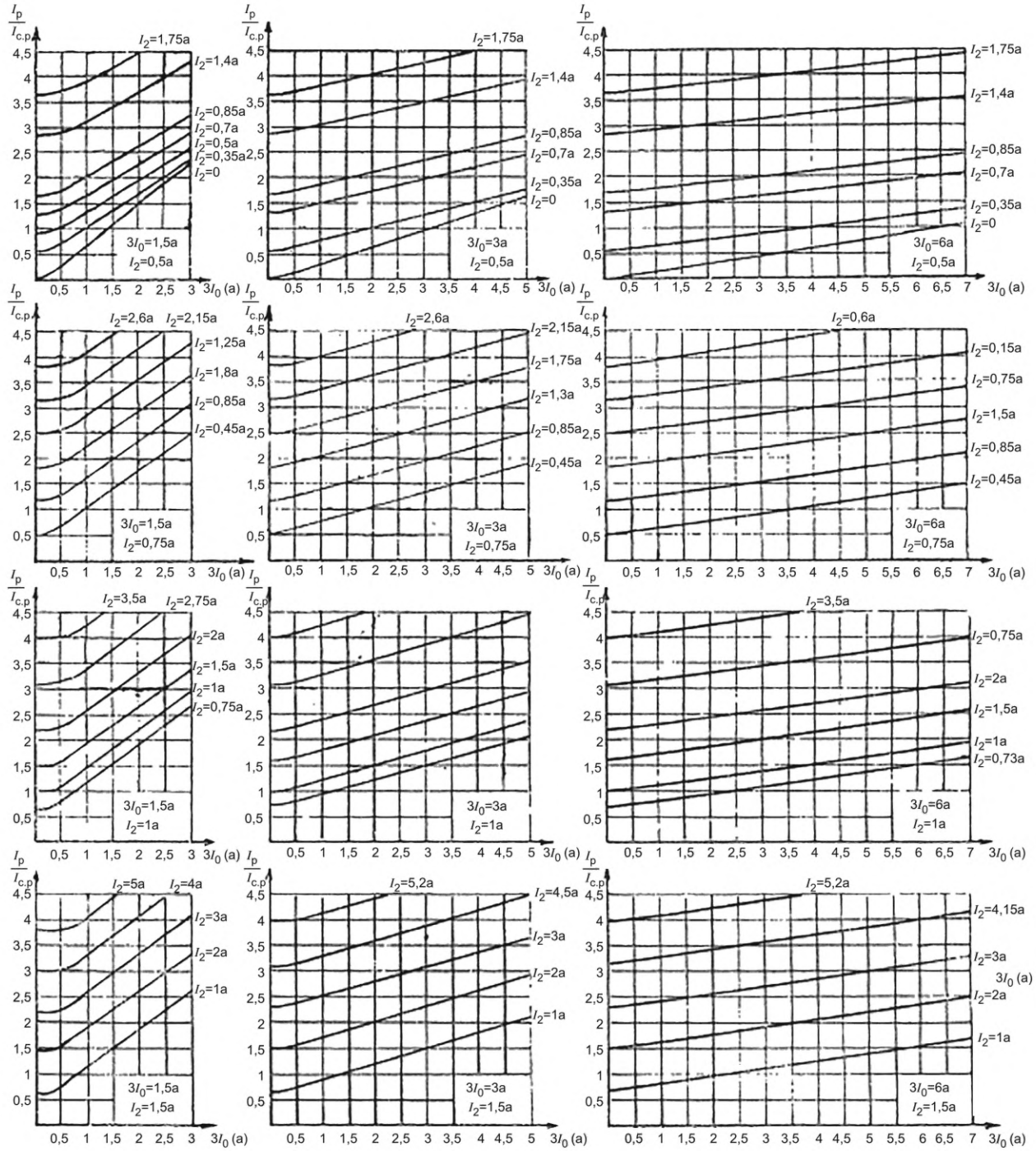
$U_н$ — номинальное напряжение обмотки ВН Т.

10.3.2 Выбор параметров настройки устройства БК, когда ток $3I_0$ используется в устройстве

Комбинированные пусковые органы $|\underline{I}_2| + |k\underline{I}_0|$ позволяют повысить чувствительность устройства БК при двухфазных КЗ на землю и должны применяться, если расчетом выявлена недостаточная чувствительность пуска по току обратной последовательности при двухфазных КЗ на землю.

Использование тока $3I_0$ в устройстве может привести к увеличению уставок $I_{2уст}$ или $k_{торм}$ по сравнению со случаем неиспользования тока $3I_0$, а значит, и к снижению чувствительности при замыканиях между двумя фазами. Указанное увеличение уставок может оказаться необходимым для отстройки устройства от тока небаланса в нулевом проводе ТТ защиты в нагрузочном режиме или в режиме качаний.

Расчет устройства БК при использовании токов I_2 и $3I_0$ и наличии торможения проводится из уравнения характеристики срабатывания устройства (10.11) и кривых чувствительности (рисунок 10.5) из заводской информации на устройство БК, дающих кратности тока в поляризованном реле (ПР) к току его срабатывания в зависимости от значений токов I_2 и $3I_0$ в защите при заданных уставках $I_{2уст}$ и $3I_{0уст}$.



$I_р$— ток в обмотке реле; $I_{(с.р)}$ — ток срабатывания реле; I_2 — ток обратной последовательности; $3I_0$ — утроенный ток нулевой последовательности

Рисунок 10.5 — Характеристики чувствительности устройства БК типа КРБ-122

Примечание — Уставки по токам $I_{2уст}$ и $3I_{0уст}$ и значения токов I_2 и $3I_0$ даны для исполнения устройства на номинальный ток 5 А.

На основании кривых рисунка 10.5 для уставок $I_{2уст}$ и $3I_{0уст}$ токи в устройстве I_2 и $3I_0$ могут быть заменены одним эквивалентным током обратной последовательности $I_{2экв}$ (обусловливающим при данной уставке $I_{2уст}$ такую же кратность момента на реле, как и при совместном действии токов I_2 и $3I_0$).

Этот ток $I_{2экв}$ может быть определен исходя из кратности тока на реле при рассматриваемых значениях подводимых к реле токов I_2 и $3I_0$ в соответствии с соотношением:

$$\frac{I_{2экв}}{I_{2уст}} = \frac{I_р}{I_{с.р}}. \quad (10.22)$$

Тогда для случая $I_0 \neq 0$ уравнение срабатывания устройства (10.10) примет вид:

$$I_{2экв.с.р} = k_{торм} I_{торм} + I_{2уст}. \quad (10.23)$$

Формула (10.23) является уравнением характеристики срабатывания устройства БК в общем виде, представленным графически на рисунке 10.4.

В случае использования в устройстве тока $3I_0$ при определении расчетного тока срабатывания устройства в режимах, указанных в 10.3.1, следует учитывать влияние токов, протекающих через нулевой провод ТТ защиты.

В этом случае ток срабатывания устройства $I_{с.р}$ взамен неравенств (10.11) и (10.13) следует определять по неравенствам:

$$I_{2с.р.нагр} \geq \frac{k_н}{k_в} I_{2экв.нагр}; \quad (10.24)$$

$$I_{2с.р.кач} \geq k_н I_{2экв.кач}, \quad (10.25)$$

в которых ток $I_{2экв}$ как результирующий двух слагаемых $I_{2расч}$ и $3I_{0расч}$ подлежит определению по кривым чувствительности (рисунок 10.5).

Расчетные токи $I_{2расч}$ определяются для соответствующих режимов по формулам (10.12) и (10.14).

Ток $3I_{0расч}$ для режима нагрузки определяется по формуле

$$3I_{0расч} = I_{0нб} + 3I_{0н.р}, \quad (10.26)$$

где $I_{0нб}$ — ток небаланса в нулевом проводе ТТ в рассматриваемом режиме;

$3I_{0н.р}$ — ток нулевой последовательности, обусловленный несимметрией в системе, если такая несимметрия имеется.

Ток $I_{0нб}$ приближенно может быть определен:

- для режима нагрузки, если ток нагрузки не превышает значения номинального тока ТТ:

$$I_{0нб\ нагр} = (0{,}03\text{-}0{,}05) I_{нагр}; \quad (10.27)$$

- для режима качаний, если ток качаний не превосходит предельной кратности первичного тока ТТ при 10 %-ной погрешности:

$$I_{0нб\ кач} = 0{,}05 I_{кач}. \quad (10.28)$$

В случаях, когда устройство БК при определении $I_{0нб\ кач}$ по (10.28) не удовлетворяет требованиям чувствительности при двухфазном КЗ на землю, значение $I_{0нб\ кач}$ следует определять более точно с использованием кривых намагничивания стали ТТ.

Ввиду того, что использование кривых (рисунок 10.5) для определения $I_{2экв}$ в неравенствах (10.24) и (10.25) возможно только при известных уставках $I_{2уст}$ и $3I_{0уст}$, целесообразно принять следующий порядок расчета:

- для уставок $I_{2уст}$ и $k_{торм}$, принятых по предварительному расчету (на основании которого выявилась недостаточная чувствительность устройства к двухфазным КЗ на землю при неиспользовании тока $3I_0$), и наибольшей уставки $3I_{0уст}$ проверяется согласно 10.3.3, чувствительность устройства к двухфазным КЗ на землю; если при этом требование чувствительности не удовлетворяется, то уставка $3I_{0уст}$ соответственно уменьшается;

- на основании уставок $I_{2уст}$ и $3I_{0уст}$ и токов $I_{2расч.кач}$ и $3I_{0расч.кач}$, найденных по формулам (10.14) и (10.28) для режима качаний с помощью кривых чувствительности (рисунок 10.5), определяется отношение $I_р / I_{с.р.}$, ток $I_{2экв.кач}$, эквивалентный току обратной последовательности при уставке $I_{2уст}$, может быть определен по преобразованному неравенству (10.25):

$$I_{2экв} \geq \frac{I_р}{I_{с.р}} I_{2уст}; \quad (10.29)$$

- по неравенству (10.25) определяется ток $I_{2с.р.кач}$ и при принятых $I_{2уст}$ и $k_{торм}$ по характеристике (рисунок 10.4) проверяется условие отстройки от режима качаний с учетом торможения. Если это

условие удовлетворяется, то проводится аналогичная проверка для нагрузочного режима, исходя из $I_{с.р.нагр}$, определяемого по (10.24). В противном случае уставки $I_{2уст}$ и $k_{торм}$ пересматриваются в соответствии с рассчитанным по неравенству (10.24) значением $I_{с.р.нагр}$ и расчет проводится вновь.

При использовании приведенных на рисунке 10.5 заводских характеристик чувствительности БК типа КРБ-122 (КРБ-124, КРБ-126) при больших расчетных значениях токов обратной и нулевой последовательностей следует использовать экстраполяцию этих характеристик.

10.3.3 Проверка чувствительности устройства БК

Чувствительность устройств БК типа КРБ-122, КРБ-124, КРБ-126 необходимо проверять при КЗ в конце зоны действия блокируемых при качаниях ступеней ДЗ, а также в конце зоны действия неблокируемых ступеней ДЗ, ввод в работу которых обеспечивается устройством БК.

10.3.3.1 Графическая проверка чувствительности устройства БК

На плоскость ($I_{2с.р.}$, $I_{торм}$) рисунка 10.4 наносится точка А, соответствующая току $I_{2кз}$ и тормозному току $I_{торм.кз}$, определенным при металлическом КЗ в расчетных по чувствительности условиях.

Прямая ОА, соединяющая точку А с началом координат, является геометрическим местом точек, соответствующих рассматриваемому случаю КЗ через различные переходные сопротивления.

Определяется точка Г пересечения прямой ОА с характеристикой срабатывания устройства $I_{2с.р} = f(I_{*торм})$, соответствующей выбранным уставкам $I_{2уст}$ и $k_{торм}$ и точка Б пересечения характеристики срабатывания с проведенным из точки А перпендикуляром АВ к оси абсцисс.

Определяются коэффициенты чувствительности:

$$k_ч = \frac{АВ}{ГД} \text{ и } k'_ч = \frac{АВ}{БВ}. \quad (10.30)$$

Определение, помимо коэффициента чувствительности $k_ч$, также и коэффициента чувствительности $k'_ч$ целесообразно для учета возможных погрешностей в определении токов $I_{2кз}$ и $I_{торм}$, а также возможного смещения характеристики срабатывания из-за погрешностей устройства.

10.3.3.2 Для схем, в которых для ввода в работу ступеней ДЗ необходимо срабатывание устройства БК, требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени с охватом защищаемой ЛЭП: $k_ч \geq 1,5$ и $k'_ч \geq 1,1$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени, осуществляющей функции дальнего резервирования: $k_ч \geq 1,2$ и $k'_ч \geq 1,1$.

10.3.3.3 Для схем, в которых ввод в работу чувствительных ступеней ДЗ возможен без срабатывания устройства БК, чувствительность проверяется:

- при блокировании только первой ступени ДЗ при несимметричном КЗ в конце зоны первой ступени;
- при блокировании первой и второй ступеней ДЗ при несимметричном КЗ в конце защищаемой ЛЭП и на шинах отпаечных ПС.

В обоих случаях требуется обеспечить коэффициент чувствительности $k_ч \geq 1,5$.

10.3.3.4 Устройство БК должно удовлетворять требованиям чувствительности при несимметричных КЗ.

Чувствительность проверяется:

- при неиспользовании тока $3I_0$ только при двухфазном КЗ на землю;
- при использовании тока $3I_0$ при двухфазном КЗ на землю и двухфазном КЗ, так как использование тока $3I_0$ повышает чувствительность и при двухфазных КЗ.

10.3.3.5 В качестве расчетных режимов для проверки чувствительности принимаются режимы с минимальными значениями токов обратной и нулевой последовательности $I_{2кз}$ и $3I_{0кз}$ в месте установки защиты при минимальных отношениях тока в рабочей обмотке реле к току в тормозной его обмотке.

Значения тормозного тока $I_{торм.\ кз}$ при расчете чувствительности устройства БК определяются в тех же расчетных режимах, что и минимальные значения токов $I_{2кз}$ и $3I_{0кз}$ в защите, и принимаются равными максимальному току в одной из поврежденных фаз.

Учитывая, что расчетным при проверке чувствительности является минимальное отношение тока в рабочей обмотке реле к току в тормозной его обмотке, тормозной ток при токах нагрузки, соизмеримых с токами КЗ, следует определять с учетом нагрузки.

10.3.3.6 Расчет чувствительности устройства при двухфазном КЗ на землю в случае, когда в устройстве используется ток $3I_0$, проводится исходя из значения эквивалентного тока обратной последовательности $3I_{2экв\ кз}$ в следующем порядке:

- для заданных уставок $I_{2уст}$ и $3I_{0уст}$ и значений токов в защите $I_{2кз}$ и $3I_{0кз}$ по кривым чувствительности (рисунок 10.5) определяется отношение $I_р$ / $I_{с.р.}$;

- по неравенству (10.29) определяется эквивалентный минимальный ток обратной последовательности в защите $I_{2экв\ кз}$;

- для тока $I_{2экв\ кз}$ и тормозного тока $I_{торм.кз}$ на плоскость ($I_{2с.р}$, $I_{торм}$) (рисунок 10.4) наносится точка А, которая соединяется с началом координат;

- определяются коэффициенты чувствительности:

$$k_ч = \frac{АВ}{ГД} \text{ и } k'_ч = \frac{АВ}{БВ}.$$

10.3.3.7 Расчет чувствительности устройства допускается выполнить аналитически с помощью расчетных выражений, выведенных на основании рисунка 10.6.

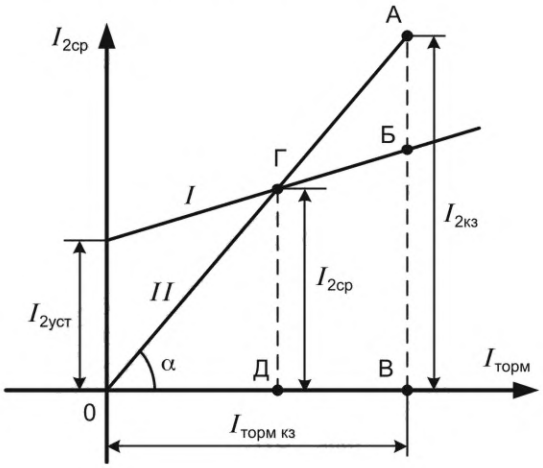


Рисунок 10.6 — Проверка чувствительности устройств БК типов КРБ-122, КРБ-124, КРБ-126

На плоскость ($I_{2с.р}$, $I_{торм}$) указанного рисунка нанесена точка А, соответствующая минимальному току $I_{2к.з}$ и тормозному току $I_{торм.кз}$ в защите, определенным при металлическом КЗ в расчетных по чувствительности условиях, и характеристика срабатывания устройства — прямая I, которая удовлетворяет формуле (10.10). Прямой II, соединяющей точку А с началом координат, соответствуют уравнения:

$$I_2 = \text{tg}\alpha I_{торм}, \tag{10.31}$$

$$\text{tg}\alpha = \frac{АВ}{ОВ} = \frac{I_{2кз}}{I_{торм.кз}}. \tag{10.32}$$

Из формул (10.10) и (10.31) с учетом формулы (10.32) формула для $k_ч$:

$$k_ч = \frac{АВ}{ГД} = \frac{I_{2кз} - k_{торм} I_{торм.кз}}{I_{2уст}}, \tag{10.33}$$

где $I_{2кз}$ и $I_{торм.кз}$ — минимальный ток обратной последовательности и соответствующий ему тормозной ток в месте установки защиты в расчетных по чувствительности условиях;

$I_{2уст}$, $k_{торм}$ — уставки по току обратной последовательности и коэффициенту торможения.

Из рисунка 10.6 следует выражение для коэффициента чувствительности $k'_ч$:

$$k'_ч = \frac{АВ}{БВ} = \frac{I_{2кз}}{k_{торм} I_{торм.кз} + I_{2уст}}. \tag{10.34}$$

Формулы (10.33) и (10.34) следует использовать для определения чувствительности при двухфазном КЗ, а также при двухфазном КЗ на землю в случае, когда в устройстве не используется ток $3I_0$.

Расчет чувствительности при двухфазном КЗ на землю в случае, когда в устройстве БК используется ток $3I_0$, проводится по формулам, составленным аналогично формулам (10.33) и (10.34):

$$k_{ч} = \frac{I_{2экв.кз} - k_{торм} I_{торм.кз}}{I_{2уст}}, \quad (10.35)$$

$$k'_{ч} = \frac{I_{2экв.кз}}{k_{торм} I_{торм.кз} + I_{2уст}}, \quad (10.36)$$

где $I_{2экв\ кз}$ — эквивалентный ток обратной последовательности в защите в расчетных по чувствительности условиях, определяется по неравенству (10.29), исходя из кривых чувствительности (рисунок 10.5) для принятых уставок $I_{2уст}$ и $3I_{0уст}$ и чувствительности устройства КРБ-122.

Примеры

1. Ток $3I_0$ в устройстве БК не используется.

Исходные данные:

В расчете приняты следующие вторичные токи в цепях защиты:

- в нагрузочном режиме:

$$I_{ФА} = I_{торм} = 2{,}0\ А,\ I_{ФВ} = I_{ФС} = 3{,}8\ А;$$

$$I_{2н.р.нагр} = 0{,}6\ А$$

- в режиме качаний:

$$I_{2н.р.кач} = 0{,}6\ А,\ I_{ФА} \approx I_{ФВ} \approx I_{ФС} \approx 20\ А.$$

При двухфазном КЗ на землю в расчетной по чувствительности точке (в конце зоны резервирования) ток обратной последовательности в рассматриваемой защите $I_{2кз}^{(1,1)} = 2{,}2$ А при наибольшем токе в фазе (с учетом нагрузки) $I_{ф}^{(1,1)} = I_{торм} = 6$ А.

Расчет селективности и проверка чувствительности.

В связи с тем, что при исходных данных рассматриваемого примера не могут быть использованы рекомендации по упрощенному расчету, ниже расчет проводится в полном объеме.

Расчет селективности проводится с помощью неравенств (10.18) и (10.20) и характеристик срабатывания устройства БК на рисунке 10.7.

Результаты расчета отражены в таблице 10.3.

Для полученных значений $I_{с.р\ кач}$ и $I_{с.р\ нагр}$ (таблица 10.3, позиции 1, 2) и соответствующих им значений тормозных токов $I_{торм}$ на график наносятся точки К и Н.

Как видно из указанного рисунка, наиболее близко по отношению к точкам К и Н (по сравнению с остальными прямыми, проходящими выше этих точек) проходят прямая I, которой соответствует уставка $I_{2уст} = 0{,}75$ А и $k_{торм} = 0{,}15$ (вариант I), и прямая II, которой соответствует уставка $I_{2уст} = 1{,}0$ А и $k_{торм} = 0{,}1$ (вариант II) (уставки $k_{торм}$ получены с помощью данных таблицы 10.3).

Оптимальный вариант уставок выясняется в результате проверки чувствительности при двухфазном замыкании на землю. Проверка чувствительности устройства проводится для сравнения двумя способами — графическим (по рисунку 10.6) и аналитическим — по формулам (10.33) и (10.34).

На основании этих расчетов, приведенных также в таблице 10.3, приняты уставки, соответствующие варианту I, как обеспечивающие чувствительность по основному условию (10.35) большую, чем по варианту II.

Проверка чувствительности для случая КЗ в конце защищаемого участка проводится аналогично.

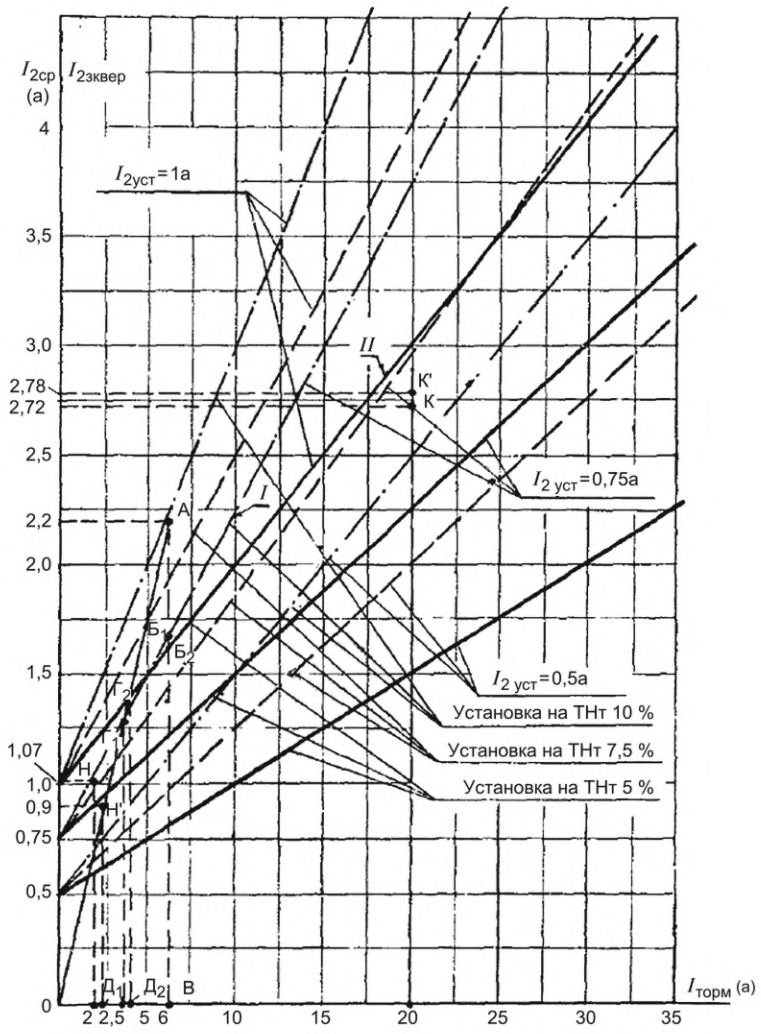


Рисунок 10.7 — Расчет устройства БК типа КРБ-122

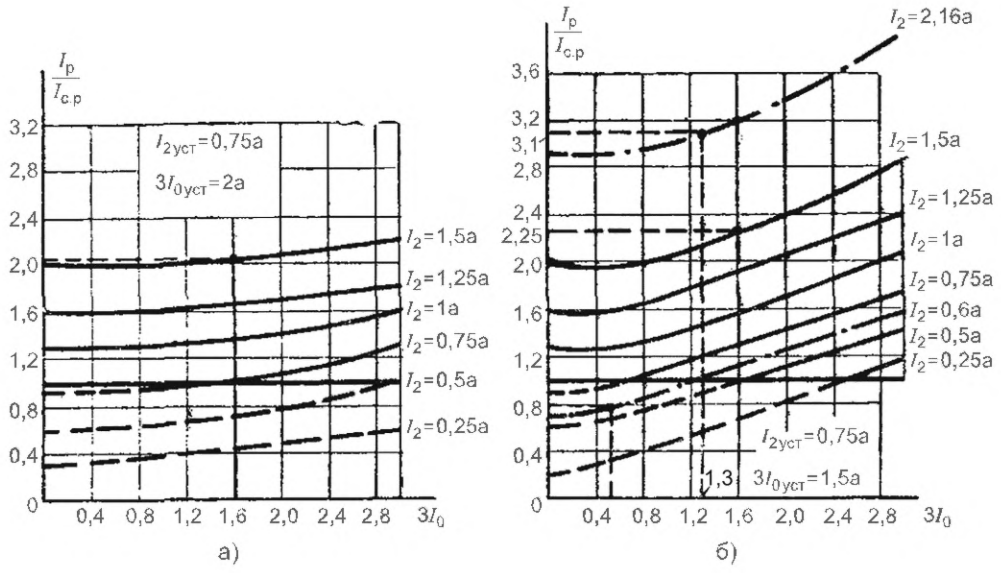


Рисунок 10.8 — Характеристики чувствительности пускового органа устройства БК типа КРБ-122

Таблица 10.3 — Результаты расчета

№ проверки	Расчетные величины	Метод определения	Числовое значение при принятых вариантах уставок	
			вариант I	вариант II
1	Ток срабатывания, определяемый по условию отстройки от режима качаний $I_{2с.р.кач}$	По выражениям (10.13) и (10.14)	$I_{2с.р.кач} \le 1,2\left[\left(0,063+0,005\frac{20}{5}\right)20+0,6\right]=2,72$ А (точка К на рисунке 10.7)	
2	Ток срабатывания, определяемый по условию отстройки от режима качаний $I_{2с.р.нагр}$	По выражениям (10.11) и (10.12)	$I_{2с.р.нагр} \ge \frac{1,2}{0,8}(0,03\cdot 3,8+0,6)=1,07$ А (точка Н на рисунке 10.7)	
3	Принятые варианты уставок $I_{2уст}$ и $k_{торм}$	Рисунок 10.7	$I_{2уст}=0,75$ А $k_{торм}=0,15$	$I_{2уст}=1,0$ А $k_{торм}=0,1$
4	Коэффициент чувствительности $k_ч$ при двухфазном замыкании на землю	Графический по рисунку 10.7	$k_ч=\frac{АВ}{Г_1Д_1}=\frac{2,2}{1,27}=1,73$	$k_ч=\frac{АВ}{Г_2Д_2}=\frac{2,2}{1,37}=1,6$
5		Аналитический по формуле (10.35)	$k_ч=\frac{2,2-0,15\cdot 6}{0,75}=1,73$	$k_ч=\frac{2,2-0,1\cdot 6}{1}=1,6$
6	Коэффициент чувствительности $k'_ч$ при двухфазном замыкании на землю	Графический по рисунку 10.7	$k'_ч=\frac{АВ}{Б_1В}=\frac{2,2}{1,66}=1,33$	$k'_ч=\frac{АВ}{Б_2В}=\frac{2,2}{1,61}=1,37$
7		Аналитический по формуле (10.36)	$k'_ч=\frac{2,2}{0,15\cdot 6+0,75}=1,33$	$k'_ч=\frac{2,2}{0,1\cdot 6+1}=1,37$
8	Окончательно принятые уставки		$I_{2уст}=0,75$ А $k_{торм}=0,15$	

2 Ток $3I_0$ используется в устройстве.

Исходные данные.

Приняты следующие вторичные токи в цепях защиты:

- в расчетном нагрузочном режиме:

$$I_{ФА}=I_{торм}=2,5\ А,\ I_{ФВ}=I_{ФС}=3,5\ А,$$

$$I_{2н.р.нагр}=0,5\ А,\ 3I_{0н.р.нагр}=0,3\ А;$$

- в режиме качаний:

$$I_{2н.р.кач}=0,5\ А,\ 3I_{0н.р.кач}=0,3\ А,$$

$$I_{ФА}\approx I_{ФВ}\approx I_{ФС}\approx 20\ А.$$

При двухфазном замыкании на землю в расчетной по чувствительности точке (в конце зоны резервирования):

$$I_{2кз}^{(1,1)}=1,5\ А,\quad 3I_{0кз}^{(1,1)}=1,6\ А,$$

$$I_{ф}^{(1,1)}=I_{торм}=6\ А\ (с\ учетом\ нагрузки).$$

На основании расчетов, проведенных аналогично примеру 1 (при неиспользовании тока $3I_0$), получены уставки $I_{2уст}=0,75$ А и $k_{торм}=0,112$, при этом чувствительность к двухфазным КЗ на землю $k_ч=1,1$, $k'_ч=1,05$. Поэтому в устройстве БК используется ток $3I_0$. С целью предварительного определения уставки $3I_{0уст}$, необходимой для расчета селективности, проводится проверка чувствительности при двухфазном КЗ на землю. В рассматриваемом случае, целесообразно проверить возможность использования наибольшей уставки $3I_{0уст}$.

Для $I_{2уст}$ = 0,75 А, $I_{2\ кз}^{(1,1)} = 1,5$ А, $3I_{0\ кз}^{(1,1)} = 1,6$ А и $3I_{0уст}$ = 2 А по кривой чувствительности определяется отношение $I_р / I_{с.р}$ = 2,05 (рисунок 10.8, а)), откуда по неравенству (10.29) определяем:

$$I_{2\ экв} = 2,05 \cdot 0,75 = 1,54 \text{ А}.$$

По формулам (10.35) и (10.36):

$$k_ч = \frac{1,54 - 0,112 \cdot 6}{0,75} \approx 1,15,$$

$$k'_ч = \frac{1,54}{0,112 \cdot 6 + 0,75} \approx 1,08.$$

Поскольку устройство БК при принятых уставках не удовлетворяет требованиям чувствительности, принимаем $3I_{0уст}$ = 1,5 А. При этом отношение $I_р / I_{с.р}$ = 2,25 (рисунок 10.8, б)),

$$I_{2\ экв} = 2,25 \cdot 0,75 = 1,69 \text{ А},$$

$$k_ч = \frac{1,69 - 0,112 \cdot 6}{0,75} = 1,36 > 1,2,$$

$$k'_ч = \frac{1,69}{0,112 \cdot 6 + 0,75} = 1,19 > 1,1.$$

Таким образом, при принятой уставке $3I_{0уст}$ = 1,5 А устройство удовлетворяет требованиям чувствительности.

Расчет селективности.

Для режима качаний по формуле (10.14):

$$I_{2расч.кач} \le \left(0,063 + 0,005\frac{20}{5}\right) \cdot 20 + 0,5 = 2,16 \text{ А}.$$

По формуле (10.26) с учетом формулы (10.28) определяем:

$$3I_{0расч.кач} = 0,05 \cdot 20 + 0,3 = 1,3 \text{ А}.$$

По кривым чувствительности (рисунок 10.8, б)) для $I_{2уст}$ = 0,75 А и $3I_{0уст}$ = 1,5 А при $I_{2расч.кач}$ = 2,16 А и $3I_{0расч.кач}$ = 1,3 А получим:

$$\frac{I_р}{I_{с.р}} = 3,1.$$

По неравенству (10.29) определяем:

$$I_{2экв.кач} = 3,1 \cdot 0,75 = 2,32 \text{ А}.$$

По неравенству (10.25) определяем:

$$I_{с.р.кач} = 1,2 \cdot 2,32 = 2,78 \text{ А}.$$

Для $I_{с.р.кач}$ = 2,78 А и $I_{торм}$ = 20 А определяется положение точки K' на графике (рисунок 10.7). Указанная точка лежит ниже прямой для $I_{2уст}$ = 0,75 А и $k_{торм}$ = 0,112, т.е. условие селективности обеспечивается.

Для расчетного режима нагрузки по формуле (10.17):

$$I_{2расч.нагр} = 0,03 \cdot 3,5 + 0,5 = 0,605 \text{ А}.$$

По формуле (10.26) с учетом формулы (10.28)

$$3I_{0расч.нагр} = 0,05 \cdot 3,5 + 0,3 = 0,475 \text{ А}.$$

По кривым чувствительности устройства для $I_{2уст}$ = 0,75 А и $3I_{0уст}$ = 1,5 А (рисунок 10.8, б)) при $I_{2расч.нагр}$ = 0,605 А и $3I_{0расч.нагр}$ = 0,475 А определяется отношение $I_р / I_{с.р.}$ = 0,8.

По неравенству (10.29) определяем:

$$I_{2экв.нагр} = 0,8 \cdot 0,75 = 0,6 \text{ А}.$$

По неравенству (10.24) определяем:

$$I_{с.р.нагр} = \frac{1,2}{0,8} \cdot 0,6 = 0,9 \text{ А}.$$

Для $I_{с.р.нагр}$ = 0,9 А и $I_{торм}$ = 2,5 А определяется положение точки H' на графике (рисунок 10.7). Указанная точка лежит ниже прямой для $I_{2уст}$ = 0,75 А и $k_{торм}$ = 0,112, т.е. условие селективности обеспечивается.

Проверка чувствительности БК.

Поскольку окончательно принятые уставки соответствуют принятым при предварительном расчете чувствительности устройства при двухфазном КЗ на землю, то полученные в предварительном расчете значения $k_ч$ и $k'_ч$ при этом виде повреждения сохраняются (четвертый абзац настоящего примера).

Дополнительно проверяется чувствительность при замыкании между двумя фазами по формулам (10.35) и (10.36):

$$k_ч = \frac{2 - 0,112 \cdot 5}{0,75} = 1,96 > 1,2,$$

$$k'_ч = \frac{2}{0,112 \cdot 5 + 0,75} = 1,53 > 1,1.$$

Устройство БК удовлетворяет требованиям чувствительности.

10.4 Расчет параметров настройки устройств БК с пуском по приращению токов прямой и обратной последовательности

10.4.1 Устройства БК с пуском по приращению токов прямой и обратной последовательности

Устройства БК типа КРБ-122, КРБ-124, КРБ-126 с пуском по току обратной и нулевой последовательности имеют следующие недостатки функционирования:

- отказ блокировки при трехфазных КЗ в случае недостаточной длительности кратковременной несимметрии токов;
- необходимость загрубления пусковых органов блокировки при наличии значительной длительной несимметрии токов в нагрузочном режиме (тяговая нагрузка).

Для устранения указанных недостатков в микропроцессорных устройствах РЗ и устройствах РЗ на микроэлектронной элементной базе отечественного производства применяются пусковые органы БК, реагирующие на приращение (изменение) векторов токов за малый интервал времени (как правило, за период промышленной частоты):

- прямой последовательности DI_1 для исключения отказов БК при трехфазных КЗ;
- обратной последовательности DI_2 для обеспечения работы БК при несимметричных КЗ.

Устройства БК с пуском по приращению токов относятся к группе I и содержат чувствительные и грубые пусковые органы, которые при всех видах КЗ обеспечивают ввод в работу быстродействующих (блокируемых при качаниях) и медленнодействующих (не блокируемых при качаниях) ступеней ДЗ на время, определяемое соответствующими таймерами логической схемы защиты.

Расчету и выбору подлежат следующие параметры настройки:

- $DI_{2чув}$ — уставка чувствительного пускового органа БК по приращению тока обратной последовательности;
- $DI_{2гр}$ — уставка грубого пускового органа БК по приращению тока обратной последовательности;
- $DI_{1чув}$ — уставка чувствительного пускового органа БК по приращению тока прямой последовательности;
- $DI_{1гр}$ — уставка грубого пускового органа БК по приращению тока прямой последовательности.

Пусковые органы БК по приращению токов должны быть отстроены от возможного небаланса в максимальных нагрузочных режимах и от изменений тока, не связанных с КЗ (асинхронные режимы, синхронные качания, коммутации нагрузки и т.д.).

10.4.2 Расчет уставки $DI_{2чув}$ чувствительного пускового органа БК

10.4.2.1 Уставка $DI_{2чув}$ рассчитывается по чувствительности при несимметричных КЗ в конце зоны действия самой чувствительной ступени ДЗ, действие которой разрешается от данного пускового органа:

$$DI_{2чув} \le \frac{I_{2кз\ мин}}{k_ч}, \qquad (10.37)$$

где $I_{2кз\ мин}$ — минимальный ток обратной последовательности в месте установки защиты в расчетном по чувствительности режиме;

$k_ч$ — коэффициент чувствительности.

Требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени с охватом защищаемой ЛЭП: $k_ч \ge 1,5$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени, осуществляющей функции дальнего резервирования: $k_ч \ge 1,2$.

Расчетными для проверки чувствительности являются следующие виды КЗ:

- двухфазные КЗ на землю и междуфазные КЗ для ступеней ДЗ от междуфазных повреждений;
- однофазные КЗ на землю для ступеней ДЗ от КЗ на землю.

10.4.2.2 Уставка $DI_{2чув}$ проверяется по отстройке от тока небаланса в максимальном нагрузочном режиме при отклонении частоты сети от номинальной, а также от тока небаланса в асинхронном режиме:

$$DI_{2чув} \geq \frac{k_н}{k_в} \cdot I_{2нб\ расч}, \tag{10.38}$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,1-1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты;

$I_{2нб\ расч}$ — расчетный ток небаланса обратной последовательности, определяется по выражению (10.39).

Ток небаланса обратной последовательности, обусловленный различием погрешностей ТТ разных фаз (принимается, что ТТ одной фазы имеет максимальную погрешность, а два других ТТ не имеют погрешности), определяется по формуле

$$I_{2нб\ расч} = \frac{\varepsilon}{3} \cdot I_{макс}, \tag{10.39}$$

где $I_{макс}$ — фазный ток в месте установки защиты в максимальном рабочем нагрузочном режиме, асинхронном режиме или режиме качаний;

ε — полная погрешность ТТ.

Полная погрешность ТТ зависит от класса точности ТТ, используемого для устройства РЗ.

В соответствии с ГОСТ 7746 полная погрешность ТТ класса точности 10Р принимается равной 0,03 при максимальном токе нагрузочного режима, не превышающем значения первичного номинального тока ТТ.

Если максимальный рабочий ток нагрузочного режима значительно превышает номинальный ток ТТ, а также при расчете тока небаланса в асинхронном режиме рекомендуется принять полную погрешность ТТ равной 0,1.

Таким образом, максимальное расчетное значение тока небаланса обратной последовательности принимается равным:

$$I_{2нб\ расч\ макс} = 0{,}03 \cdot I_{макс}. \tag{10.40}$$

Отстройка $DI_{2чув}$ от тока небаланса в асинхронном режиме выполняется, если от данного пускового органа разрешается действие ступеней ДЗ, выдержка времени которых не превышает 1,5 с.

10.4.3 Расчет уставки $DI_{1чув}$ чувствительного пускового органа БК

10.4.3.1 Уставка $DI_{1чув}$ рассчитывается по чувствительности при трехфазном КЗ в конце зоны действия самой чувствительной ступени ДЗ, действие которой разрешается от данного пускового органа:

$$DI_{1чув} \leq \frac{I_{1кз\ мин}}{k_ч}, \tag{10.41}$$

где $I_{1кз\ мин}$ — минимальный ток прямой последовательности в месте установки защиты в расчетном по чувствительности режиме.

Требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени с охватом защищаемой ЛЭП: $k_ч \geq 1{,}5$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени, осуществляющей функции дальнего резервирования: $k_ч \geq 1{,}2$.

10.4.3.2 Уставка $DI_{1чув}$ проверяется по отстройке от приращения тока прямой последовательности в асинхронном режиме за интервал времени сравнения его значений:

$$DI_{1чув} \geq k_н \cdot \Delta I_{1кач}, \tag{10.42}$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, принимаемый равным 1,1-1,2;

$\Delta I_{1кач}$ — приращение (изменение) тока прямой последовательности в асинхронном режиме.

Значение тока качаний в течение цикла асинхронного режима изменяется в зависимости от угла $\delta(t)$ между векторами ЭДС эквивалентных генераторов:

$$I_{кач}(t) = I_{кач\ макс} \sin\frac{\delta(t)}{2}, \tag{10.43}$$

где $I_{\text{кач макс}}$ — значение тока качаний в момент времени, когда угол между векторами ЭДС эквивалентных генераторов составляет $\delta = 180°$.

Цикл асинхронного режима $T_{\text{ц}}$ (период времени, за который угол между векторами ЭДС изменяется от 0° до 360°):

$$T_{\text{ц}} = \frac{1}{\Delta f}, \tag{10.44}$$

где $\Delta f = f_2 - f_1$ — разность частот эквивалентных генераторов (частота качаний).

Текущее значение угла между векторами ЭДС в произвольный момент времени t определяется:

$$\delta(t) = 2\pi f_2 t - 2\pi f_1 t = 2\pi \Delta f t. \tag{10.45}$$

Формулу (10.43) для тока качаний в произвольный момент времени t можно представить в виде:

$$I_{\text{кач}}(t) = I_{\text{кач макс}} \cdot \sin \pi \Delta f t. \tag{10.46}$$

Пренебрегая изменением частоты качаний в процессе асинхронного режима, скорость изменения тока в произвольный момент времени определяется по формуле

$$\frac{dI_{\text{кач}}}{dt} = \pi \Delta f \cdot I_{\text{кач макс}} \cdot \cos \pi \Delta f t. \tag{10.47}$$

Максимальной скорости изменения тока соответствует равенство $\cos \pi \Delta f t = 1$, в этом случае:

$$\left(\frac{dI_{\text{кач}}}{dt}\right)_{\text{макс}} = \pi \Delta f \cdot I_{\text{кач макс}}. \tag{10.48}$$

Максимальное приращение (изменение) тока $\Delta I_{1\text{кач}}$ за промежуток времени Δt определяется:

$$\Delta I_{1\text{кач}} = \pi \Delta f \cdot I_{\text{кач макс}} \cdot \Delta t, \tag{10.49}$$

где Δt — интервал сравнения значений тока качаний.

Можно представить формулу (10.49) в виде:

$$\Delta I_{1\text{кач}} = \pi \cdot \frac{I_{\text{кач макс}}}{T_{\text{ц}}} \cdot \Delta t, \tag{10.50}$$

где $I_{\text{кач макс}}$, $T_{\text{ц}}$ — ток асинхронного режима и соответствующая ему длительность цикла.

Таким образом, для расчета уставки $DI_{1\text{чув}}$ согласно неравенству (10.42) определяющими будут асинхронные режимы с наибольшими значениями тока $I_{\text{кач микс}}$ и наименьшими $T_{\text{ц}}$.

Данное расчетное условие применимо для случая, когда чувствительный пусковой орган БК по приращению тока прямой последовательности $DI_{1\text{чув}}$ обеспечивает ввод в работу быстродействующих ступеней ДЗ, выдержка времени которых не отстроена от длительности цикла асинхронного режима.

Если уставка $DI_{1\text{чув}}$, выбранная согласно неравенству (10.42), не удовлетворяет требованию 10.4.3.1, для чувствительного пускового органа БК, который обеспечивает ввод в работу ступени ДЗ, выполняющей функции дальнего резервирования, в соответствии с пунктом 25 требований [2], приоритет должен быть отдан обеспечению чувствительности при КЗ.

10.4.4 Расчет уставки $DI_{2\text{гр}}$ грубого пускового органа БК

10.4.4.1 Уставка $DI_{2\text{гр}}$ рассчитывается по чувствительности при несимметричных КЗ в конце зоны самой чувствительной ступени ДЗ, действие которой разрешается от данного пускового органа:

$$DI_{2\text{гр}} \le \frac{I_{2\text{кз мин}}}{k_{\text{ч}}}, \tag{10.51}$$

где $I_{2\text{кз мин}}$ — минимальный ток обратной последовательности в месте установки защиты в расчетном по чувствительности режиме.

Требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени с охватом защищаемой ЛЭП: $k_{\text{ч}} \ge 1{,}5$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени, осуществляющей функции дальнего резервирования: $k_{\text{ч}} \ge 1{,}2$.

Расчетными для проверки чувствительности являются следующие виды КЗ:

- двухфазные КЗ на землю и междуфазные КЗ для ступеней ДЗ от междуфазных повреждений;
- однофазные КЗ на землю для ступеней ДЗ от КЗ на землю.

10.4.4.2 Уставка $DI_{2\text{гр}}$ проверяется по отстройке от тока небаланса, возникающего в максимальном нагрузочном режиме при отклонении частоты сети от номинальной, а также от тока небаланса в асинхронном режиме по неравенству (10.38).

10.4.5 Расчет уставки $DI_{1гр}$ грубого пускового органа БК

10.4.5.1 Уставка $DI_{1гр}$ рассчитывается по чувствительности при трехфазном КЗ в конце зоны самой чувствительной ступени ДЗ, действие которой разрешается от данного пускового органа:

$$DI_{1гр} \le \frac{I_{1кз\ мин}}{k_ч}, \tag{10.52}$$

где $I_{1кз\ мин}$ — минимальный ток прямой последовательности в месте установки защиты в расчетном по чувствительности режиме.

Требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени с охватом защищаемой ЛЭП: $k_ч \ge 1,5$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени, осуществляющей функции дальнего резервирования: $k_ч \ge 1,2$.

10.4.5.2 Уставка $DI_{1гр}$ проверяется по отстройке от приращения (изменения) тока прямой последовательности $\Delta I_{1кач}$ при асинхронном режиме за интервал времени сравнения его значений по неравенству (10.42).

Данное расчетное условие применимо для случая, когда грубый пусковой орган БК по приращению тока прямой последовательности обеспечивает ввод в работу быстродействующих ступеней ДЗ, выдержка времени действия которых не отстроена от длительности цикла асинхронного режима.

10.5 Расчет параметров настройки устройств БК с контролем скорости изменения сопротивления

10.5.1 Основные принципы выполнения БК с контролем скорости изменения сопротивления

Устройства БК, действие которых основано на контроле скорости изменения измеряемого сопротивления, относятся к группе II, обеспечивают постоянную готовность ДЗ к срабатыванию и блокируют ее только при возникновении качаний или асинхронного режима.

При асинхронном режиме и синхронных качаниях, так же, как и при КЗ, вектор $\underline{Z}_р$ перемещается из области доаварийного нагрузочного режима в область характеристик срабатывания ступеней ДЗ. Отличить один режим от другого можно по скорости изменения сопротивления $\underline{Z}_р(t)$.

При КЗ дистанционный замер $\underline{Z}_р$ скачкообразно переходит из области нагрузочного режима в область характеристики срабатывания ДЗ.

При синхронных качаниях или асинхронном режиме скорость изменения $\underline{Z}_р(t)$ зависит от угловой скорости относительного вращения ЭДС эквивалентных генераторов.

10.5.2 Контроль скорости изменения сопротивления

Для контроля скорости изменения сопротивления ДО устройства БК имеют две характеристики разной чувствительности (внешняя и внутренняя).

При КЗ дистанционный замер пересекает границы внешней и внутренней характеристики БК за малый интервал времени $\Delta t_{кз}$.

Асинхронный режим характеризуется более плавным изменением электрических параметров, разновременность пересечения границ внешней и внутренней характеристик БК годографом сопротивлений за интервал времени $\Delta t_{кач}$ контролируется устройством БК и сравнивается с уставкой по времени $T_{БК}$.

Для корректного функционирования устройства БК необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$\Delta t_{кач} > T_{БК} > \Delta t_{кз}. \tag{10.53}$$

Параметры настройки внешней и внутренней характеристик БК и уставка $T_{БК}$ должны обеспечить выявление асинхронных режимов с максимально возможной разностью частот.

Упрощенно принимая равными модули ЭДС $|\underline{E}_{C\text{-}1}| = |\underline{E}_{C\text{-}2}|$, определение интервала времени $\Delta t_{кач}$ проводится следующим образом (рисунок 10.9):

- рассчитывается суммарное сопротивление электропередачи $\underline{Z}_\Sigma$;
- за начало координат принимается место установки защиты 1;
- строится линия суммарного сопротивления $\underline{Z}_\Sigma$;
- проводится прямая линия $O'O''$ перпендикулярно к линии суммарного сопротивления $\underline{Z}_\Sigma$ и делящая ее пополам в точке 1;
- строятся внутренняя ($R_{уст}$, $X_{уст}$) и внешняя ($R_{уст} + \Delta R$, $X_{уст} + \Delta X$) характеристики БК;
- определяются точки 3 и 2 пересечения внутренней и внешней характеристик БК с прямой $O'O''$.

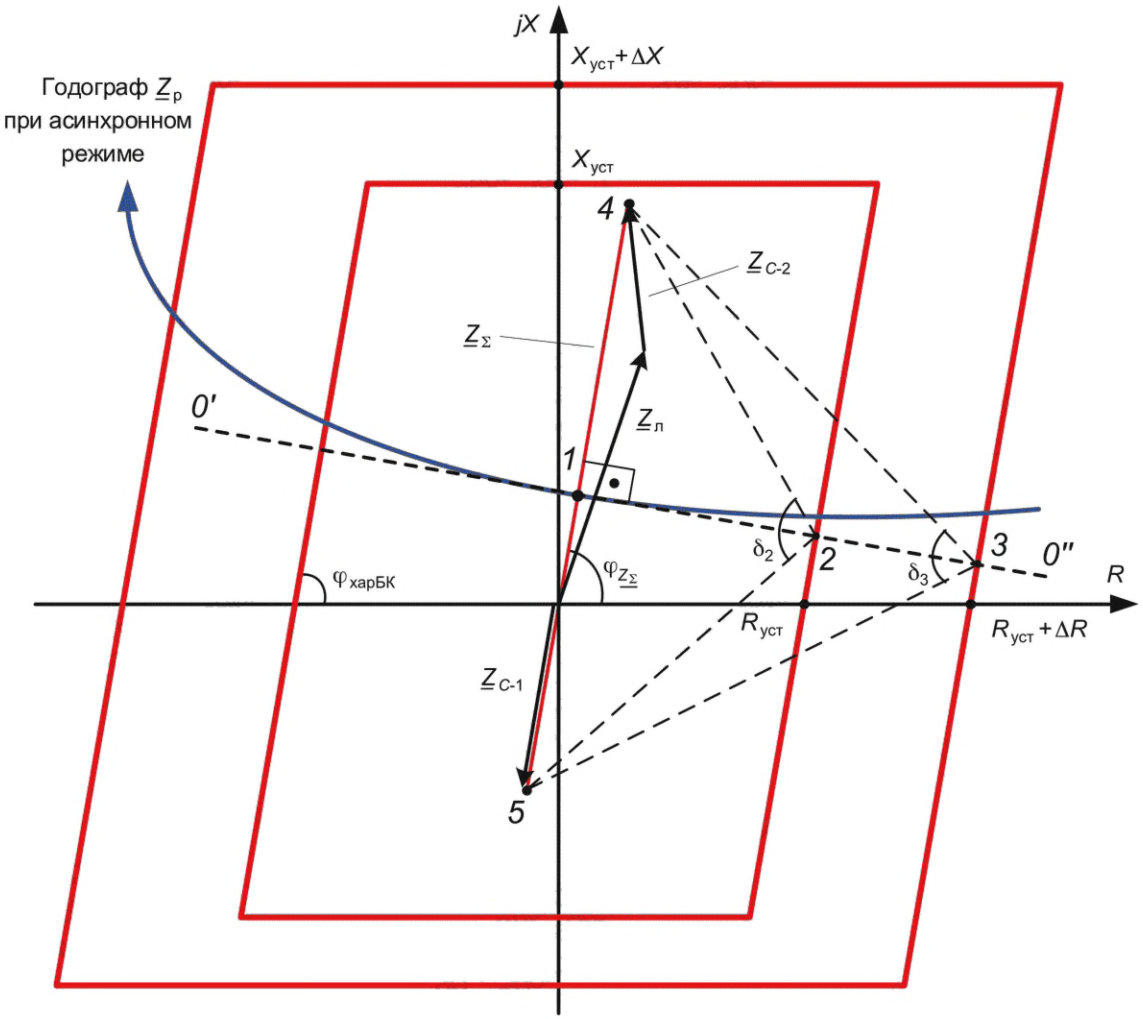


Рисунок 10.9 — Пересечение характеристик БК годографом асинхронного режима

Точка 1 соответствует моменту времени, когда угол между векторами ЭДС $\underline{E}_{С\text{-}1}$ и $\underline{E}_{С\text{-}2}$ составляет 180° и определяет положение электрического центра качаний (ЭЦК) в системе.

Точки 3 и 2 соответствуют углам между векторами ЭДС в моменты времени пересечения годографом сопротивлений границ внешней (δ_3) и внутренней (δ_2) характеристик БК.

При равенстве углов наклона характеристики БК $\varphi_{харБК}$ и суммарного сопротивления электропередачи $\varphi_{\underline{Z}_\Sigma}$ углы δ_3 и δ_2 определяются по формулам:

$$\delta_3 = 2\operatorname{arctg}\frac{|\underline{Z}_\Sigma|}{2|\underline{Z}_{1\text{-}3}|} = 2\operatorname{arctg}\frac{|\underline{Z}_\Sigma|}{2\left(R_{уст}+\Delta R\right)\sin\varphi_{харБК}}, \tag{10.54}$$

$$\delta_2 = 2\operatorname{arctg}\frac{|\underline{Z}_\Sigma|}{2|\underline{Z}_{1\text{-}2}|} = 2\operatorname{arctg}\frac{|\underline{Z}_\Sigma|}{2R_{уст}\sin\varphi_{харБК}}. \tag{10.55}$$

В течение цикла асинхронного режима разница частот эквивалентных генераторов не остается постоянной, но на ограниченном интервале времени $\Delta t_{кач}$ пересечения годографом внешней и внутренней характеристик БК допустимо принять Δf = const.

Изменение угла $\Delta\delta$ между векторами ЭДС эквивалентных генераторов за интервал времени $\Delta t_{кач}$:

$$\Delta\delta = (\delta_2 - \delta_3) = 2\pi\Delta f\Delta t_{кач}. \tag{10.56}$$

Для выявления асинхронных режимов с максимальной разностью частот $\Delta f_{макс}$ определяется интервал времени $\Delta t_{кач.мин}$:

$$\Delta t_{\text{кач.мин}} = \frac{(\delta_2 - \delta_3)}{2\pi\Delta f_{\text{макс}}}. \quad (10.57)$$

Значение $\Delta f_{\text{макс}}$ определяется по результатам расчетов, выполненных в специализированных программных комплексах по расчету электромеханических переходных процессов.

Уставка $T_{\text{БК}}$ рассчитывается исходя из следующих условий:

- по отстройке от интервала времени $\Delta t_{\text{КЗ}}$:

$$T_{\text{БК}} \geq k_{\text{н}} \cdot T, \quad (10.58)$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,5-2;

T — период промышленной частоты, 0,02 с;

- по чувствительности к асинхронному режиму с максимальной разностью частот:

$$T_{\text{БК}} \leq \frac{\Delta t_{\text{кач.мин}}}{k_{\text{зап}}}, \quad (10.59)$$

где $k_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса, обеспечивающий совместно с уставкой ширины зоны определения качаний ΔX (ΔZ), ΔR фиксацию асинхронных режимов с максимальной разностью частот, принимается равным не менее 1,3.

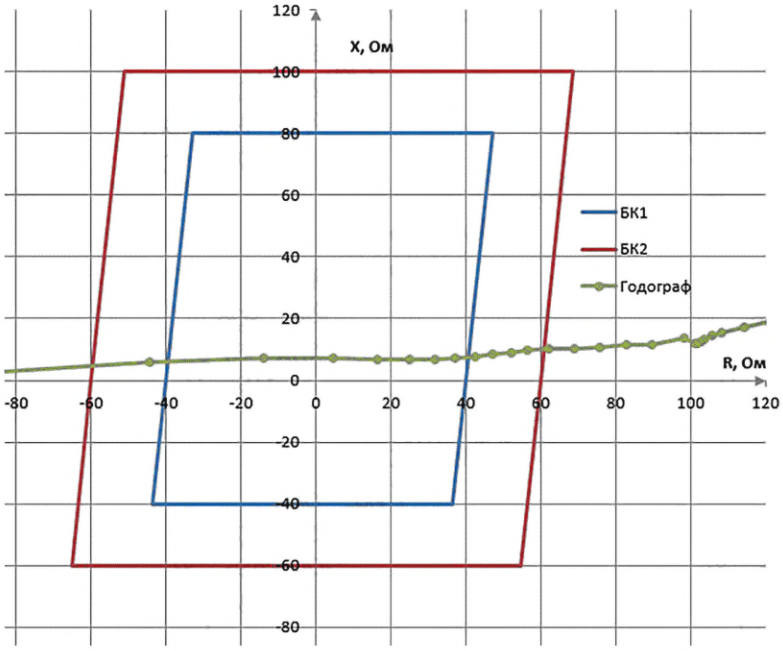


Рисунок 10.10 — Графический способ определения $\Delta t_{\text{кач}}$

При наличии результатов расчетов асинхронных режимов в виде годографов сопротивлений рекомендуется определять значение интервала времени $\Delta t_{\text{кач}}$ графическим способом, используя метки времени дистанционных замеров (рисунок 10.10).

10.5.3 Таймер возврата устройства БК при развивающихся качаниях

Удерживание выходного сигнала устройства БК после выхода годографа сопротивления из зоны внешней характеристики БК обеспечивает блокирование ДЗ, когда предполагается возврат годографа в характеристику БК при развивающихся синхронных качаниях или продолжении процесса асинхронного режима.

Уставка времени возврата определяется длительностью цикла асинхронного режима с минимальной разностью частот:

$$T_{\text{возвр}} \geq k_{\text{н}} \cdot T_{\text{ц макс}}; \quad T_{\text{ц макс}} = \frac{1}{\Delta f_{\text{мин}}}, \quad (10.60)$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2-1,3.

10.5.4 Деблокировка устройства БК при КЗ

При возникновении КЗ в зоне действия быстродействующих ступеней ДЗ ЛЭП в процессе синхронных качаний или асинхронного режима необходимо обеспечить быстрый возврат устройства БК.

Возврат устройства БК (деблокировка) может обеспечиваться токовыми пусковыми органами:

- фазного тока при симметричных КЗ;
- тока обратной или нулевой последовательности при несимметричных КЗ.

Ниже приводятся расчетные условия для выбора уставок токовых органов деблокировки устройства БК с учетом некоторых особенностей задания уставок в конкретных устройствах РЗ.

10.5.4.1 Расчет уставки пускового органа деблокировки по фазному току

Уставка ($I_ф >$) задается в о.е. от номинального тока ТТ.

Расчет уставки ($I_ф >$) проводится по следующим условиям:

- по отстройке от максимального тока качаний:

$$\left(I_ф >\right) \geq \frac{k_н}{k_в} \cdot \frac{I_{кач\ макс}}{I_{ном}}, \tag{10.61}$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты;

$I_{ном}$ — номинальный ток ТТ;

- по чувствительности при трехфазном КЗ в конце зоны действия самой чувствительной ступени ДЗ, ввод в работу которой разрешается от данного пускового органа:

$$\left(I_ф >\right) \leq \frac{I_{кз.мин}}{k_ч \cdot I_{ном}}, \tag{10.62}$$

где $I_{кз.мин}$ — минимальный фазный ток в месте установки защиты в расчетном по чувствительности режиме;

$k_ч$ — коэффициент чувствительности.

Требуется обеспечить следующие коэффициенты чувствительности:

- при КЗ в конце зоны действия ступени ДЗ с охватом защищаемой ЛЭП: $k_ч \geq 1,5$;
- при КЗ в конце зоны действия ступени ДЗ, осуществляющей функции дальнего резервирования: $k_ч \geq 1,2$.

10.5.4.2 Расчет уставки пускового органа деблокировки по току обратной последовательности

Уставка ($I_2 >$) задается в о.е. по отношению к максимальному из фазных токов в защите, пусковой орган срабатывает при превышении величины:

$$I_{2ср} \geq 0,1 \cdot I_{ном} + (I_2 >) \cdot I_{ф\ макс}, \tag{10.63}$$

где $I_{ном}$ — номинальный ток ТТ;

$I_{ф\ макс}$ — максимальный из фазных токов в месте установки защиты при несимметричном КЗ.

Расчет уставки ($I_2 >$) проводится по следующим условиям:

- по отстройке от небаланса при максимальном токе качаний и при наличии источника несимметрии в системе:

$$\left(I_2 >\right) \geq \frac{\left(\frac{k_н}{k_в} \cdot I_{2расч} - 0,1 \cdot I_{ном}\right)}{I_{ф\ макс}}, \tag{10.64}$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, принимаемый равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным устройства РЗ;

$I_{2расч}$ — расчетный ток небаланса, определяется по формулам:

$$I_{2расч} = I_{2нб\ кач} + I_{2н.р};\ \ I_{2нб\ кач} = k_{2нб} \cdot I_{кач\ макс}, \tag{10.65}$$

где $k_{2нб}$ — коэффициент небаланса, принимается равным 0,03;

$I_{2н.р}$ — ток небаланса, обусловленный источником несимметрии в системе, при отсутствии несимметрии принимается равным $I_{2н.р} = 0$;

- по чувствительности при несимметричных КЗ в конце зоны действия самой чувствительной ступени ДЗ, ввод в работу которой разрешается от данного пускового органа:

$$(I_2 >) \le \frac{\left(\frac{I_{2расч}}{k_ч} - 0{,}1 \cdot I_{ном}\right)}{I_{ф\ макс}}, \quad (10.66)$$

где $I_{2расч}$ — минимальный ток обратной последовательности в месте установки защиты в расчетном по чувствительности режиме;

$I_{ф\ макс}$ — максимальный из фазных токов в месте установки защиты в расчетном по чувствительности режиме.

Коэффициенты чувствительности обеспечиваются в соответствии с 10.5.4.1.

Расчетными для проверки чувствительности являются следующие виды КЗ:

- двухфазные КЗ на землю и междуфазные КЗ для ступеней ДЗ от междуфазных повреждений;
- однофазные КЗ на землю для ступеней ДЗ от КЗ на землю.

10.5.4.3 Расчет уставки пускового органа деблокировки по току нулевой последовательности

Уставка $(3I_0 >)$ задается в о.е. по отношению к максимальному из фазных токов в защите, пусковой орган срабатывает при превышении величины:

$$3I_{0\ ср} \ge 0{,}1 \cdot I_{ном} + (3I_0 >) \cdot I_{ф\ макс}, \quad (10.67)$$

где $I_{ном}$ — номинальный ток ТТ;

$I_{ф\ макс}$ — максимальный из фазных токов в месте установки защиты при КЗ на землю.

Выбор уставки $(3I_0 >)$ проводится:

- по отстройке от небаланса при максимальном токе качаний, при котором может сработать токовый орган нулевой последовательности:

$$(3I_0 >) \ge \frac{\left(\frac{k_н}{k_в} \cdot 3I_{0расч} - 0{,}1 \cdot I_{ном}\right)}{I_{ф\ макс}}, \quad (10.68)$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным защиты;

$3I_{0расч}$ — расчетный ток небаланса в режиме качаний, определяется по формулам:

$$3I_{0расч} = I_{0нб\ кач} + 3I_{0н.р}; \quad I_{0нб\ кач} = k_{0нб} \cdot I_{кач\ макс}, \quad (10.69)$$

где $I_{0нб\ кач}$ — ток небаланса в нулевом проводе ТТ;

$3I_{0н.р}$ — ток нулевой последовательности, обусловленный несимметрией в системе, при отсутствии несимметрии принимается равным $3I_{0н.р} = 0$;

$k_{0нб}$ — коэффициент небаланса, принимается из диапазона 0,05—0,1, если ток качаний не превосходит тока предельной кратности первичного тока ТТ при 10 % погрешности;

- по чувствительности при КЗ на землю в конце зоны действия самой чувствительной ступени ДЗ, ввод в работу которой разрешается от данного пускового органа:

$$(3I_0 >) \le \frac{\left(\frac{3I_{0расч}}{k_ч} - 0{,}1 \cdot I_{ном}\right)}{I_{ф\ макс}}, \quad (10.70)$$

где $k_ч$ — коэффициент чувствительности;

$3I_{0расч}$ — ток нулевой последовательности при КЗ на землю в месте установки защиты в расчетном по чувствительности режиме;

$I_{ф\ макс}$ — максимальный из фазных токов при КЗ на землю в месте установки защиты в расчетном режиме.

Коэффициенты чувствительности обеспечиваются в соответствии с 10.5.4.1.

10.5.4.4 Для устройств РЗ, в которых возврат функции БК при несимметричных КЗ обеспечивается пусковым органом, реагирующим на отношение модулей токов обратной и прямой последовательности, выбор уставки ($I_2\ dZ / dt$) проводится:

- по отстройке от небаланса в режиме качаний:

$$\left(I_2\ dZ / dt\right) \geq 100 \cdot \frac{\frac{k_н}{k_в} \cdot I_{2расч}}{I_{кач\ макс}}, \tag{10.71}$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата, принимается по техническим данным устройства РЗ;

$I_{2расч}$ — расчетный ток небаланса, определяется по формуле (10.65);

- по обеспечению надежного пуска при несимметричных КЗ в конце зоны действия самой чувствительной ступени ДЗ, ввод в работу которой разрешается от данного пускового органа:

$$\left(I_2\ dZ / dt\right) \leq 100 \cdot \frac{I_{2расч} / I_{1расч}}{k_ч}, \tag{10.72}$$

где $I_{2расч} / I_{1расч}$ — отношение модулей токов обратной и прямой последовательности в месте установки защиты в расчетных по чувствительности условиях;

$k_ч$ — коэффициент чувствительности.

Коэффициенты чувствительности обеспечиваются в соответствии с 10.5.4.1.

Расчетными для проверки чувствительности являются следующие виды КЗ:

- двухфазные КЗ на землю и междуфазные КЗ для ступеней ДЗ от междуфазных повреждений;
- однофазные КЗ на землю для ступеней ДЗ от КЗ на землю.

11 Расчет параметров настройки ускоряемых ступеней дистанционной защиты

11.1 Расчет параметров настройки оперативно ускоряемых ступеней ДЗ

11.1.1 Общие требования к оперативно ускоряемым ступеням ДЗ

В качестве оперативно ускоряемой ступени ДЗ ЛЭП используется ступень, обеспечивающая требуемую для резервной защиты чувствительность при КЗ в пределах сетевого элемента, на котором выводятся основные быстродействующие защиты. При наличии на ЛЭП (шинах) нескольких комплектов основных быстродействующих защит расчет и выбор параметров настройки оперативно ускоряемых ступеней ДЗ проводится для случая одновременного вывода из работы всех комплектов основных быстродействующих защит ЛЭП (шин).

При выводе из работы основной быстродействующей защиты ЛЭП или ДЗШ на ПС, примыкающей к противоположному концу защищаемой линии, предусматривается ввод ОУ прямонаправленной ступени ДЗ с надежным охватом всей защищаемой ЛЭП. Как правило, оперативно ускоряется вторая ступень ДЗ. В случае недостаточной чувствительности второй ступени допускается ввод ОУ третьей ступени или отдельной, специально предназначенной для этих целей, ускоряемой ступени ДЗ. При наличии технической возможности отдельная оперативно ускоряемая ступень ДЗ выполняется от всех видов КЗ.

При выводе из работы ДЗШ на ПС, где установлена рассматриваемая защита, может использоваться ввод ОУ направленной в шины или ненаправленной ступени ДЗ.

Указания по расчету параметров настройки оперативно ускоряемых ступеней ДЗ приводятся ниже для одиночных и параллельных ЛЭП, ЛЭП при наличии ответвлений и ЛЭП, работающих по схеме блока Т (АТ) — линия.

11.1.2 Расчет параметров настройки оперативно ускоряемых ступеней ДЗ

11.1.2.1 Расчет сопротивления срабатывания оперативно ускоряемой прямонаправленной ступени по чувствительности при КЗ в конце защищаемой ЛЭП проводится в соответствии с неравенствами

- для ДО с круговыми характеристиками

$$Z_{уст} \geq k_{чZ} \cdot \frac{\left|\underline{Z}_р\right|}{\cos\left(\varphi_{мч} - \varphi_р\right)}; \tag{11.1}$$

- для ДО с полигональными характеристиками

$$X_{уст} \geq k_{чZ} \cdot |\underline{Z}_р| \cdot \sin\varphi_р; \quad (11.2)$$

$$Z_{уст} \geq k_{чX} \cdot \frac{|\underline{Z}_р| \cdot \sin\varphi_р}{\sin\varphi_{хар}}; \quad (11.3)$$

$$R_{уст} \geq |\underline{Z}_р| \cdot \frac{\sin(\varphi_{прав} - \varphi_р) + (k_ч - 1)}{\sin\varphi_{прав}}, \quad (11.4)$$

где $|\underline{Z}_р|$ и $\varphi_р$ — модуль и угол расчетного полного сопротивления;

$k_{чZ}$ — коэффициент чувствительности по полному сопротивлению;

$k_{чX}$ — коэффициент чувствительности по реактивному сопротивлению;

$k_ч$ — коэффициент чувствительности по активному сопротивлению;

$\varphi_{мч}$ — угол максимальной чувствительности круговой характеристики;

$\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики;

$\varphi_{прав}$ — угол наклона правой боковой стороны полигональной характеристики.

Для ЛЭП при наличии ответвлений и ЛЭП с многосторонним питанием расчет сопротивления срабатывания оперативно ускоряемой прямонаправленной ступени ДЗ проводится по неравенствам (11.1) — (11.4) при КЗ на каждом конце ЛЭП, противоположном месту установки рассматриваемой защиты.

Для выбора сопротивления срабатывания рассматриваются результаты расчета при КЗ в нормальной и ремонтных схемах прилегающей сети.

Коэффициенты чувствительности в неравенствах (11.1) — (11.4) принимаются:

- 1,5 при металлических КЗ (допускается снижение коэффициента чувствительности до значения 1,25, если в качестве оперативно ускоренной ступени применяется вторая ступень ДЗ);
- 1,1-1,2 при КЗ через переходное сопротивление в режиме транзита;
- 1,2-1,5 при КЗ через переходное сопротивление при одностороннем отключении повреждения с противоположной стороны ЛЭП.

11.1.2.2 Расчет сопротивления срабатывания оперативно ускоряемой направленной в шины или ненаправленной ступени ДЗ по чувствительности при КЗ через переходные сопротивления на шинах ПС, где установлена рассматриваемая защита, проводится по неравенствам (11.1) — (11.4).

В указанных неравенствах коэффициенты чувствительности для ДО с круговыми и полигональными характеристиками срабатывания принимаются: 1,25-1,5.

Для выбора сопротивления срабатывания рассматриваются результаты расчета при КЗ в нормальной и ремонтных схемах прилегающей сети.

Если рассматриваемая направленная в шины ступень ДЗ также используется в схемах ТУ с передачей блокирующих или разрешающих сигналов, расчет параметров настройки ее проводится в соответствии с 11.3.

11.1.2.3 Отстройка характеристик срабатывания оперативно ускоряемых ступеней ДЗ от нагрузочных режимов энергосистем проводится в соответствии с 4.3.

11.1.2.4 Выдержка времени оперативно ускоряемых ступеней ДЗ выбирается исходя из следующих условий:

- сохранение динамической устойчивости генерирующего оборудования;
- обеспечение селективной работы с резервными защитами смежных сетевых элементов;
- сокращение времени ликвидации КЗ.

Выдержка времени оперативно ускоряемых ступеней принимается равной ступени селективности ΔT, рассчитываемой по неравенству (5.20), по согласованию с резервными защитами смежных сетевых элементов при условии, что при этом обеспечивается отключение КЗ за время, требуемое для сохранения динамической устойчивости генерирующего оборудования.

11.2 Расчет параметров настройки автоматически ускоряемой ступени ДЗ

11.2.1 Общие требования к автоматически ускоряемой ступени ДЗ

АУ позволяет уменьшить время отключения КЗ при постановке ЛЭП под напряжение от ключа управления или устройства АПВ.

В качестве автоматически ускоряемой ступени, как правило, используется вторая ступень ДЗ с надежным охватом всей защищаемой ЛЭП.

При недостаточной чувствительности второй ступени допускается ввод АУ третьей ступени ДЗ или отдельной, специально предназначенной для этих целей ступени. При наличии технической возможности отдельная автоматически ускоряемая ступень ДЗ выполняется от всех видов КЗ.

Указания по расчету параметров настройки автоматически ускоряемой ступени ДЗ приводятся ниже для одиночных и параллельных ЛЭП, ЛЭП при наличии ответвлений и ЛЭП, работающих по схеме блока Т (АТ) — линия.

11.2.2 Расчет параметров настройки автоматически ускоряемой ступени ДЗ

11.2.2.1 Расчет сопротивления срабатывания автоматически ускоряемой ступени по чувствительности при КЗ в конце защищаемой ЛЭП проводится по неравенствам (11.1) — (11.4).

В указанных неравенствах коэффициенты чувствительности для ДО с круговыми и полигональными характеристиками срабатывания принимаются:

- 1,5 при металлических КЗ (допускается снижение коэффициента чувствительности до значения 1,25, если в качестве автоматически ускоренной ступени применяется вторая ступень ДЗ);
- 1,2-1,5 при КЗ через переходное сопротивление.

11.2.2.2 Отстройка характеристики срабатывания автоматически ускоряемой ступени ДЗ ЛЭП при наличии ответвлений от нагрузочных режимов, обусловленных питанием Т (АТ) ПС на ответвлениях, проводится в соответствии с 4.3.

При постановке ЛЭП под напряжение от устройства АПВ следует учитывать режим самозапуска двигателей нагрузки ПС на ответвлениях.

11.2.2.3 Отстройка сопротивления срабатывания автоматически ускоряемой ступени ДЗ от БТН проводится в соответствии с приложением Ж.

Расчеты по данному условию следует выполнять для ЛЭП, имеющих в режиме постановки под напряжение подключенные Т (АТ) на противоположном конце линии и для ЛЭП при наличии ответвлений.

Ввиду того, что отсутствуют методики расчета БТН для отстройки ДЗ от КЗ на землю, рекомендуется для целей АУ в данном случае использовать ступень ДЗ от междуфазных КЗ.

11.2.2.4 Время срабатывания автоматически ускоряемой ступени ДЗ принимается равным 0,05-0,15 с.

Для ЛЭП, имеющих в режиме постановки под напряжение подключенные Т (АТ) на противоположном конце линии и для ЛЭП при наличии ответвлений, в случае если сопротивление срабатывания не отстроено от БТН, необходимо выполнить отстройку временем срабатывания ускоряемой ступени.

В этом случае время срабатывания автоматически ускоряемой ступени увеличивается до 0,4-0,5 с.

11.3 Расчет параметров настройки телеускоряемых ступеней ДЗ

11.3.1 Способы ТУ резервных защит

Для выполнения быстродействующей защиты ЛЭП с абсолютной селективностью устройства РЗ, установленные по концам линии, обмениваются информацией с помощью передачи разрешающих или блокирующих сигналов ТУ.

При организации ТУ с помощью разрешающих сигналов в случае КЗ на защищаемой ЛЭП в защитах на каждом конце линии происходит пуск прямонаправленной ступени ДЗ (первой ступени ДЗ с неполным охватом или ступени ДЗ с надежным охватом всей линии) и формируется разрешающий сигнал, который передается к защите противоположного конца ЛЭП. Отключение КЗ осуществляется на каждой стороне ЛЭП только при получении разрешающего сигнала и наличии пуска прямонаправленной телеускоряемой ступени ДЗ.

Для обеспечения селективного действия схемы ТУ в случае каскадного отключения внешнего КЗ на параллельной ЛЭП или обходной связи в защитах на каждом конце ЛЭП применяется обратнонаправленная ступень ДЗ для фиксации внешнего повреждения и блокирования приема и передачи разрешающего сигнала в случае реверса тока.

При организации ТУ с помощью блокирующих сигналов в защитах на каждом конце ЛЭП применяется обратнонаправленная ступень ДЗ, обеспечивающая пуск и передачу к защите противоположного конца линии блокирующего сигнала при внешних КЗ, и прямонаправленная телеускоряемая ступень ДЗ с полным охватом защищаемой ЛЭП для снятия пуска блокирующего сигнала при обнаружении повреждения в прямом направлении в защищаемой зоне. Отключение КЗ осуществляется на каждой стороне ЛЭП при отсутствии блокирующего сигнала и наличии пуска прямонаправленной телеускоряемой ступени ДЗ.

Указания по расчету параметров настройки телеускоряемых ступеней приводятся ниже для ДЗ одиночных, параллельных ЛЭП и ЛЭП при наличии ответвлений.

11.3.2 Расчет параметров настройки телеускоряемых ступеней ДЗ

11.3.2.1 Расчет сопротивления срабатывания прямонаправленной телеускоряемой ступени ДЗ по чувствительности при КЗ в конце защищаемой ЛЭП проводится по неравенствам (11.1) — (11.4).

Для ЛЭП при наличии ответвлений и ЛЭП с многосторонним питанием расчет сопротивления срабатывания проводится при КЗ на каждом конце ЛЭП, противоположном месту установки рассматриваемой защиты.

Для ЛЭП при наличии ответвлений:

- необходимо применять блокировку телеускоряемых ступеней ДЗ при КЗ на стороне НН (СН) Т (АТ) ответвлений;

- допускается замедлять работу телеускоренных ступеней при КЗ вблизи шин ВН ПС на ответвлении (на ошиновке ВН, на выводах или в обмотке ВН Т (АТ)), если время отключения КЗ допустимо по условиям обеспечения динамической устойчивости генерирующего оборудования.

Для выбора сопротивления срабатывания рассматриваются результаты расчета при металлических КЗ и при КЗ через переходные сопротивления в нормальной и ремонтных схемах прилегающей сети при нулевом перетоке мощности по защищаемой ЛЭП, а также при доаварийных перетоках мощности по ЛЭП, характерных для рассматриваемых схем сети.

В указанных выражениях коэффициенты чувствительности для ДО с круговыми и полигональными характеристиками срабатывания принимаются:

- 1,5 при металлических КЗ (допускается снижение коэффициента чувствительности до значения 1,25, если в качестве телеускоряемой ступени применяется вторая ступень ДЗ);

- 1,1-1,2 при КЗ через переходное сопротивление в режиме транзита;

- 1,2-1,5 при КЗ через переходное сопротивление при одностороннем отключении повреждения с противоположной стороны ЛЭП.

11.3.2.2 Расчет сопротивления срабатывания обратнонаправленной ступени ДЗ для схем ТУ проводится по согласованию по чувствительности с прямонаправленной телеускоряемой ступенью ДЗ на противоположном конце ЛЭП в соответствии с неравенствами:

- для ДО с круговыми характеристиками при равенстве углов максимальной чувствительности $\varphi_{мч}$ и характеристического угла $\varphi_{л}$ защищаемой ЛЭП:

$$Z_{уст.обр} \geq k_{cZ} \cdot (Z_{уст.прям} - |\underline{Z}_{1Л}|); \quad (11.5)$$

- для ДО с полигональными характеристиками при равенстве углов наклона полигональной характеристики $\varphi_{хар}$ и характеристического угла $\varphi_{л}$ защищаемой ЛЭП:

$$X_{уст.обр} \geq k_{cX} \cdot (X_{уст.прям} - |X_{1Л}|); \quad (11.6)$$

$$R_{уст.обр} \geq k_{cR} \cdot (R_{уст.прям} - |R_{1Л}|), \quad (11.7)$$

где $Z_{уст.прям}$, $X_{уст.прям}$, $R_{уст.прям}$ — полное, реактивное и активное сопротивления срабатывания прямонаправленной телеускоряемой ступени ДЗ на противоположном конце ЛЭП;

$Z_{уст.обр}$, $X_{уст.обр}$, $R_{уст.обр}$ — полное, реактивное и активное сопротивления срабатывания обратнонаправленной ступени ДЗ рассматриваемой защиты;

$\underline{Z}_{1Л}$, $X_{1Л}$, $R_{1Л}$ — полное, реактивное и активное сопротивления прямой последовательности защищаемой ЛЭП;

k_{cZ}, k_{cX} — коэффициенты согласования полных и реактивных сопротивлений срабатывания ступеней ДЗ, принимаются из диапазона 1,2-1,3;

k_{cR} — коэффициент согласования активных сопротивлений срабатывания ступеней ДЗ, принимается из диапазона 1,1-1,2.

При расчете параметров настройки телеускоряемых ступеней ДЗ от КЗ на землю рекомендуется при наличии технической возможности принять одинаковые уставки коэффициентов компенсации для прямонаправленной и обратнонаправленной ступеней ДЗ в защитах на противоположных концах ЛЭП для обеспечения селективной работы схемы ТУ при внешних КЗ.

В случае, если по концам защищаемой ЛЭП установлены разнотипные устройства РЗ, расчет сопротивления срабатывания обратнонаправленной ступени проводится методом нахождения конца зоны действия телеускоренной прямонаправленной ступени ДЗ и надежным охватом найденной зоны.

11.3.2.3 Отстройка характеристик срабатывания телеускоряемых ступеней ДЗ от нагрузочных режимов энергосистем для исключения излишнего пуска сигналов ТУ проводится в соответствии с 4.3.

12 Выбор параметров настройки ступеней дистанционной защиты для специальных условий применения

12.1 Резервирование ДЗШ

В составе ДЗ ЛЭП одна из ступеней ДЗ может быть направлена в шины для обеспечения резервирования при КЗ в зоне ДЗШ ПС, где установлена рассматриваемая защита.

Особенно эффективно использование отдельной направленной в шины ступени ДЗ для ЛЭП при наличии ответвлений. В случае КЗ на шинах и одностороннем отключении ЛЭП действием направленной в шины ступени ДЗ сохраняется электроснабжение потребителей ПС на ответвлениях с противоположной стороны линии.

Расчет сопротивления срабатывания рассматриваемой ступени ДЗ проводится по чувствительности при КЗ на шинах для ДО с круговыми и полигональными характеристиками по неравенствам (11.1) — (11.4).

В указанных неравенствах коэффициенты чувствительности для ДО с круговыми и полигональными характеристиками принимаются: 1,25-1,5.

Для выбора сопротивлений срабатывания рассматриваются результаты расчета при КЗ через переходные сопротивления на шинах ПС, где установлена рассматриваемая защита, в нормальной и ремонтных схемах прилегающей сети.

Сопротивление срабатывания и выдержка времени рассматриваемой ступени ДЗ рассчитывается по условию согласования с резервными защитами присоединений, отходящих от шин объекта, ДЗШ которого резервируется.

Отстройка характеристики срабатывания рассматриваемой ступени ДЗ от нагрузочных режимов энергосистем проводится в соответствии с 4.3.

12.2 Резервирование защит Т (АТ) ответвительных ПС

Одна из ступеней ДЗ в составе ДЗ ЛЭП с ответвлениями может использоваться для обеспечения резервирования защит Т (АТ) ПС на ответвлениях.

Целесообразность применения указанной ступени ДЗ должна определяться исходя из необходимости обеспечения следующих условий:

- обеспечение чувствительности при КЗ на стороне НН (СН) Т (АТ) ПС на ответвлениях с учетом влияния схемы соединения обмоток силовых Т Y/Δ на дистанционные замеры;
- обеспечение селективности с резервными защитами Т (АТ) ПС на ответвлениях (как правило, достигается выбором выдержки времени рассматриваемой ступени ДЗ, превышающей выдержки времени резервных защит Т (АТ) или резервных защит присоединений стороны НН (СН));
- координация времени отключения КЗ на стороне НН (СН) Т (АТ) ПС на ответвлениях устройствами РЗ и допустимого времени термической стойкости Т (АТ), при этом следует учитывать возможное увеличение времени ликвидации КЗ при каскадном действии защит;
- обеспечение отстройки от нагрузочных режимов работы энергосистем.

12.3 Ступень ДЗ, направленная в шины, обеспечивающая дальнее резервирование

В составе ДЗ ЛЭП одна из ступеней может быть направлена в шины для обеспечения резервирования защит смежных сетевых элементов, отходящих от шин ПС, где установлена рассматриваемая защита. Данное решение может применяться в случае, если обеспечение дальнего резервирования ступенью ДЗ, установленной на противоположном конце ЛЭП, невозможно по техническим данным защиты или другим расчетным условиям.

Использование направленной в шины ступени ДЗ в целях резервирования защит смежных элементов более эффективно по сравнению с ДЗ, установленной со стороны противоположного конца ЛЭП:

- меньше дистанционный замер при КЗ в конце зоны резервирования защит смежных сетевых элементов, что в некоторых случаях позволит обеспечить чувствительность и выполнить отстройку характеристики срабатывания рассматриваемой ступени ДЗ от нагрузочных режимов работы энергосистем;
- при дальнем резервировании защит смежных сетевых элементов направленная в шины ступень ДЗ отключает рассматриваемую ЛЭП только со стороны ПС, где произошел отказ защит, при этом сохраняется электроснабжение потребителей ПС на ответвлениях.

Параметры настройки рассматриваемой ступени ДЗ выбираются по следующим условиям:

- обеспечение селективности с резервными защитами сетевых элементов, отходящих от шин ПС, где установлена рассматриваемая защита;
- обеспечение чувствительности при КЗ в зоне резервирования;
- отстройка от нагрузочных режимов работы энергосистем.

12.4 Дистанционная защита ЛЭП на проходной ПС со схемой «мостик»

Пример схемы подключения ДЗ ЛЭП Л-1 и Л-2 к ТТ и ТН на проходной ПС «мостик» с ремонтной перемычкой приведен на рисунке 12.1.

При выводе в ремонт СВ и включении ремонтной перемычки ДЗ ЛЭП не только утрачивают токовые цепи, но и лишаются возможности воздействия на коммутационный аппарат. В этом случае требуется обеспечить отключение междуфазных КЗ по всей длине ЛЭП Л-1 и Л-2 ДЗ со стороны опорных ПС.

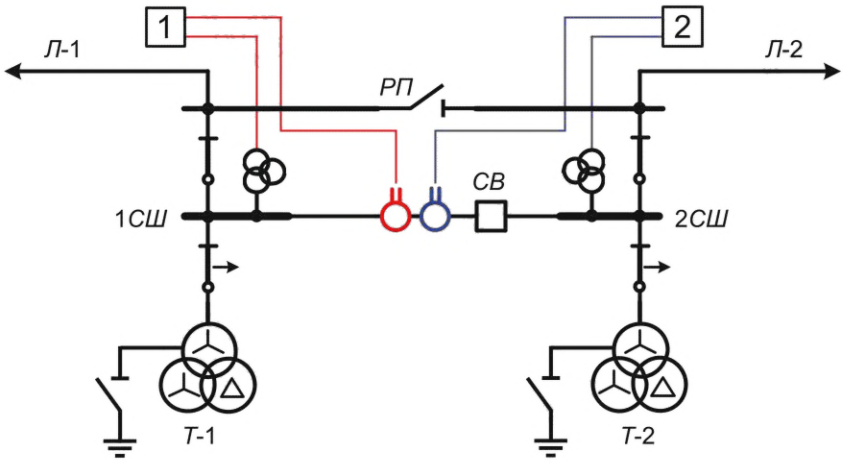


Рисунок 12.1 — Схема подключения ДЗ Л-1 и Л-2 к ТН и ТТ СВ

При включении ремонтной перемычки рассматриваемая ПС «мостик» становится отпаечной ПС, поэтому расчет и выбор параметров настройки ДЗ ЛЭП-1 и ЛЭП-2 со стороны опорных ПС следует проводить в соответствии с указаниями раздела 7 для ЛЭП при наличии ответвлений. Базовый коэффициент чувствительности для вторых ступеней ДЗ, установленных со стороны опорных ПС, действующих при междуфазных КЗ по всей длине ЛЭП Л-1 и Л-2, принимается в соответствии с 4.2.5.3:

- 1,5 — для ДО по сопротивлению срабатывания при отсутствии резервной ступени, обеспечивающей коэффициент чувствительности 1,5;
- 1,25 — для ДО по сопротивлению срабатывания при наличии резервной ступени, обеспечивающей коэффициент чувствительности 1,5.

В случае, если ЛЭП Л-1 и Л-2 оснащены основной быстродействующей защитой и со стороны проходной ПС предусматривается перевод токовых цепей основной быстродействующей защиты на ТТ ремонтной перемычки, допускается обеспечивать чувствительность только для третьих ступеней ДЗ при междуфазных КЗ по всей длине ЛЭП Л-1 и Л-2.

Базовый коэффициент чувствительности для третьих ступеней ДЗ, действующих в пределах суммарной длины ЛЭП Л-1 и Л-2, принимается в соответствии с 4.2.5.3: 1,5 — для ДО по сопротивлению срабатывания.

Расчет и выбор параметров настройки ДЗ ЛЭП Л-1 и Л-2 со стороны проходной ПС следует проводить с учетом схем подключения защиты к ТТ и ТН:

- при включении ДЗ ЛЭП Л-1 (Л-2) на ТТ СВ, как показано на рисунке 12.1, силовой трансформатор Т-1 (Т-2) будет входить в зону действия ДЗ и при выборе уставок должен учитываться как отпайка;
- при включении ДЗ ЛЭП Л-1 (Л-2) на сумму ТТ СВ и Т-1 (Т-2), как показано на рисунке 12.2, силовой трансформатор будет исключен из зоны действия ДЗ.

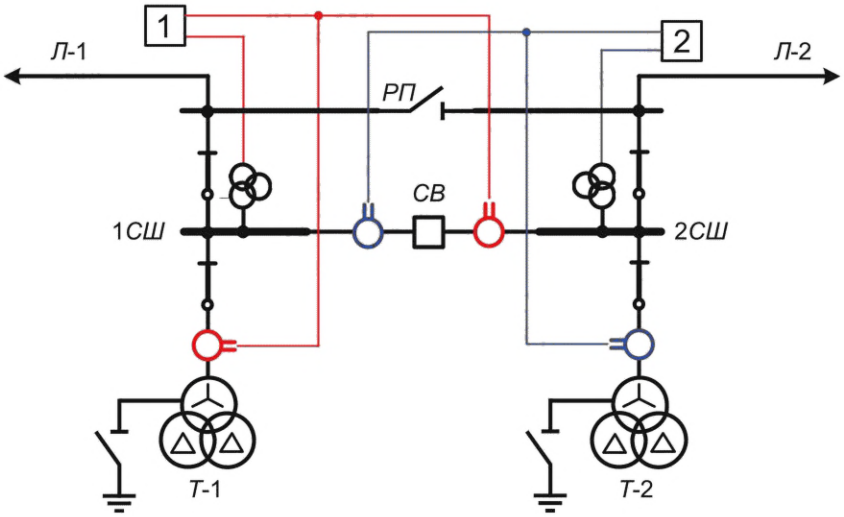


Рисунок 12.2 — Схема подключения ДЗ Л-1 и Л-2 на сумму ТТ СВ и ТТ силового трансформатора

13 Особенности расчета и выбора параметров настройки дистанционной защиты коротких линий электропередачи

При расчете и выборе параметров настройки ДЗ коротких ЛЭП требуется учитывать ряд ограничений по применению первой ступени ДЗ с охватом части защищаемой ЛЭП.

В технических данных устройства РЗ для каждой ступени ДЗ приводится диапазон регулирования сопротивлений срабатывания во вторичных величинах. Перевод сопротивлений срабатывания $Z_{\text{уст перв}}$, рассчитанных в первичных величинах, во вторичные проводится по формуле

$$Z_{\text{уст втор}} = \frac{n_{\text{ТТ}}}{n_{\text{ТН}}} \cdot Z_{\text{уст перв}}, \tag{13.1}$$

где $n_{\text{ТТ}}$, $n_{\text{ТН}}$ — коэффициенты трансформации ТТ и ТН, к которым подключена защита.

Полученное значение $Z_{\text{уст втор}}$ следует проверить на соответствие располагаемому диапазону регулирования уставок во вторичных величинах.

На коротких ЛЭП диапазон регулирования сопротивлений срабатывания $Z_{\text{уст втор}}$ или $X_{\text{уст втор}}$ может ограничить применение первой ступени ДЗ. Минимально возможная длина линии $L_{\text{мин}}$ при защите ее первой ступенью ДЗ может быть определена по формуле

$$L_{\text{мин}} = \frac{1}{Z_{\text{1уд перв}}} \cdot \left(\frac{n_{\text{ТН}}}{n_{\text{ТТ}}} \cdot \frac{Z_{\text{уст втор мин}}}{k_{\text{отс}}} \right), \tag{13.2}$$

где $Z_{\text{уст втор мин}}$ — минимальная уставка сопротивления срабатывания из располагаемого диапазона регулирования, Ом (вторичных);

$k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, принятый при расчете сопротивления срабатывания первой ступени ДЗ;

$Z_{\text{1уд перв}}$ — удельное полное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км (первичных).

В электромеханических и микроэлектронных устройствах РЗ общий диапазон токов точной работы для первой и второй ступени ДЗ также может ограничить применение первой ступени ДЗ, если в целях обеспечения чувствительности второй ступени ДЗ по току точной работы приходится переходить на следующий диапазон значений токов. В этом случае соответствующее значение минимального сопротивления срабатывания $Z_{\text{уст мин}}$, регулируемое в цепях тока, может не позволить принять уставку сопротивления срабатывания первой ступени ДЗ, требуемую по условию селективности.

На коротких ЛЭП дополнительным ограничением применения первой ступени ДЗ является значение напряжения в месте установки защиты при КЗ вблизи границы зоны срабатывания. В технических данных устройства РЗ приводится минимальное значение напряжения, при котором обеспечивается

точность дистанционных измерений. В случае коротких ЛЭП остаточное напряжение, которое равно падению напряжения на сопротивлении линии от места КЗ до места установки защиты, может составлять несколько процентов от номинального напряжения. При таком малом значении измеряемого напряжения погрешность измерительных ТН оказывает значительное влияние на точность дистанционных замеров.

Это особенно актуально в случае большой величины отношения $Z_С$ / $Z_Л$ — сопротивления прямой последовательности примыкающей системы со стороны места установки ДЗ и сопротивления прямой последовательности защищаемой линии.

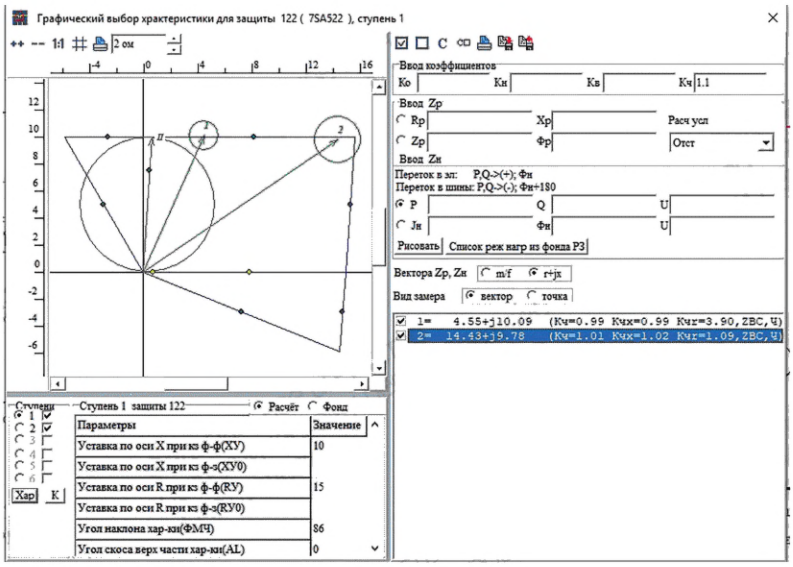


Рисунок 13.1 — Сравнение чувствительности круговой и полигональной характеристик ДО при КЗ через переходное сопротивление

Полигональные характеристики срабатывания ДО имеют преимущество по сравнению с круговыми характеристиками для защиты коротких ЛЭП, так как обеспечивают лучшую чувствительность при КЗ через переходное сопротивление (рисунок 13.1).

В случае, если на коротких ЛЭП невозможно использование первой ступени ДЗ без выдержки времени, сопротивление срабатывания выбирается исходя из технических данных устройства РЗ и согласуется по чувствительности и времени срабатывания с защитами смежных сетевых элементов. При этом время ликвидации повреждения при выводе основной быстродействующей защиты ЛЭП должно удовлетворять требованиям динамической устойчивости генерирующего оборудования.

В качестве второй быстродействующей защиты ЛЭП возможно применение телеускоряемых ступеней ДЗ от всех видов КЗ с «полным охватом» и передачей разрешающих или блокирующих сигналов. Рекомендации по расчету параметров настройки телеускоряемых ступеней ДЗ приведены в 11.3.

Приложение А
(справочное)

Характеристики срабатывания органов дистанционной защиты в устройствах релейной защиты

ДО от междуфазных КЗ в устройствах РЗ на электромеханической или микроэлектронной элементной базе и ДО от всех видов КЗ в составе микропроцессорных устройств РЗ выполняются с круговыми или полигональными характеристиками срабатывания.

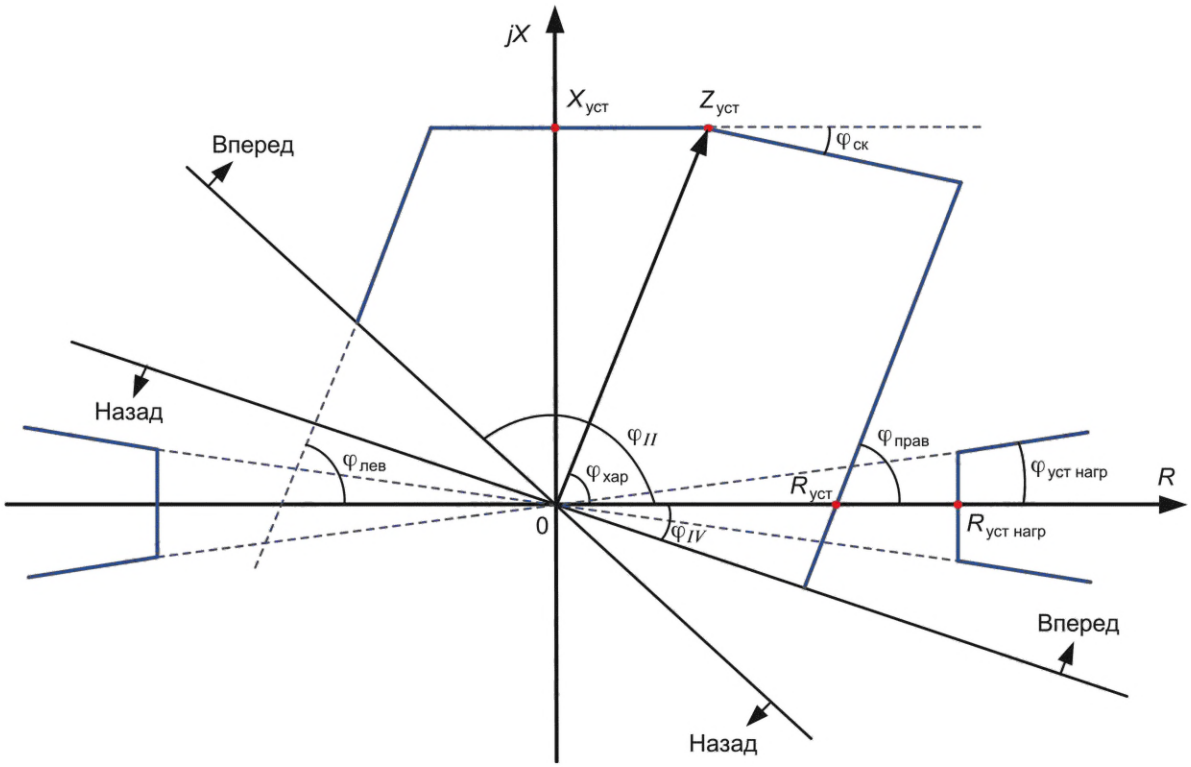


Рисунок А.1 — Пример направленной полигональной характеристики срабатывания

Каждая из ступеней ДЗ ЛЭП может быть направленной в прямом направлении (в линию), в обратном направлении (в шины) или ненаправленной.

Параметры, определяющие границы полигональной характеристики, задаются для каждой ступени ДЗ (рисунок А.1):

$Z_{уст}$ или $X_{уст}$ — полное или реактивное сопротивление срабатывания;

$R_{уст}$ — активное сопротивление срабатывания;

$\varphi_{хар}$ — угол наклона полигональной характеристики, по которому задается параметр $Z_{уст}$;

$\varphi_{прав}$ — угол наклона правой боковой стороны характеристики;

$\varphi_{лев}$ — угол наклона левой боковой стороны характеристики;

$\varphi_{ск}$ — угол наклона (скоса) верхней границы характеристики;

φ_{II} — угол ограничения характеристики во втором квадранте комплексной плоскости;

φ_{IV} — угол ограничения характеристики в четвертом квадранте комплексной плоскости;

$R_{уст\ нагр}$ и $\varphi_{уст\ нагр}$ — активное сопротивление и угол выреза нагрузки.

Полигональные характеристики имеют независимое задание параметров настройки по полному или реактивному и активному сопротивлениям срабатывания, что позволяет обеспечить более высокую чувствительность при КЗ через переходные сопротивления по сравнению с круговыми характеристиками.

Производители микропроцессорных устройств РЗ рекомендуют придерживаться определенной величины соотношения $R_{уст}$ / $X_{уст}$ при выборе параметров настройки полигональных характеристик в зависимости от длины и типа ЛЭП (таблица А.1).

В случае коротких ЛЭП с двусторонним питанием при большом значении величины $R_{уст}$ / $X_{уст}$ возможно излишнее действие первой ступени ДЗ при внешних КЗ через переходное сопротивление. Подпитка КЗ от стороннего

источника приводит к увеличению активной составляющей дистанционного замера и одновременно к уменьшению его угла в случае перетока активной мощности в защищаемом направлении, что может вызвать отрицательную погрешность в измерении реактивного сопротивления (излишний охват). Для коротких кабельных и воздушных ЛЭП рекомендуется принимать отношение $R_{уст}$ / $X_{уст}$ в указанном диапазоне значений (таблица А.1).

Для предотвращения неселективной работы первой ступени ДЗ при внешних КЗ через переходное сопротивление также предусматривается наклон ($\varphi_{ск}$) верхней части полигональной характеристики. В некоторых микропроцессорных устройствах РЗ предусмотрены специальные алгоритмы, предотвращающие расширение зоны охвата первой ступени ДЗ в указанном случае и не требующие задания специальных параметров настройки.

Для длинных ЛЭП рекомендуется такое отношение $R_{уст}$ / $X_{уст}$, которое обеспечит чувствительность ДЗ при КЗ через переходное сопротивление на защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования.

Таблица А.1 — Типичные значения отношения $R_{уст}$ / $X_{уст}$ для различных ЛЭП

Воздушная/кабельная линия	Отношение $R_{уст}$ / $X_{уст}$
Короткие КЛ < 3 км	3—5
Длинные КЛ > 3 км	2—3
Короткие ВЛ < 10 км	2—5
ВЛ < 100 км	1—2
ВЛ (100 — 200) км	0,5—1
Длинные ВЛ > 200 км	≤ 0,5

В случае независимого задания сопротивления срабатывания $R_{уст}$ для правой и левой боковых сторон полигональной характеристики рекомендуются следующие соотношения:

- для первой ступени $R_{уст\ лев}$ = (0,75 – 1,0) $R_{уст\ прав}$;
- для второй ступени $R_{уст\ лев}$ = (0,5 – 1,0) $R_{уст\ прав}$;
- для третьей ступени $R_{уст\ лев}$ = (0,25 – 0,75) $R_{уст\ прав}$.

Ступени ДЗ от всех видов КЗ могут иметь независимое задание сопротивлений срабатывания $Z_{уст}$ или $X_{уст}$ и $R_{уст}$ для ДО от междуфазных КЗ и ДО от КЗ на землю.

Угол наклона полигональной характеристики, по которому задается параметр $Z_{уст}$ ($\varphi_{хар}$), в случае однородной воздушной или кабельной ЛЭП рекомендуется задавать равным характеристическому углу линии $\varphi_{л}$, что обеспечивает чувствительность при металлических КЗ на защищаемой ЛЭП:

$$\varphi_{хар} = \varphi_{л} = \text{arctg}\left(\frac{X_{1л}}{R_{1л}}\right), \quad (А.1)$$

где $R_{1л}$ и $X_{1л}$ — активное и реактивное сопротивления прямой последовательности ЛЭП.

Для неоднородных ЛЭП, имеющих участки с различными удельными сопротивлениями, кабельно-воздушных ЛЭП, а также для ЛЭП, для которых требуется учет емкостной проводимости, угол $\varphi_{хар}$ принимается равным углу эквивалентного сопротивления прямой последовательности, рассчитанного при металлическом трехфазном КЗ в конце защищаемой ЛЭП.

Для ряда микропроцессорных устройств РЗ угол наклона полигональной характеристики задается не в явном виде, а рассчитывается устройством по заданным удельным параметрам линии прямой последовательности.

Углы наклона правой $\varphi_{прав}$ и левой $\varphi_{лев}$ боковых сторон полигональных характеристик могут иметь фиксированное значение, равное $\varphi_{хар}$, или иметь независимое регулирование уставок, что позволяет обеспечить отстройку от нагрузочных режимов или повысить чувствительность при КЗ через переходные сопротивления.

Направленность полигональных характеристик обеспечивается измерительными органами направления, при этом характеристика срабатывания ДО ограничивается двумя отрезками, исходящими из начала координат и расположенными во втором и четвертом квадрантах комплексной плоскости.

Угол ограничения характеристики в четвертом квадранте комплексной плоскости φ_{IV} выбирается по условию обеспечения чувствительности при КЗ через переходное сопротивление в начале защищаемой ЛЭП.

Угол ограничения характеристики во втором квадранте комплексной плоскости φ_{II} выбирается по условию обеспечения чувствительности при КЗ через переходное сопротивление на защищаемой ЛЭП и в зоне дальнего резервирования.

Для ряда микропроцессорных устройств РЗ углы φ_{II} и φ_{IV} направленной характеристики имеют фиксированное значение и не регулируются. Для этих устройств при выборе параметров настройки возможно лишь оценить чувствительность защиты в указанных случаях.

ДЗ с прямонаправленной характеристикой, проходящей через начало координат, должна надежно работать при КЗ в начале защищаемой ЛЭП и надежно не работать при КЗ «за спиной». При близких КЗ напряжение поврежденных фаз в месте установки защиты практически снижается до нуля.

Если значение напряжения мало для правильного определения направления, в качестве поляризующей величины в измерительных органах направления ДЗ могут использоваться напряжения поврежденных фаз с долей запомненного на фиксированное время напряжения из предаварийного режима (напряжение «памяти»), напряжение неповрежденных фаз с фазной коррекцией, обеспечивающей совпадение по фазе с напряжением для соответствующих поврежденных контуров («кросс-поляризация»).

В ряде устройств РЗ в измерительных органах направления ДЗ в качестве поляризующей величины используется напряжение прямой последовательности с долей запомненного на фиксированное время напряжения прямой последовательности из предаварийного режима (напряжение «памяти»), что обеспечивает правильное определение направления при всех видах КЗ вблизи места установки защиты.

Следует также учитывать рекомендации производителей устройств РЗ по проверке направленности ДО при близких КЗ через переходное сопротивление в случае использования «кросс-поляризации», напряжения «памяти» и напряжения прямой последовательности в измерительных органах направления ДЗ.

В ряде устройств РЗ характеристика срабатывания автоматически ускоряемой ступени ДЗ может быть ненаправленной или иметь смещение в третий квадрант комплексной плоскости для обеспечения надежной работы при близких трехфазных КЗ при включении ЛЭП под напряжение.

Для предотвращения неселективной работы первой ступени ДЗ при внешних КЗ через переходное сопротивление предусматривается наклон (скос) верхней части полигональной характеристики ($\varphi_{ск}$). В некоторых микропроцессорных устройствах РЗ предусмотрены алгоритмы, предотвращающие расширение зоны охвата первых ступеней ДЗ и не требующие задания специальных параметров настройки.

Для обеспечения отстройки характеристик срабатывания ДЗ от нагрузочных режимов работы энергосистем предусматривается вырез полигональной характеристики в области нагрузки (рисунок А.1). Вырез нагрузки может быть реализован в характеристике измерительного или пускового ДО, в характеристике фазового селектора на дистанционном принципе или может быть задан как отдельная функция.

Характеристики срабатывания ДО от междуфазных КЗ в устройствах РЗ на микроэлектронной элементной базе выполняются в виде треугольника или четырехугольника (рисунок А.2).

Параметры, определяющие точки характеристики b1-b4 и смещение характеристики $Z_{см}$ в первый или третий квадранты комплексной плоскости, задаются в долях от сопротивления срабатывания $Z_{уст}$, угол наклона характеристики срабатывания $\varphi_{хар}$ имеет фиксированное значение.

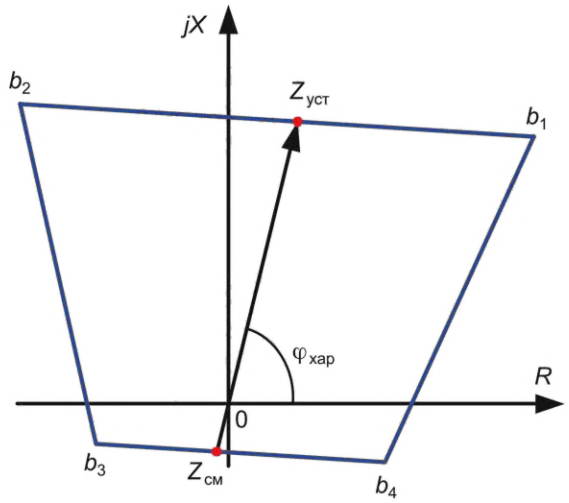


Рисунок А.2 — Пример направленной характеристики срабатывания в виде четырехугольника со смещением

В устройствах РЗ на электромеханической элементной базе ДО от междуфазных КЗ выполняются с круговыми характеристиками срабатывания.

В некоторых микропроцессорных устройствах РЗ есть возможность выбора формы характеристики срабатывания ДО — полигональная или круговая.

Параметры, определяющие границы круговой характеристики, задаются для каждой ступени ДЗ (рисунок А.3):

$Z_{уст}$ — полное сопротивление срабатывания;

$\varphi_{мч}$ — угол максимальной чувствительности;

$R_{уст\ нагр}$ и $\varphi_{уст\ нагр}$ — активное сопротивление и угол выреза нагрузки, применяется в микропроцессорных устройствах РЗ.

Круговая характеристика может быть направленной в прямом направлении (в линию), в обратном направлении (в шины) или быть ненаправленной, в этом случае характеристика срабатывания представляет собой окружность с центром в начале координат.

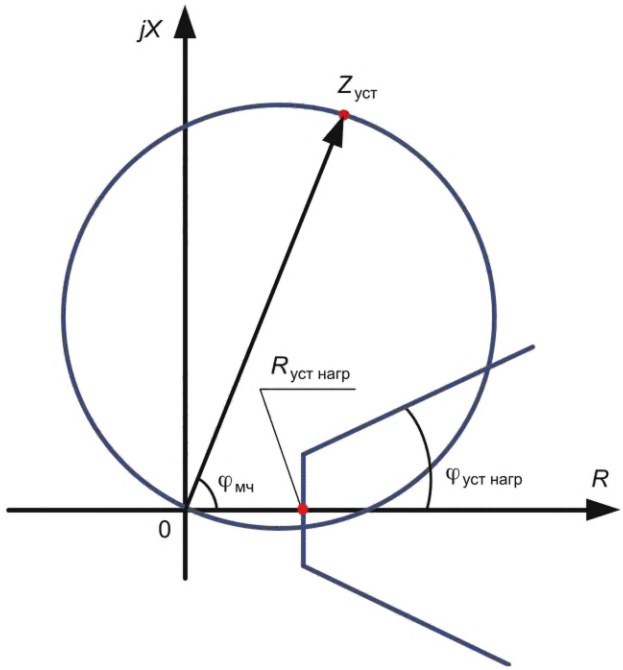


Рисунок А.3 — Пример направленной круговой характеристики с вырезом в области нагрузки

Круговые характеристики могут иметь смещение в первый или третий квадрант комплексной плоскости, которое, как правило, регулируется в долях от величины уставки $Z_{уст}$.

Для однородной воздушной или кабельной ЛЭП угол максимальной чувствительности $\varphi_{мч}$ круговой характеристики для ступеней ДЗ от всех видов КЗ рекомендуется задавать равным характеристическому углу линии $\varphi_{л}$, что обеспечивает чувствительность при металлических КЗ на защищаемой ЛЭП:

$$\varphi_{мч} = \varphi_{л} = \text{arctg}\left(\frac{X_{1л}}{R_{1л}}\right), \quad (А.2)$$

где $R_{1л}$ и $X_{1л}$ — активное и реактивное сопротивления прямой последовательности защищаемой ЛЭП.

Для неоднородных ЛЭП, кабельно-воздушных ЛЭП, а также ЛЭП, для которых требуется учет емкостной проводимости, угол максимальной чувствительности $\varphi_{мч}$ принимается равным углу эквивалентного сопротивления прямой последовательности, рассчитанного при металлическом трехфазном КЗ в конце защищаемой ЛЭП.

Для ряда ДЗ имеется возможность выполнить характеристику срабатывания в виде эллипса или линзы, что позволяет обеспечить лучшую отстройку от нагрузочных режимов работы энергосистем (рисунок А.4).

В технических данных для конкретных устройств РЗ для каждой ступени ДЗ приводится располагаемый диапазон регулирования сопротивлений срабатывания $Z_{уст}$ или $X_{уст}$ и $R_{уст}$ во вторичных величинах применительно к величине вторичного номинального тока ТТ. Параметры настройки ДЗ, рассчитанные в первичных величинах, необходимо проверить на соответствие приведенным диапазонам регулирования во вторичных величинах.

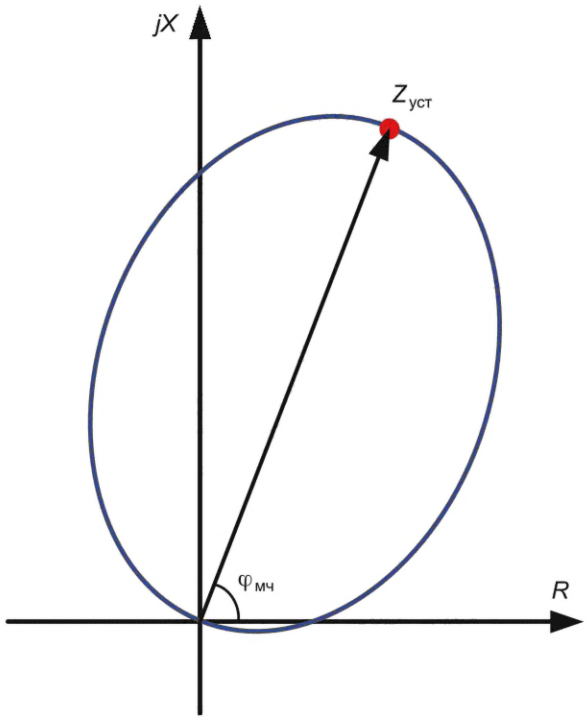


Рисунок А.4 — Пример направленной характеристики в виде эллипса

Приложение Б
(справочное)

Дистанционная защита от всех видов коротких замыканий

Б.1 Виды КЗ и контуры для дистанционных измерений

В данном приложении приведены аналитические выражения для вычисления дистанционных замеров при всех видах КЗ, рассмотрены факторы, которые требуют учета при расчете и выборе параметров настройки ДЗ ЛЭП.

Контролируемое ДЗ комплексное сопротивление $\underline{Z}$ при КЗ в электрической сети во многих случаях пропорционально расстоянию между местом установки защиты и местом повреждения. К защите подводятся фазные токи $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$ от ТТ и фазные напряжения $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ от ТН.

В таблице Б.1 представлены виды повреждений в трехфазной системе и соответствующие им контуры для дистанционных измерений.

Таблица Б.1 — Виды повреждений и контуры для дистанционных измерений

Вид КЗ	Поврежденные фазы	Контуры для дистанционных измерений
Трехфазное КЗ	*ABC*	*AB* или *BC* или *CA*
Двухфазное КЗ	*AB* *BC* *CA*	*AB* *BC* *CA*
Двухфазное КЗ на землю	*AB*0 *BC*0 *CA*0	*A*0 или *B*0 или *AB* *B*0 или *C*0 или *BC* *C*0 или *A*0 или *CA*
Однофазное КЗ на землю	*A*0 *B*0 *C*0	*A*0 *B*0 *C*0

Измерительные органы ДЗ выполняются так, чтобы при любом виде КЗ дистанционный замер по поврежденному контуру соответствовал сопротивлению прямой последовательности участка электрической цепи от места установки защиты до места повреждения.

ДЗ в общем случае содержит ДО от междуфазных КЗ и ДО от КЗ на землю. При выборе параметров настройки ступеней ДЗ от всех видов КЗ необходима оценка всех контуров измерений для каждого вида повреждения.

Б.2 ДО от междуфазных КЗ

ДО от междуфазных КЗ подключаются на линейное напряжение и разность токов соответствующих фаз. Это обеспечивает одинаковые дистанционные замеры при различных видах междуфазных КЗ:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{AB} &= \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_B}{\underline{I}_A - \underline{I}_B}; \\ \underline{Z}_{BC} &= \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_C}{\underline{I}_B - \underline{I}_C}; \\ \underline{Z}_{CA} &= \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_A}{\underline{I}_C - \underline{I}_A}. \end{aligned} \qquad (Б.1)$$

Металлические междуфазные КЗ разных видов в точке K на расстоянии L_k от места установки защиты на линии с односторонним или двухсторонним питанием: двухфазное КЗ $К^{(2)}$, двухфазное КЗ на землю $К^{(1,1)}$ и трехфазное КЗ $К^{(3)}$ представлены не рисунке А.1.

Фазные токи в месте установки защиты $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$ определяются через симметричные составляющие:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0}; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B0}; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \underline{I}_{C0}. \end{aligned} \qquad (Б.2)$$

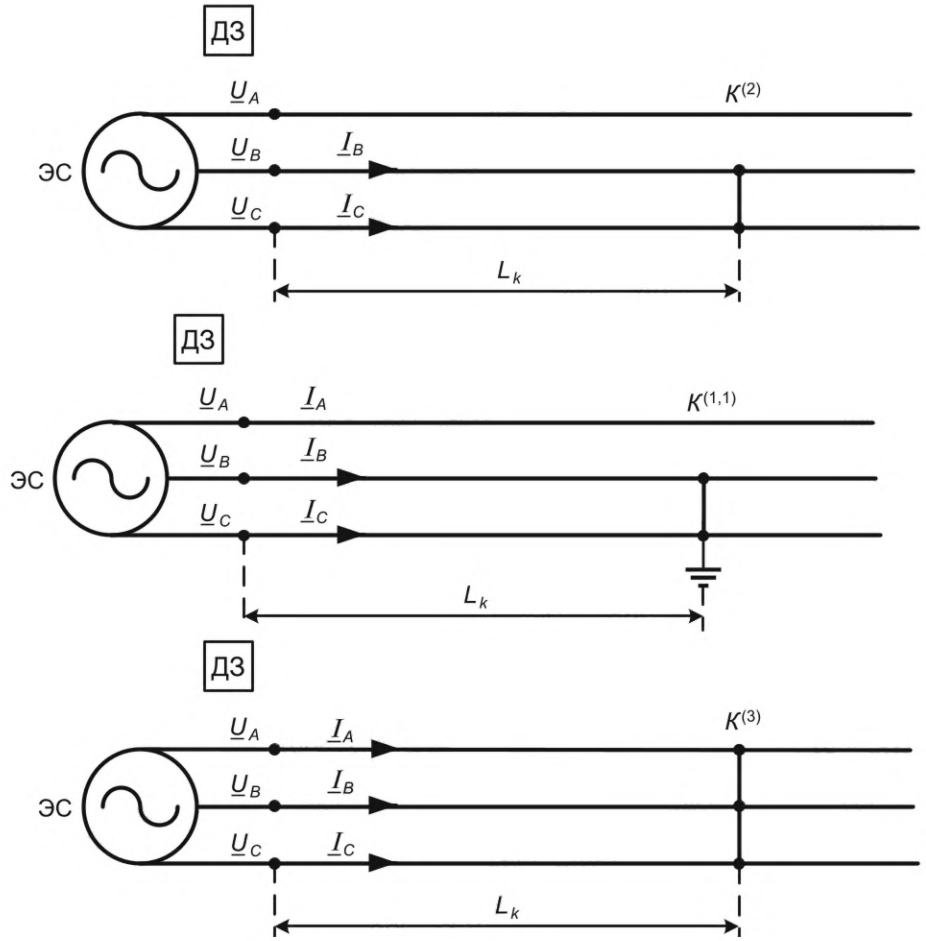


Рисунок Б.1 — Виды междуфазных повреждений на линии

Для поврежденного контура *BC* напряжение $\underline{U}_{BC}$ в месте установки защиты определяется:

$$\underline{U}_{BC} = \left(\underline{I}_{B1} \cdot \underline{Z}_{1k} + \underline{I}_{B2} \cdot \underline{Z}_{2k} + \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{0k}\right) - \left(\underline{I}_{C1} \cdot \underline{Z}_{1k} + \underline{I}_{C2} \cdot \underline{Z}_{2k} + \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{0k}\right), \quad (Б.3)$$

где $\underline{Z}_{1k}$, $\underline{Z}_{2k}$, $\underline{Z}_{0k}$ — сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности участка линии от места установки защиты до места повреждения.

С учетом равенства сопротивлений прямой и обратной последовательности поврежденного участка линии $\underline{Z}_{1k} = \underline{Z}_{2k}$:

$$\underline{U}_{BC} = (\underline{I}_B - \underline{I}_C) \cdot \underline{Z}_{1k};$$

$$\underline{Z}_{BC} = \frac{(\underline{I}_B - \underline{I}_C) \cdot \underline{Z}_{1k}}{(\underline{I}_B - \underline{I}_C)} = \underline{Z}_{1k}. \quad (Б.4)$$

Полученное выражение $\underline{Z}_{BC}$ для контура *BC* справедливо при $K^{(2)}$, $K^{(1,1)}$ и $K^{(3)}$. Аналогичные выражения можно получить для дистанционных замеров $\underline{Z}_{AB}$, $\underline{Z}_{CA}$ при соответствующих видах междуфазных КЗ. Полноценную защиту от междуфазных повреждений можно выполнить с помощью трех ДО, подключенных на напряжения и токи в соответствии с таблицей Б.2.

Таблица Б.2 — ДО от междуфазных повреждений

ДО	Входные величины ДЗ		Измеряемое сопротивление	Вид КЗ
	Напряжение	Ток		
$ДО_{AB}$	$\underline{U}_{AB}$	$\underline{I}_{AB}$	$\underline{Z}_{AB}$	*ABC, AB, AB*0
$ДО_{BC}$	$\underline{U}_{BC}$	$\underline{I}_{BC}$	$\underline{Z}_{BC}$	*ABC, BC, BC*0
$ДО_{CA}$	$\underline{U}_{CA}$	$\underline{I}_{CA}$	$\underline{Z}_{CA}$	*ABC, AC, AC*0

При металлических КЗ $K^{(2)}$ и $K^{(1,1)}$ только один из замеров по контурам «фаза-фаза» $\underline{Z}_{AB}$, $\underline{Z}_{BC}$, $\underline{Z}_{CA}$ пропорционален расстоянию до места повреждения L_k, а при трехфазных КЗ все три дистанционных замера $\underline{Z}_{AB}$, $\underline{Z}_{BC}$, $\underline{Z}_{CA}$ пропорциональны L_k.

Существует ряд факторов, которые влияют на дистанционные замеры при междуфазных КЗ и искажают зону срабатывания защиты. К ним относятся наличие переходного сопротивления в месте КЗ, наличие доаварийной нагрузки, различие в токах, протекающих в месте установки защиты и в месте повреждения (промежуточная подпитка) и т.д.

Б.3 ДО от КЗ на землю

ДО от КЗ на землю подключаются на фазные напряжения и соответствующие компенсированные фазные токи. Добавление к фазному току доли тока нулевой последовательности $\underline{K} \cdot 3\underline{I}_0$ называется токовой компенсацией, где коэффициент $\underline{K}$ является комплексным коэффициентом компенсации.

Цель токовой компенсации — обеспечить при металлическом КЗ на землю дистанционный замер, равный сопротивлению прямой последовательности участка электрической цепи от места установки защиты до места повреждения.

Дистанционные измерения с использованием комплексного коэффициента компенсации $\underline{K}$ проводятся по формулам:

$$\underline{Z}_{A0} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0};$$

$$\underline{Z}_{B0} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{I}_B + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0}; \qquad (Б.5)$$

$$\underline{Z}_{C0} = \frac{\underline{U}_C}{\underline{I}_C + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0}.$$

Металлическое однофазное КЗ на землю в точке K на расстоянии L_k от места установки защиты на линии с односторонним или двухсторонним питанием ($K^{(1)}$) предтавлено не рисунке Б.2.

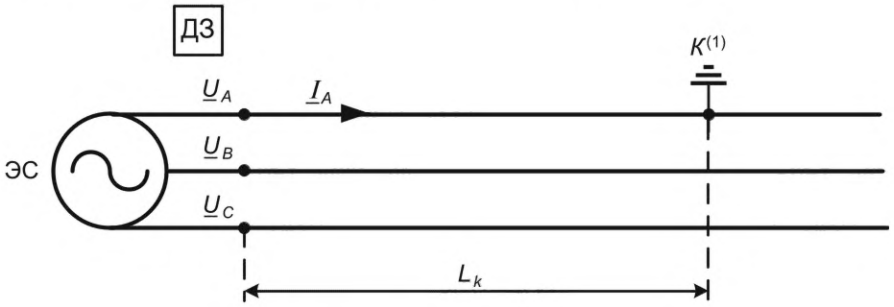


Рисунок Б.2 — Однофазное КЗ на землю

Напряжение поврежденной фазы $\underline{U}_A$ в месте установки защиты с учетом равенства сопротивлений $\underline{Z}_{1k} = \underline{Z}_{2k}$ участка линии L_k определяется:

$$\underline{U}_A = \underline{I}_{A1} \cdot \underline{Z}_{1k} + \underline{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{1k} + \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{0k} + \left(\underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{1k} - \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{1k}\right) = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_{1k} + \underline{I}_0 \cdot \left(\underline{Z}_{0k} - \underline{Z}_{1k}\right) = \left(\underline{I}_A + \underline{K} \cdot \underline{I}_0\right) \cdot \underline{Z}_{1k}. \qquad (Б.6)$$

Если к защите подвести напряжение $\underline{U}_A$ и ток с компенсацией ($\underline{I}_A + \underline{K} \cdot \underline{I}_0$), дистанционный замер по контуру $A0$ определяется по формуле

$$\underline{Z}_{A0} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A + \underline{K} \cdot \underline{I}_0} = \underline{Z}_{1k}, \qquad (Б.7)$$

где $\underline{K}$ — комплексный коэффициент компенсации, рассчитывается по формуле (Б.8):

$$\underline{K} = \frac{\underline{Z}_{0k} - \underline{Z}_{1k}}{\underline{Z}_{1k}}. \qquad (Б.8)$$

Если к защите подводится утроенный ток нулевой последовательности $3I_0$, дистанционный замер по контуру $A0$ определяется по формуле

$$\underline{Z}_{A0} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0}. \qquad (Б.9)$$

В этом случае комплексный коэффициент компенсации $\underline{K}$ рассчитывается по формуле

$$\underline{K} = \frac{\underline{Z}_{0k} - \underline{Z}_{1k}}{3\underline{Z}_{1k}}. \qquad (Б.10)$$

В общем случае при металлических $K^{(1)}$ дистанционный замер $\underline{Z}_{ф0}$ по контуру фаза-земля определяется по формуле

$$\underline{Z}_{ф0} = \frac{\underline{U}_ф}{\underline{I}_ф + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0}, \quad (Б.11)$$

где $\underline{U}_ф$, $\underline{I}_ф$ — напряжение и ток поврежденной фазы в месте установки защиты;

$3\underline{I}_0$ — утроенный ток нулевой последовательности в месте установки защиты.

Таким образом, при подведении к ДО фазного напряжения и фазного тока с компенсацией тока нулевой последовательности дистанционный замер по поврежденному контуру фаза — земля при металлическом $K^{(1)}$ составит величину $\underline{Z}_{1k}$ — сопротивление прямой последовательности участка линии от места установки защиты до места повреждения.

Для одиночных ЛЭП без взаимоиндукции, ЛЭП без емкостной проводимости комплексный коэффициент компенсации $\underline{K}$ рассчитывается по сопротивлениям прямой $\underline{Z}_{1л}$ и нулевой $\underline{Z}_{0л}$ последовательности защищаемой линии:

$$\underline{K} = \frac{\underline{Z}_{0л} - \underline{Z}_{1л}}{3\underline{Z}_{1л}}. \quad (Б.12)$$

Для ЛЭП, индуктивно связанных с другими линиями, при наличии ответвлений с Т (АТ) с глухозаземленными нейтралями, для протяженных ЛЭП с емкостной проводимостью коэффициент компенсации $\underline{K}$ рассчитывается при металлическом $K^{(1)}$ в конце защищаемой ЛЭП (в конце защищаемой зоны) по формуле

$$\underline{K} = \frac{\underline{U}_ф - \underline{Z}_{1л} \cdot \underline{I}_ф}{\underline{Z}_{1л} \cdot 3\underline{I}_0}, \quad (Б.13)$$

где $\underline{U}_ф$, $\underline{I}_ф$ — напряжение и ток поврежденной фазы в месте установки защиты;

$3\underline{I}_0$ — утроенный ток нулевой последовательности в месте установки защиты;

$\underline{Z}_{1л}$ — полное сопротивление прямой последовательности защищаемой ЛЭП (или защищаемой зоны), вычисленное при металлическом $K^{(3)}$ в расчетной точке.

ДЗ от КЗ на землю выполняется с помощью трех ДО, подключенных на фазные напряжения и соответствующие фазные токи с компенсацией тока нулевой последовательности (таблица Б.3).

Таблица Б.3 — ДО от замыканий на землю

ДО	Входные величины		Измеряемое сопротивление	Вид КЗ
	Напряжение	Ток		
$ДО_{A0}$	$\underline{U}_A$	$\underline{I}_A + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0$	$\underline{Z}_{A0}$	*A*0, *AB*0, *AC*0
$ДО_{B0}$	$\underline{U}_B$	$\underline{I}_B + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0$	$\underline{Z}_{B0}$	*B*0, *AB*0, *BC*0
$ДО_{C0}$	$\underline{U}_C$	$\underline{I}_C + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0$	$\underline{Z}_{C0}$	*C*0, *AC*0, *BC*0

При металлическом $K^{(1)}$ замер по одному из контуров «фаза — земля» пропорционален расстоянию до места повреждения L_k, а при металлических двухфазных КЗ на землю замеры по одному междуфазному контуру «фаза — фаза» и двум контурам «фаза — земля» пропорциональны расстоянию до места повреждения L_k.

Вместо комплексного коэффициента компенсации $\underline{K}$ может использоваться пара вещественных коэффициентов компенсации K_X и K_R.

Формула (Б.6) может быть преобразована для напряжения поврежденной фазы $\underline{U}_A$ с учетом того, что к защите подводится утроенный ток нулевой последовательности $3\underline{I}_0$:

$$\underline{U}_A = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_{1k} + 3\underline{I}_0 \cdot \frac{\underline{Z}_{0k} - \underline{Z}_{1k}}{3} = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_{1k} + 3\underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_E, \quad (Б.14)$$

где

$$\underline{Z}_E = \left(\underline{Z}_{0k} - \underline{Z}_{1k}\right)/3 = \left(R_{0k} - R_{1k}\right)/3 + j\left(X_{0k} - X_{1k}\right)/3 = R_E + jX_E\,.$$

$$\underline{U}_A = \underline{I}_A \cdot R_{1k} + 3\underline{I}_0 \cdot R_E \cdot \left(\frac{R_{1k}}{R_{1k}}\right) + \underline{I}_A \cdot jX_{1k} + 3\underline{I}_0 \cdot jX_E \cdot \left(\frac{X_{1k}}{X_{1k}}\right) = \left(\underline{I}_A + 3\underline{I}_0 \cdot \frac{R_E}{R_{1k}}\right) \cdot R_{1k} + \left(\underline{I}_A + 3\underline{I}_0 \cdot \frac{X_E}{X_{1k}}\right) \cdot jX_{1k}. \quad (Б.15)$$

Таким образом, для получения замера $\underline{Z}_{A0} = \underline{Z}_{1k}$ можно использовать компенсацию тока нулевой последовательности с применением вещественных коэффициентов компенсации K_R, K_X:

$$K_R = \frac{R_{0k} - R_{1k}}{3 \cdot R_{1k}}; \quad K_X = \frac{X_{0k} - X_{1k}}{3 \cdot X_{1k}}. \quad (Б.16)$$

Для одиночных ЛЭП без взаимоиндукции и емкостной проводимости вещественные коэффициенты компенсации K_X и K_R рассчитываются по параметрам защищаемой линии:

$$K_R = \frac{R_{0л} - R_{1л}}{3 \cdot R_{1л}}; \quad K_X = \frac{X_{0л} - X_{1л}}{3 \cdot X_{1л}}, \tag{Б.17}$$

где $R_{0л}$ и $X_{0л}$ — активное и реактивное сопротивления нулевой последовательности защищаемой ЛЭП;

$R_{1л}$ и $X_{1л}$ — активное и реактивное сопротивления прямой последовательности защищаемой ЛЭП.

Для ЛЭП с взаимоиндукцией, для ЛЭП с ответвлениями с Т (АТ) с глухозаземленными нейтралями, для протяженных ЛЭП, когда емкостной проводимостью пренебречь нельзя, вещественные коэффициенты компенсации K_X и K_R определяются по расчетным значениям токов и напряжений при однофазном металлическом КЗ на землю в конце защищаемой линии. В этом случае напряжение $\underline{U}_ф$ поврежденного контура «фаза — земля» в месте установки защиты определяется по формуле

$$\underline{U}_ф = \underline{I}_ф \cdot \underline{Z}_{1л} + 3\underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_E. \tag{Б.18}$$

Из формулы (Б.18) следуют расчеты для вещественных коэффициентов компенсации:

$$\underline{Z}_E = \frac{\underline{U}_ф - \underline{Z}_{1л} \cdot \underline{I}_ф}{3\underline{I}_0}; \tag{Б.19}$$

$$X_E = |\underline{Z}_E| \cdot \sin\left(\arg\left(\frac{\underline{U}_ф - \underline{Z}_{1л} \cdot \underline{I}_ф}{3\underline{I}_0}\right)\right); \tag{Б.20}$$

$$R_E = |\underline{Z}_E| \cdot \cos\left(\arg\left(\frac{\underline{U}_ф - \underline{Z}_{1л} \cdot \underline{I}_ф}{3\underline{I}_0}\right)\right); \tag{Б.21}$$

$$K_X = \frac{X_E}{X_{1л}}; \quad K_R = \frac{R_E}{R_{1л}}, \tag{Б.22}$$

где $\underline{U}_ф$, $\underline{I}_ф$ — напряжение и ток поврежденной фазы в месте установки защиты;

$3\underline{I}_0$ — утроенный ток нулевой последовательности в месте установки защиты;

$R_{1л}$ и $X_{1л}$ — активное и реактивное сопротивления прямой последовательности, рассчитанное при металлическом трехфазном КЗ в конце защищаемой ЛЭП.

Указания по расчету и выбору уставок коэффициентов компенсации для ЛЭП с взаимоиндукцией, ЛЭП с многосторонним питанием, ЛЭП при наличии ответвлений приведены в Б.4, Б.5, Б.6.

Б.4 Влияние взаимоиндукции на дистанционные замеры

При расчете параметров настройки ДЗ от КЗ на землю на ЛЭП с взаимоиндукцией необходимо учитывать, что на дистанционные замеры оказывают влияние токи нулевой последовательности, протекающие по защищаемой линии и линиям, индуктивно с ней связанным.

Рассмотрим влияние взаимоиндукции на дистанционные замеры на примере двух параллельных линий.

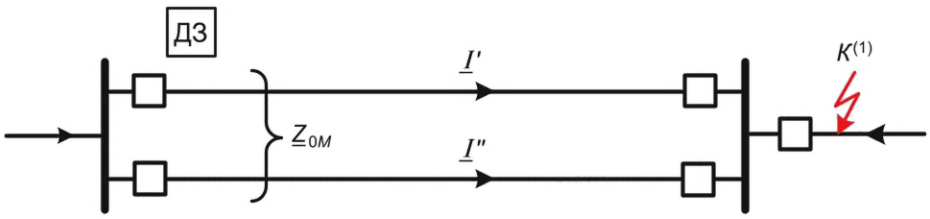


Рисунок Б.3 — Внешнее однофазное КЗ на землю, параллельные линии в работе

При внешнем металлическом $K^{(1)}$ А0 на шинах противоположной ПС (рисунок Б.3) напряжение $\underline{U}_A$ в месте установки защиты определяется по формуле

$$\underline{U}_A = \left(\underline{I}'_{A1} + \underline{I}'_{A2}\right) \cdot \underline{Z}_{1л} + \underline{I}'_0 \cdot \underline{Z}_{0л} + \underline{I}''_0 \cdot \underline{Z}_{0M}, \tag{Б.23}$$

где $\underline{I}'_{A1}$, $\underline{I}'_{A2}$, $\underline{I}'_0$ — симметричные составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательности в месте установки защиты;

$\underline{I}''_0$ — ток нулевой последовательности параллельной линии;

$\underline{Z}_{0M}$ — сопротивление взаимоиндукции между параллельными линиями;

$\underline{I}''_0 \cdot \underline{Z}_{0M}$ — наведенное напряжение нулевой последовательности, определяемое током нулевой последовательности параллельной линии.

Формулу (Б.23) для напряжения $\underline{U}_A$ можно преобразовать:

$$\underline{U}_A = \left(\underline{I}'_A + \underline{K} \cdot 3\underline{I}'_0 + \underline{K}_M \cdot 3\underline{I}''_0\right) \cdot \underline{Z}_{1л}, \quad (Б.24)$$

где $\underline{K}$ — коэффициент компенсации тока нулевой последовательности защищаемой линии, определяется по параметрам линии согласно формуле (Б.12);

$\underline{K}_M$ — коэффициент компенсации тока нулевой последовательности параллельной линии, определяется по формуле

$$\underline{K}_M = \frac{\underline{Z}_{0M}}{3\underline{Z}_{1л}}. \quad (Б.25)$$

Дистанционный замер $\underline{Z}_{A0}$ при подведении к защите тока нулевой последовательности параллельной линии $3\underline{I}''_0$ определяется:

$$\underline{Z}_{A0} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}'_A + \underline{K} \cdot 3\underline{I}'_0 + \underline{K}_M \cdot 3\underline{I}''_0} = \underline{Z}_{1л}. \quad (Б.26)$$

Таким образом, при металлических КЗ на землю на шинах противоположной ПС, когда две параллельные линии в работе, при подведении к ДО фазного напряжения и фазного тока с компенсацией тока нулевой последовательности защищаемой линии $\underline{K} \cdot 3\underline{I}'_0$ и тока нулевой последовательности параллельной линии $\underline{K}_M \cdot 3\underline{I}''_0$ дистанционный замер по поврежденному контуру «фаза — земля» составит величину $\underline{Z}_{1л}$ — сопротивления прямой последовательности защищаемой ЛЭП.

В общем случае при использовании компенсации тока нулевой последовательности параллельной линии дистанционный замер по контуру «фаза — земля» определяется по формуле

$$\underline{Z}_{ф0} = \frac{\underline{U}_ф}{\underline{I}'_ф + \underline{K} \cdot 3\underline{I}'_0 + \underline{K}_M \cdot 3\underline{I}''_0}. \quad (Б.27)$$

В устройствах РЗ, где предусмотрена возможность подведения тока нулевой последовательности параллельной линии, для компенсации влияния взаимоиндукции может использоваться либо комплексный коэффициент компенсации $\underline{K}_M$, либо пара вещественных коэффициентов компенсации:

$$K_{MX} = \frac{X_{0M}}{3X_{1л}}; \quad K_{MR} = \frac{R_{0M}}{3R_{1л}}, \quad (Б.28)$$

где R_{0M}, X_{0M} — активное и реактивное сопротивления взаимоиндукции между параллельными линиями.

Компенсация влияния взаимоиндукции может быть невозможной или некорректной в одном из следующих случаев:

- если линии проходят параллельно только часть своей длины и подвести к защите ток нулевой последовательности параллельной линии невозможно;
- если параллельная линия отключена и заземлена с двух сторон, контролировать ток нулевой последовательности параллельной линии невозможно, поскольку точка заземления обычно находится за точкой подключения трансформатора тока (исключение — линейные трансформаторы тока);
- при КЗ на параллельной линии использование компенсации тока $3\underline{I}''_0$ может привести к неселективной работе ДЗ неповрежденной линии.

Для исключения неселективной работы ДЗ при КЗ на землю на линии, параллельной защищаемой, в защите должен быть реализован алгоритм, который разрешает компенсацию взаимоиндукции, если ток нулевой последовательности $3\underline{I}'_0$ защищаемой линии превышает ток нулевой последовательности $3\underline{I}''_0$ параллельной линии на определенное значение.

Далее приведены расчетные условия для выбора коэффициентов компенсации, когда ток нулевой последовательности параллельной линии не подводится к защите.

Б.4.1 Две параллельные линии в работе, внешнее $K^{(1)}$ на шинах противоположной ПС

При внешнем металлическом $K^{(1)}$ на шинах противоположной ПС (рисунок Б.3), когда токи нулевой последовательности в защищаемой и параллельной линии равны и имеют одинаковое направление, дистанционный замер определяется по формуле

$$\underline{Z}_{A0} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}'_A + \underline{K}_1 \cdot 3\underline{I}'_0}, \quad (Б.29)$$

где коэффициент компенсации $\underline{K}_1$ определяется:

$$\underline{K}_1 = \underline{K} + \underline{K}_M. \quad (Б.30)$$

В этом случае для того, чтобы получить дистанционный замер, равный сопротивлению линии прямой последовательности $\underline{Z}_{1л}$, необходим коэффициент компенсации $\underline{K}_1$, больший, чем рассчитанный по параметрам линии согласно формуле (Б.12).

Б.4.2 Две параллельные линии в работе, каскадное отключение $K^{(1)}$ на параллельной линии

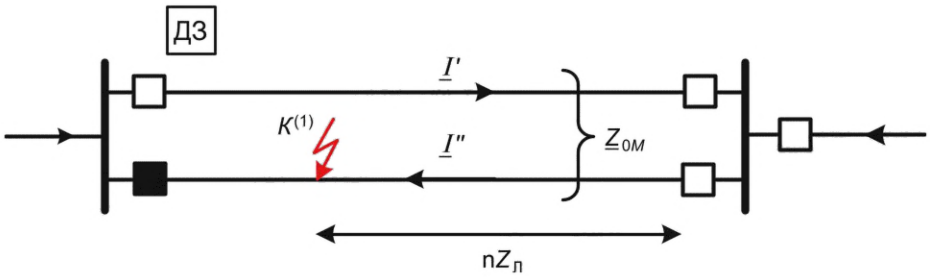


Рисунок Б.4 — Каскадное отключение однофазного КЗ на землю на параллельной линии

В случае каскадного отключения $K^{(1)}$ на параллельной линии (рисунок Б.4) напряжение U_A в месте установки защиты определяется:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \left(\underline{I}'_{A1} + \underline{I}'_{A2}\right)\cdot \underline{Z}_{1л} + \underline{I}'_0 \cdot \underline{Z}_{0л} - n\cdot \underline{I}''_0 \cdot \underline{Z}_{0M} + n\left(\underline{I}''_{A1} + \underline{I}''_{A2}\right)\cdot \underline{Z}_{1л} + n\cdot \underline{I}''_0 \cdot \underline{Z}_{0л} - n\cdot \underline{I}'_0 \cdot \underline{Z}_{0M} = \\ &= \left[\underline{I}'_A + \left(\underline{K} - n\cdot \underline{K}_M\right)\cdot 3\underline{I}'_0\right]\cdot \underline{Z}_{1л} + \left[\underline{I}''_A + \left(\underline{K} - \underline{K}_M\right)\cdot 3\underline{I}''_0\right]\cdot n\cdot \underline{Z}_{1л},\end{aligned} \quad (Б.31)$$

где n — относительная длина участка параллельного следования от шин противоположной ПС до места КЗ.

При отсутствии подпитки от смежных присоединений (справа) при равенстве токов в защищаемой и параллельной ЛЭП $\underline{I}'_A = \underline{I}''_A$ и $3\underline{I}'_0 = 3\underline{I}''_0$ дистанционный замер определяется по формуле

$$\underline{Z}_{A0} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}'_A + \underline{K}_2 \cdot 3\underline{I}'_0} = \underline{Z}_{1л}\cdot(1+n), \quad (Б.32)$$

где коэффициент компенсации $\underline{K}_2$ определяется:

$$\underline{K}_2 = \underline{K} - \frac{2n\cdot \underline{K}_M}{1+n}. \quad (Б.33)$$

Наименьшее расчетное значение $\underline{K}_2$ будет при КЗ вблизи отключенного конца параллельной линии (n = 1):

$$\underline{K}_2 = \underline{K} - \underline{K}_M. \quad (Б.34)$$

В этом случае для получения дистанционного замера, равного сопротивлению прямой последовательности участка электрической цепи от места установки защиты до места повреждения, и исключения неселективной работы ДЗ при КЗ на землю на параллельной линии необходим коэффициент компенсации $\underline{K}_2$, меньший, чем рассчитанный по параметрам линии согласно формуле (Б.12).

Б.4.3 Параллельная линия отключена и заземлена, $K^{(1)}$ на шинах противоположной ПС

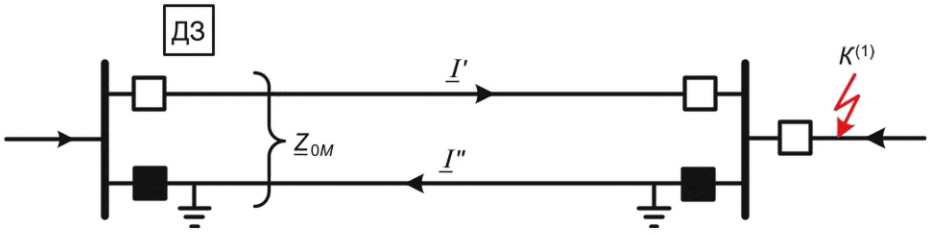


Рисунок Б.5 — Внешнее однофазное КЗ на землю A_0 для случая отключенной и заземленной параллельной линии

При внешнем $K^{(1)}$ A_0 на шинах противоположной ПС (рисунок Б.5) при отключенной и заземленной параллельной линии:

$$\underline{I}''_0 \cdot \underline{Z}_{0л} + \underline{I}'_0 \cdot \underline{Z}_{0M} = 0,$$

$$\underline{I}''_0 = -(\underline{Z}_{0M} / \underline{Z}_{0л})\cdot \underline{I}'_0. \quad (Б.35)$$

Напряжение поврежденной фазы $\underline{U}_A$ в месте установки защиты определяется по формуле

$$\underline{U}_A = (\underline{I}'_{A1} + \underline{I}'_{A2})\cdot \underline{Z}_{1л} + \underline{I}'_0 \cdot \underline{Z}_{0л} + \underline{I}''_0 \cdot \underline{Z}_{0M}. \quad (Б.36)$$

Формула (Б.36) преобразовывается с учетом (Б.35):

$$\underline{U}_A = \left[\underline{I}'_A + \left(\underline{K} - \frac{\underline{K}_M^2}{1+\underline{K}} \right) \cdot 3\underline{I}'_0 \right] \cdot \underline{Z}_{1л}. \quad (Б.37)$$

В этом случае расчетный коэффициент компенсации $\underline{K}_3$ определяется:

$$\underline{K}_3 = \underline{K} - \frac{\underline{K}_M^2}{1+\underline{K}}. \quad (Б.38)$$

Для исключения рисков неселективной работы защиты при внешних КЗ на землю необходимо использовать коэффициент компенсации $\underline{K}_3$, меньший, чем рассчитанный по параметрам линии согласно формуле (Б.12).

Б.4.4 Параллельная линия отключена, $K^{(1)}$ на шинах противоположной ПС

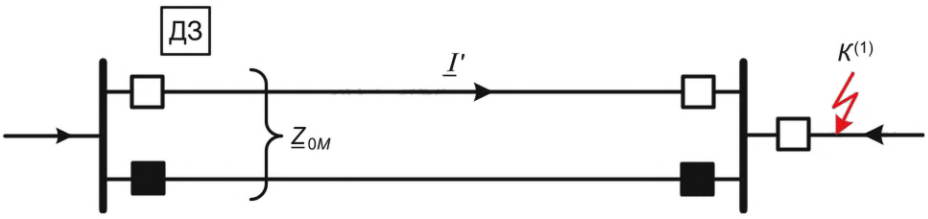


Рисунок Б.6 — Внешнее однофазное КЗ на землю A_0 для случая отключенной параллельной линии

В данном случае (рисунок Б.6) отсутствует влияние взаимоиндукции на дистанционный замер и коэффициент компенсации $\underline{K}$ определяется по параметрам линии по формуле (Б.12).

Для рассматриваемых случаев работы двух параллельных ЛЭП получено несколько расчетных выражений для коэффициентов компенсации, которые позволяют обеспечить полную компенсацию тока $3\underline{I}_0$ защищаемой ЛЭП с учетом режима работы параллельной линии. Наименьший коэффициент компенсации соответствует режиму ремонта (отключена и заземлена) параллельной линии.

Б.5 Указания по расчету уставок коэффициентов компенсации для ЛЭП в группе взаимоиндукции

Б.5.1 Ток нулевой последовательности параллельной влияющей ЛЭП не подводится к защите.

Расчет значений коэффициентов компенсации проводится при металлическом $K^{(1)}$ в конце защищаемой ЛЭП по формуле (Б.13) или (Б.22) с учетом ремонта (отключена и заземлена) каждой линии, входящей в группу взаимоиндукции с защищаемой ЛЭП, а также с учетом возможных совместных ремонтов влияющих линий.

Выбор уставок коэффициентов компенсации определяется функциональным назначением ступеней ДЗ от КЗ на землю.

Для первой ступени ДЗ от КЗ на землю, действующей без выдержки времени, в качестве уставки коэффициента компенсации следует принять минимальное из расчетных значений для обеспечения селективности при внешних КЗ на землю.

При выбранной уставке коэффициента компенсации необходимо выполнить проверку отстройки сопротивления срабатывания первой ступени ДЗ от замеров при металлическом $K^{(1)}$ на шинах противоположной ПС во всех рассматриваемых режимах работы параллельных и влияющих ЛЭП.

Для прямонаправленной телеускоряемой ступени ДЗ от КЗ на землю с охватом всей защищаемой ЛЭП селективность обеспечивается схемой ТУ с передачей разрешающих или блокирующих сигналов. При наличии технической возможности в качестве уставки коэффициента компенсации рекомендуется принять значение, обеспечивающее требуемую чувствительность рассматриваемой ступени ДЗ при КЗ на землю в конце ЛЭП в нормальной и ремонтных схемах сети.

Для обратнонаправленной ступени ДЗ от КЗ на землю, которая используется в схемах ТУ, при наличии технической возможности следует принять уставку коэффициента компенсации, принятую для прямонаправленной телеускоряемой ступени ДЗ от КЗ на землю на противоположной стороне ЛЭП для обеспечения согласованного пуска ДО при внешних КЗ.

В случае применения различных уставок коэффициентов компенсации для разных режимов работы влияющих линий с использованием групп уставок в микропроцессорных устройствах РЗ, необходимо выполнить проверку селективности первой ступени ДЗ при внешних КЗ на землю не только на шинах противоположной ПС, но и при КЗ вдоль ЛЭП, индуктивно связанных с защищаемой линией.

Б.5.2 Ток нулевой последовательности параллельной/влияющей ЛЭП подводится к защите

Коэффициенты компенсации тока нулевой последовательности защищаемой ЛЭП рассчитываются по параметрам линии по формуле (Б.12) или (Б.17) соответственно для комплексного или вещественных коэффициентов компенсации.

Коэффициенты компенсации тока нулевой последовательности параллельной/влияющей линии рассчитываются по формуле (Б.25) или (Б.28).

При наличии других линий, входящих в группу взаимоиндукции с защищаемой ЛЭП, коэффициенты компенсации тока нулевой последовательности для защищаемой ЛЭП рассчитываются при металлическом $K^{(1)}$ в конце защищаемой ЛЭП по формуле (Б.13) или (Б.22) с учетом режимов ремонтов влияющих ЛЭП (отключены и заземлены), за исключением учета влияния взаимоиндукции ЛЭП, ток нулевой последовательности которой заводится в защиту и для которой используется компенсация взаимоиндукции.

Для первой ступени ДЗ от КЗ на землю, действующей без выдержки времени, в качестве уставки следует принять минимальное из расчетных значений для обеспечения селективности при внешних КЗ на землю.

При выбранной уставке коэффициента компенсации необходимо выполнить проверку селективности первой ступени ДЗ при внешних КЗ на землю во всех расчетных режимах, включая те режимы, в которых компенсация влияния взаимоиндукции параллельной/влияющей ЛЭП отсутствует или блокируется.

Б.6 Указания по расчету коэффициентов компенсации для ЛЭП с многосторонним питанием и ЛЭП при наличии ответвлений

Для ЛЭП с многосторонним питанием коэффициенты компенсации рассчитываются по формуле (Б.13) или (Б.22) при металлическом $K^{(1)}$ на шинах противоположных ПС. Расчетные режимы должны включать в том числе режимы отсутствия питания с одной из сторон ЛЭП.

При наличии Т (АТ) с глухозаземленной нейтралью на ЛЭП с ответвлениями расчет коэффициентов компенсации проводится по формуле (Б.13) или (Б.22) при металлическом $K^{(1)}$ в конце защищаемой ЛЭП и на шинах ВН отпаечных ПС. Расчетные режимы должны включать режимы отключения Т (АТ) с глухозаземленной нейтралью.

Для первой ступени ДЗ от КЗ на землю, действующей без выдержки времени, в качестве уставки $\underline{K}$ следует принять минимальное значение из рассчитанных значений коэффициентов компенсации для обеспечения селективности при внешних КЗ на землю.

Б.7 Влияние доаварийного нагрузочного режима и переходного сопротивления на дистанционные замеры при междуфазных КЗ

Двухфазное КЗ *AB* через переходное сопротивление (рисунок Б.7) эквивалентно металлическому КЗ на ответвлении, сопротивление которого равно $R_П$.

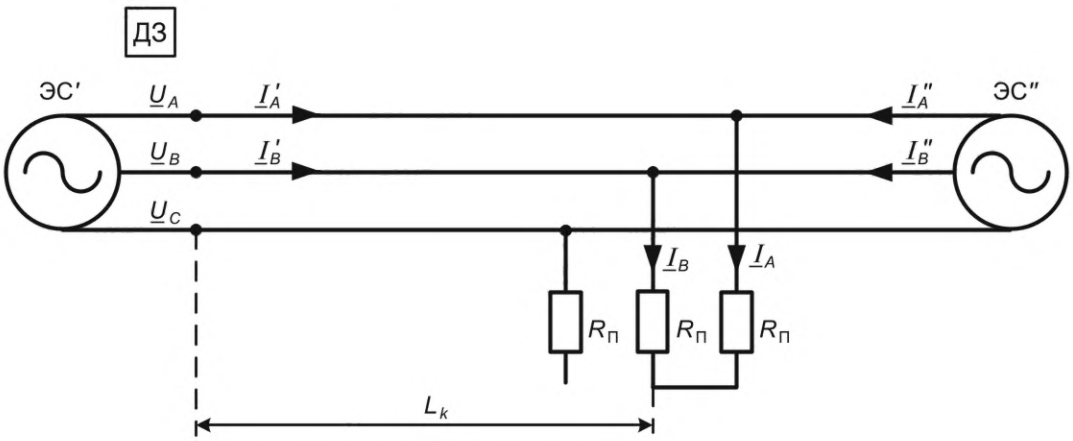


Рисунок Б.7 — Двухфазное КЗ через переходное сопротивление на ЛЭП с двухсторонним питанием

Напряжение $\underline{U}_{AB}$ в месте установки защиты определяется:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{I}'_A \cdot \underline{Z}_{1k} + \underline{I}_A \cdot \underline{R}_П - \underline{I}'_B \cdot \underline{Z}_{1k} - \underline{I}_B \cdot \underline{R}_П = (\underline{I}'_A - \underline{I}'_B) \cdot \underline{Z}_{1k} + (\underline{I}_A - \underline{I}_B) \cdot \underline{R}_П. \quad (Б.39)$$

Дистанционный замер $\underline{Z}_{AB}$ определяется:

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{1k} + \underline{k}_р \cdot \underline{R}_П, \quad (Б.40)$$

где $\underline{k}_р$ — комплексный коэффициент распределения токов, учитывающий различие модулей и углов токов в месте КЗ и в месте установки защиты:

$$\underline{k}_р = \frac{\underline{I}_A - \underline{I}_B}{\underline{I}'_A - \underline{I}'_B}. \quad (Б.41)$$

Формула (Б.40) преобразовывается с учетом

$$\underline{I}_A = (\underline{I}'_A + \underline{I}''_A); \quad \underline{I}_B = (\underline{I}'_B + \underline{I}''_B). \quad (Б.42)$$

Дистанционный замер $\underline{Z}_{AB}$ определяется:

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{1k} + R_{П} + \frac{\underline{I}''_A - \underline{I}''_B}{\underline{I}'_A - \underline{I}'_B} \cdot R_{П}. \quad (Б.43)$$

Полученная формула (Б.43) справедлива для контура AB при $K^{(2)}$ AB, при $K^{(1,1)}$ $AB0$ и при $K^{(3)}$. Аналогичные формулы справедливы для дистанционных замеров $\underline{Z}_{BC}$, $\underline{Z}_{CA}$ при соответствующих видах КЗ.

При междуфазном КЗ на линии с односторонним питанием $\underline{k}_{р} = 1$, дистанционный замер определяется:

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{1k} + \underline{R}_{П}. \quad (Б.44)$$

В этом случае реактивная составляющая замера соответствует реактивному сопротивлению участка линии $X_{AB} = X_{1K}$, дистанционные замеры при движении точки КЗ вдоль линии сдвигаются на значение $R_{П}$. Заштрихованная область (рисунок Б.8) соответствует дистанционным замерам при значениях переходных сопротивлений, меньших расчетного значения $R_{П}$.

На ЛЭП с двусторонним питанием $\underline{k}_{р} \neq 1$, на амплитуды и фазы токов $\underline{I}'$ и $\underline{I}''$ влияют следующие факторы:

- вид и место КЗ на линии;
- значение $R_{П}$;
- соотношение эквивалентных сопротивлений примыкающих энергосистем;
- разность фаз эквивалентных ЭДС.

Взаимный угол между эквивалентными ЭДС определяется доаварийным перетоком мощности по рассматриваемой ЛЭП.

В зависимости от коэффициента $\underline{k}_{р}$ дистанционные замеры при КЗ в одной и той же точке через одинаковое переходное сопротивление $R_{П}$ могут располагаться в различных квадрантах комплексной плоскости.

При нулевом доаварийном перетоке мощности по ЛЭП эквивалентные ЭДС источников совпадают по фазе и углы токов в месте установки защиты $\underline{I}'$ и с противоположной стороны $\underline{I}''$ будут одинаковы. Дистанционный замер в этом случае определяется:

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{1k} + \left(1 + \frac{\left|\underline{I}''_A - \underline{I}''_B\right|}{\left|\underline{I}'_A - \underline{I}'_B\right|}\right) \cdot R_{П}. \quad (Б.45)$$

Из формулы (Б.45) следует, что по мере приближения точки КЗ к противоположному концу ЛЭП подпитка с противоположной стороны будет увеличивать активную составляющую дистанционного замера.

При прямом доаварийном перетоке мощности по ЛЭП угол напряжения в месте установки защиты опережает угол напряжения на шинах ПС на противоположной стороне линии. В таком же соотношении находятся и углы эквивалентных ЭДС источников. Из этого следует, что векторы токов $\underline{I}'$ и $\underline{I}''$ также не будут совпадать по фазе. Вектор тока $\underline{I}'$ в месте установки защиты при КЗ будет опережать вектор $\underline{I}''$ вследствие эффекта наложения доаварийного нагрузочного режима.

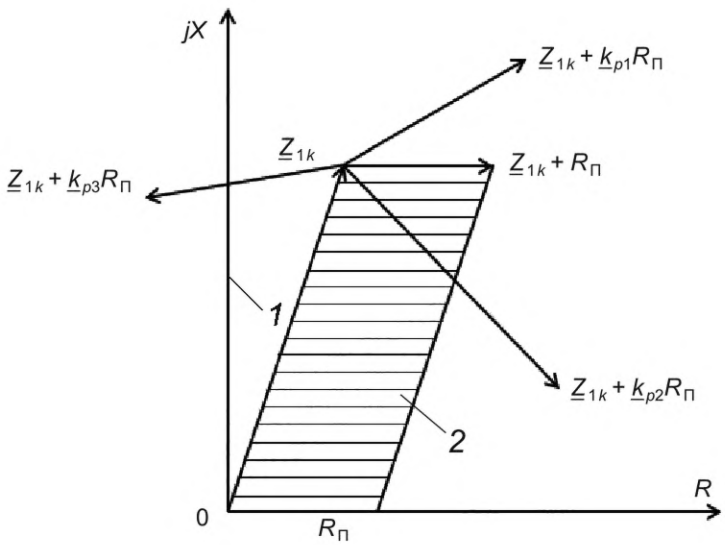


Рисунок Б.8 — Влияние доаварийного нагрузочного режима на дистанционные замеры при междуфазных КЗ через переходные сопротивления

В этом случае угол вектора $\Delta\underline{Z} = (\underline{k}_{р2} \cdot R_{П})$ будет отрицательным и реактивная составляющая замера $\underline{Z}_{1k} + \underline{k}_{р2} \cdot R_{П}$ будет иметь отрицательную погрешность по сравнению с замером при металлическом КЗ (рисунок Б.8).

Нагрузочные режимы с прямым перетоком мощности по ЛЭП необходимо учитывать при расчете параметров настройки первой ступени ДЗ без выдержки времени. Для отстройки от замеров при внешних КЗ можно использовать изменение вида круговой характеристики (эллипс вместо окружности) или угол наклона (скоса) верхней грани полигональной характеристики срабатывания.

При обратном доаварийном перетоке мощности по ЛЭП угол напряжения в месте установки защиты более отрицательный по сравнению с углом напряжения на шинах ПС на противоположной стороне линии. В таком же соотношении находятся и углы между эквивалентными ЭДС источников. Соответственно, при КЗ вектор тока $\underline{I}'$ будет отстающим в сравнении с вектором $\underline{I}''$. В этом случае угол вектора $\Delta\underline{Z} = (\underline{k}_{р1} \cdot R_П)$ будет положительным и реактивная составляющая замера $\underline{Z}_{1k} + \underline{k}_{р1} \cdot R_П$ будет иметь положительную погрешность по сравнению с замером при металлическом КЗ.

Нагрузочные режимы со встречным перетоком мощности необходимо учитывать при выборе ступени ДЗ с охватом всей линии (например, телеускоряемая ступень без выдержки времени).

При выборе типа характеристики срабатывания необходимо учитывать сооотношение эквивалентного сопротивления прямой последовательности прилегающей сети и защищаемой ЛЭП. В случае протяженных ЛЭП активная составляющая дистанционного замера существенно меньше реактивной составляющей и влияние переходного сопротивления в меньшей степени сказывается на результирующем дистанционном замере. На коротких ЛЭП активная составляющая дистанционного замера может быть весьма значительной. Для ДЗ коротких ЛЭП лучше подходят полигональные характеристики срабатывания по сравнению с круговыми.

Б.8 Влияние доаварийного нагрузочного режима и переходного сопротивления на дистанционные замеры при однофазном КЗ на землю

Однофазное КЗ A_0 на ЛЭП с двухсторонним питанием через переходное сопротивление $R_П$ представлено на рисунке Б.9.

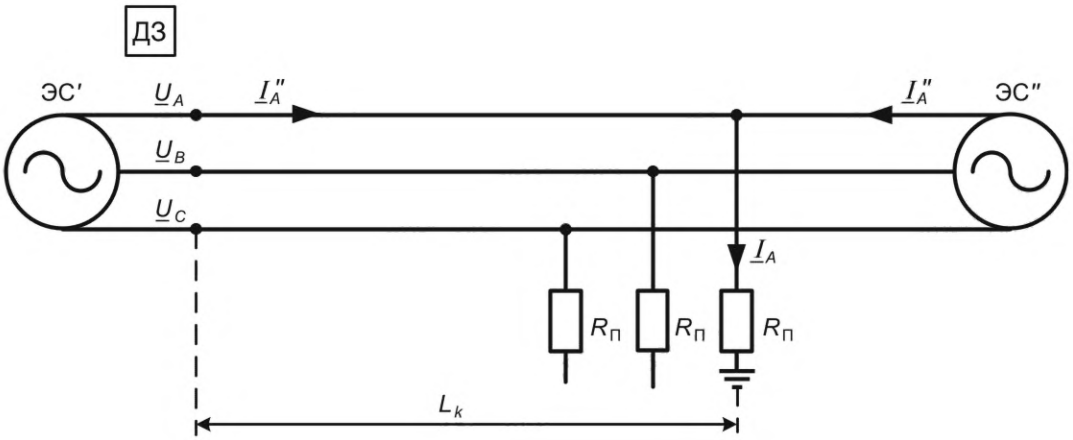


Рисунок Б.9 — Однофазное КЗ на землю через переходное сопротивление на ЛЭП с двухсторонним питанием

Напряжение поврежденной фазы $\underline{U}_A$ в месте установки защиты по формуле (Б.6) определяется:

$$\underline{U}_A = (\underline{I}'_A + \underline{K} \cdot 3\underline{I}'_0) \cdot \underline{Z}_{1k} + \underline{I}_A \cdot R_П, \quad (Б.46)$$

где $\underline{I}'_A$, $3\underline{I}'_0$ — ток поврежденной фазы и утроенный ток нулевой последовательности в месте установки защиты;

$\underline{I}_A$ — суммарный фазный ток в месте КЗ;

$\underline{K}$ — комплексный коэффициент компенсации тока нулевой последовательности;

$R_П$ — переходное сопротивление в месте КЗ.

Дистанционный замер $\underline{Z}_{A0}$ определяется по формуле

$$\underline{Z}_{A0} = \underline{Z}_{1k} + \underline{k}_р \cdot R_П, \quad (Б.47)$$

где

$$\underline{k}_р = \frac{\underline{I}_A}{(\underline{I}'_A + \underline{K} \cdot 3\underline{I}'_0)}, \quad \underline{I}_A = \underline{I}'_A + \underline{I}''_A.$$

В месте КЗ суммарный фазный ток $\underline{I}_A = 3\underline{I}_{0k}$, следовательно

$$\underline{Z}_{A0} = \underline{Z}_{1k} + \frac{3\underline{I}_{0k}}{(\underline{I}'_A + \underline{K} \cdot 3\underline{I}'_0)} \cdot R_П, \quad (Б.48)$$

где $3\underline{I}_{0k}$ — суммарный ток нулевой последовательности в месте КЗ.

В зависимости от соотношений токов в выражении (Б.48), а также при наличии фазового сдвига между этими токами, вектор $\Delta\underline{Z} = \underline{k}_p \cdot R_П$ может иметь положительный или отрицательный угол. Фазовый сдвиг между токами может определяться доаварийным перетоком мощности, а также соотношением эквивалентных сопротивлений схемы нулевой последовательности относительно точки КЗ.

При одностороннем питании, когда $\underline{I}'_A = 3\underline{I}'_0 = 3\underline{I}_{0k}$,

$$\underline{Z}_{A0} = \underline{Z}_{1k} + \frac{R_П}{1+\underline{K}}. \quad (Б.49)$$

Активная и реактивная составляющие замера $\underline{Z}_{A0}$ определяются:

$$R_{A0} = R_{1k} + Re\left(\frac{R_П}{1+|\underline{K}|}\right), \quad (Б.50)$$

$$X_{A0} = X_{1k} + Im\left(\frac{R_П}{1+|\underline{K}|}\right). \quad (Б.51)$$

При использовании в защите комплексного коэффициента компенсации наличие переходного сопротивления в месте КЗ на землю вносит погрешность ΔX в измерение реактивной составляющей дистанционного замера даже в случае ЛЭП с односторонним питанием.

При использовании вещественных коэффициентов компенсации реактивная составляющая дистанционного замера определяется без дополнительной погрешности:

$$R_{A0} = R_{1k} + \frac{R_П}{1+K_R}, \quad X_{A0} = X_{1k}. \quad (Б.52)$$

Нагрузочные режимы с прямым перетоком мощности необходимо учитывать при выборе первой ступени ДЗ от замыканий на землю без выдержки времени. Для отстройки от замеров при внешних КЗ на землю через переходное сопротивление можно использовать изменение вида круговой характеристики (эллипс вместо окружности) или угол наклона (скос) верхней грани полигональной характеристики срабатывания. Нагрузочные режимы со встречным перетоком мощности необходимо учитывать при выборе ступени с охватом всей линии.

Б.9 Особенности дистанционных замеров при двухфазном КЗ на землю через переходные сопротивления

При двухфазных КЗ на землю в общем случае может быть три переходных сопротивления, которые включают сопротивления электрических дуг, заземляющих устройств и самих опор ЛЭП (рисунок Б.10).

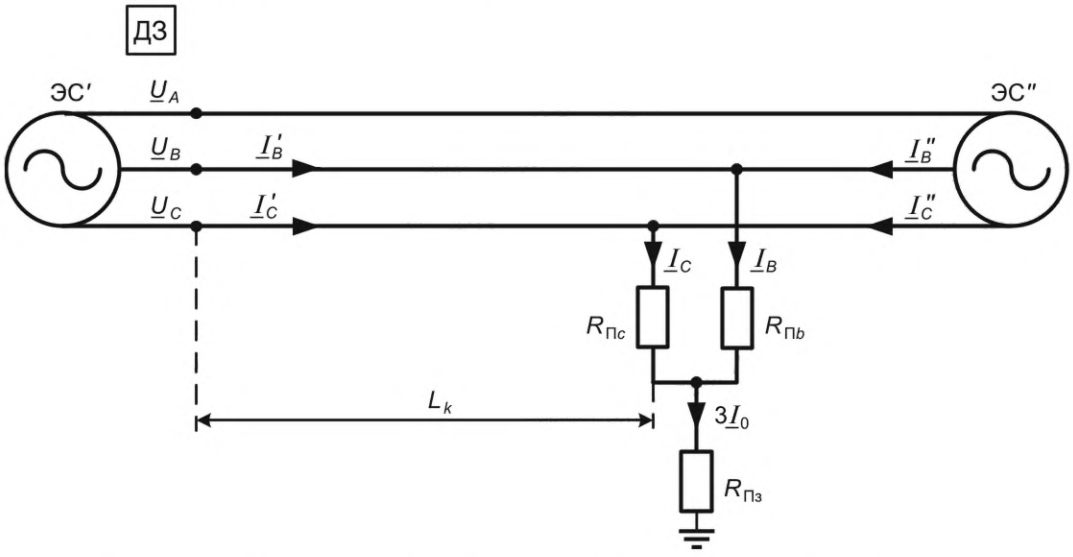


Рисунок Б.10 — Двухфазное КЗ на землю через переходное сопротивление на ЛЭП с двухсторонним питанием

Для напряжения поврежденной фазы $\underline{U}_B$ в месте установки защиты можно записать:

$$\underline{U}_B = (\underline{I}'_B + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0) \cdot \underline{Z}_{1k} + \underline{I}'_B \cdot R_{Пb} + 3\underline{I}_0 \cdot R_{Пз}. \quad (Б.53)$$

Добавив и вычтя слагаемое $(K \cdot 3\underline{I}_0 \cdot R_{Пb})$ преобразуем выражение:

$$\underline{U}_B = (\underline{I}'_B + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0) \cdot \underline{Z}_{1k} + (\underline{I}'_B + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0) \cdot R_{Пb} + 3\underline{I}_0 \cdot (R_{Пз} - \underline{K} \cdot R_{Пb}). \quad (Б.54)$$

Дистанционный замер Z_{B0} определяется:

$$\underline{Z}_{B0} = \underline{Z}_{1k} + R_{\Pi b} + \frac{3\underline{I}_0 \cdot \left(R_{\Pi з} - \underline{K} \cdot R_{\Pi b}\right)}{\left(\underline{I}'_B + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0\right)}. \quad (Б.55)$$

Дистанционный замер $\underline{Z}_{C0}$ определяется:

$$\underline{Z}_{C0} = \underline{Z}_{1k} + R_{\Pi c} + \frac{3\underline{I}_0 \cdot \left(R_{\Pi з} - \underline{K} \cdot R_{\Pi c}\right)}{\left(\underline{I}'_C + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0\right)}. \quad (Б.56)$$

Реактивные составляющие замеров X_{B0} и X_{C0} будут определяться углами между векторами токов $3\underline{I}_0$ и $(\underline{I}'_B + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0)$, $3\underline{I}_0$ и $(\underline{I}'_C + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0)$ и значениями переходных сопротивлений $R_{\Pi b}$ и $R_{\Pi c}$.

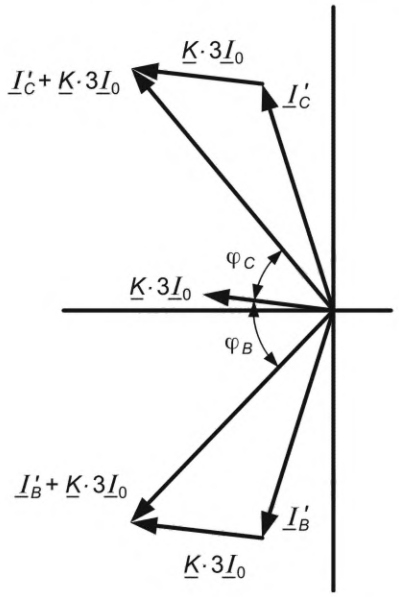


Рисунок Б.11 — Векторная диаграмма токов при двухфазном КЗ на землю

Согласно формуле (Б.55) замеры $\underline{Z}_{B0}$ по контуру $B0$ «опережающей фазы» будут иметь отрицательную погрешность ΔX даже в случае ЛЭП с односторонним питанием, поскольку вектор тока $(\underline{I}'_B + \underline{K} \cdot 3\underline{I}_0)$ опережает вектор тока нулевой последовательности $3\underline{I}_0$ (рисунок Б.11), поэтому реактивная составляющая замера будет $X_{B0} < X_{1k}$. Соответственно, замеры $\underline{Z}_{C0}$ по контуру $C0$ «отстающей» фазы будут иметь положительную погрешность ΔX, поэтому реактивная составляющая замера будет увеличенной $X_{C0} > X_{1k}$.

На рисунке Б.12 представлены годографы замеров $\underline{Z}_{B0}$, $\underline{Z}_{C0}$ при $K^{(1,1)}$ $BC0$ на шинах противоположной ПС для случая, когда переходные сопротивления $R_{\Pi b} = 0$, $R_{\Pi c} = 0$, а переходное сопротивление $R_{\Pi з}$ имеет значения $R_{\Pi з} = 7$ Ом и $R_{\Pi з} = 20$ Ом. Рассматривались режимы без доаварийного перетока мощности (синий годограф), режим прямого перетока мощности (красный годограф) и режим встречной нагрузки (зеленый годограф).

В ряде случаев замеры «опережающей фазы» могут попадать так глубоко в характеристику срабатывания, что метод отстройки с применением наклона (скоса) верхней грани характеристики окажется неэффективным. В этом случае от замеров при внешних КЗ необходимо отстраиваться уставкой по активному сопротивлению срабатывания.

Б.10 Дополнительные измерительные органы, обеспечивающие селективность ДЗ при КЗ на землю

В ДЗ защитах различных производителей имеются дополнительные измерительные органы и алгоритмы для выявления вида повреждения, которые обеспечивают корректную работу ДЗ при КЗ на землю.

В частности, дополнительный измерительный орган — реле реактивного сопротивления (РРС), который формирует угол наклона $\varphi_{ррс}$ граничной линии РРС, что обеспечивает отстройку первой ступени ДЗ при КЗ на землю через переходные сопротивления вне защищаемой зоны (рисунок Б.13).

Проверку селективности первой ступени ДЗ от КЗ на землю при однофазных и двухфазных КЗ на землю на шинах ПС, примыкающей к противоположному концу линии, необходимо производить с учетом алгоритма РРС и органа, выявляющего вид повреждения (ОВП).

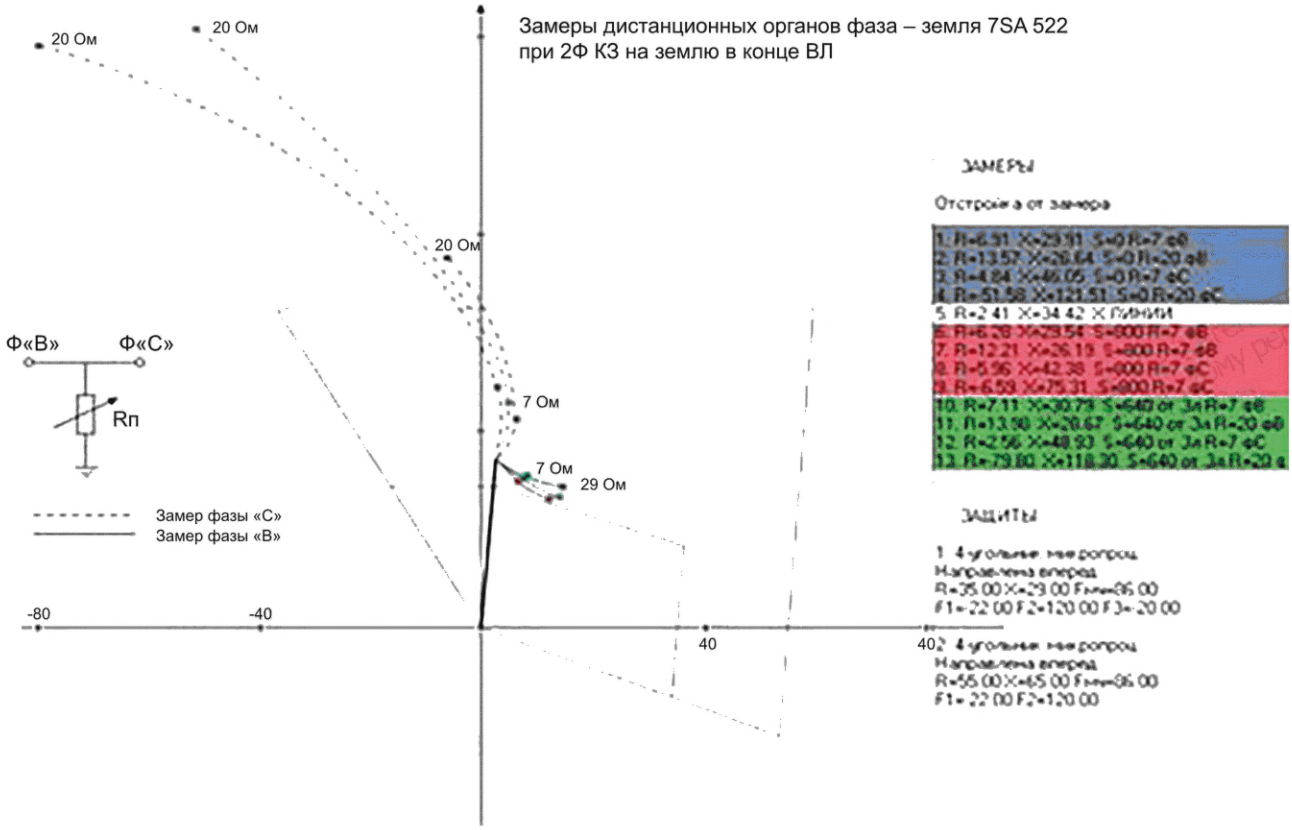
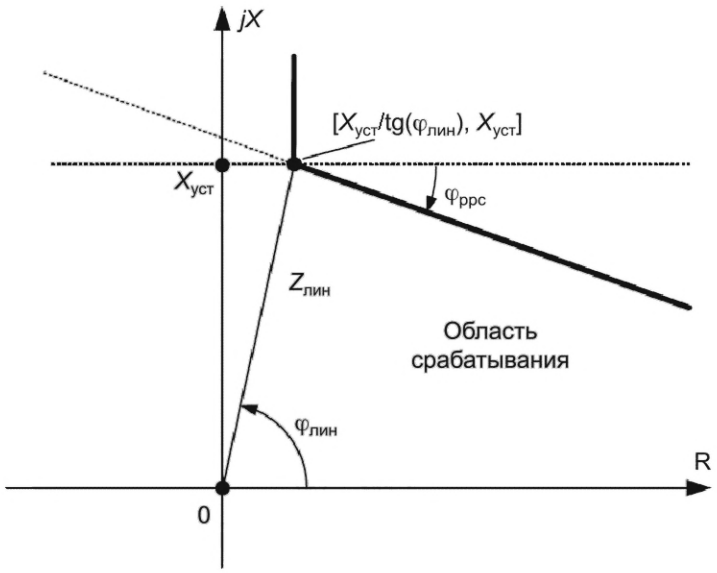


Рисунок Б.12 — Замеры $\underline{Z}_{B0}$, $\underline{Z}_{C0}$ при двухфазном КЗ на землю *BC*0



Рабочая величина $U_{\text{Р}} = U_{\Phi} - (I_{\Phi} + kI_0)Z_{\text{уст}}$

Поляризующая величина $I_0 e^{j78}$

Рисунок Б.13 — Характеристика срабатывания реле реактивного сопротивления

Приложение В
(справочное)

Определение угла наклона (скоса) и активного сопротивления срабатывания полигональной характеристики

В.1 Определение угла наклона (скоса) верхней грани полигональной характеристики

Угол наклона (скоса) $\varphi_{ск}$ верхней грани полигональной характеристики используется для первой ступени ДЗ по условию отстройки от внешних КЗ.

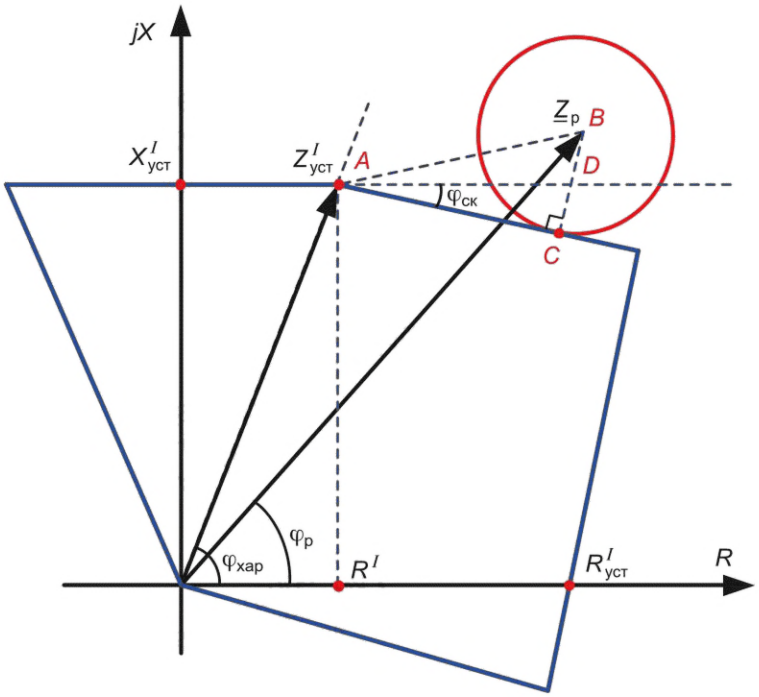


Рисунок В.1 — Графические построения для определения угла скоса

На рисунке В.1 выполнены построения для определения угла скоса $\varphi_{ск}$ для отстройки от вектора $\underline{Z}_р$ с необходимым запасом с учетом зоны неопределенности вокруг конца вектора в виде окружности, радиус которой определяется по формуле

$$r_{окр} = |\underline{Z}_р| \cdot (1 - k_{отс}), \tag{В.1}$$

где $k_{отс}$ — требуемый коэффициент отстройки.

Угол скоса определяется из разности углов:

$$\varphi_{ск} = \angle BAC - \angle BAD. \tag{В.2}$$

Угол $\angle BAD$ определяется как аргумент разности векторов $\underline{Z}_р$ и $\underline{Z}^I_{уст}$:

$$\angle BAD = \arg\left(\underline{Z}_р - \underline{Z}^I_{уст}\right) = \operatorname{arctg}\frac{X_р - X^I_{уст}}{R_р - R^I}, \tag{В.3}$$

где $R_р$, $X_р$ — активное и реактивное сопротивления вектора $\underline{Z}_р$;

$X^I_{уст}$ — реактивное сопротивление срабатывания первой ступени ДЗ;

R^I — активное сопротивление прямой последовательности участка защищаемой ЛЭП, соответствующее концу зоны срабатывания $X^I_{уст}$ первой ступени ДЗ.

Угол $\angle BAC$ определяется из прямоугольного треугольника АВС:

$$\angle BAC = \arcsin\frac{(1-k_{отс})\cdot\sqrt{R_р^2 + X_р^2}}{\sqrt{\left(R_р - R^I\right)^2 + \left(X_р - X^I_{уст}\right)^2}}. \tag{В.4}$$

Угол скоса определяется по формуле

$$\varphi_{ск} = \arcsin\frac{(1-k_{отс})\cdot\sqrt{R_р^2 + X_р^2}}{\sqrt{\left(R_р - R^{I}\right)^2 + \left(X_р - X_{уст}^{I}\right)^2}} - \operatorname{arctg}\frac{X_р - X_{уст}^{I}}{R_р - R^{I}}. \quad (В.5)$$

Если уставка $\varphi_{ск}$ задается в устройстве РЗ с учетом положительного направления отсчета угла (против часовой стрелки), полученное по формуле (В.5) значение угла следует задавать со знаком минус.

В.2 Определение активного сопротивления срабатывания $R_{уст}$

На рисунке В.2 выполнены построения для определения $R_{уст}$ при заданном угле наклона $\varphi_{прав}$ полигональной характеристики по условию отстройки от замера $\underline{Z}_р$ при внешних КЗ через переходные сопротивления с учетом зоны неопределенности вокруг конца вектора в виде окружности, радиус которой определяется по формуле (В.1).

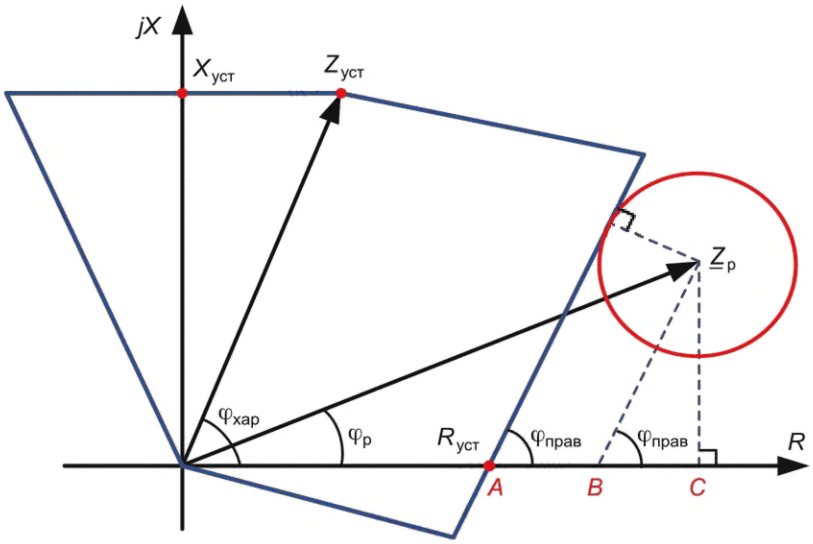


Рисунок В.2 — Графические построения для определения положения правой боковой стороны характеристики срабатывания

Для отстройки характеристики срабатывания с необходимым запасом от замера $\underline{Z}_р$ требуется выполнение неравенства:

$$R_{уст} + AB + BC \le |\underline{Z}_р| \cdot \cos\varphi_р. \quad (В.6)$$

Отрезок *AB* определяется по формуле

$$AB = \frac{|\underline{Z}_р| \cdot (1-k_{отс})}{\sin\varphi_{прав}}. \quad (В.7)$$

Отрезок *BC* определяется по формуле

$$BC = |\underline{Z}_р| \cdot \sin\varphi_р \cdot \operatorname{ctg}\varphi_{прав}. \quad (В.8)$$

После подстановки в неравенство (В.6) формул (В.7) и (В.8) параметр $R_{уст}$ определяется:

$$R_{уст} \le |\underline{Z}_р| \cdot \cos\varphi_р - \frac{|\underline{Z}_р| \cdot (1-k_{отс})}{\sin\varphi_{прав}} - |\underline{Z}_р| \cdot \sin\varphi_р \cdot \operatorname{ctg}\varphi_{прав}, \quad (В.9)$$

$$R_{уст} \le \frac{|\underline{Z}_р|}{\sin\varphi_{прав}} \cdot \left(\sin\left(\varphi_{прав} - \varphi_р\right) - \left(1-k_{отс}\right)\right). \quad (В.10)$$

Приложение Г
(рекомендуемое)

Учет положений устройства регулирования напряжений под нагрузкой силовых трансформаторов (автотрансформаторов) при расчетах дистанционной защиты линий электропередачи

Г.1 При расчетах и выборе параметров настройки ДЗ ЛЭП необходимо учитывать наличие РПН Т (АТ) ПС, примыкающей к противоположному концу ЛЭП, и ПС на ответвлениях ЛЭП.

Изменение реактивного сопротивления Т (АТ) напряжением 110 кВ и выше при регулировании напряжения необходимо учитывать в расчетах.

Г.2 Расчет реактивных сопротивлений Т (АТ) при наличии РПН

В соответствии с ГОСТ Р 52719 в заводских паспортных данных Т (АТ) с РПН должны быть указаны номинальные напряжения основных обмоток на всех ответвлениях регулируемой обмотки, общий диапазон регулирования ΔU,%, и число ступеней регулирования напряжения. Значения напряжения КЗ Uк между обмотками, выраженные в процентах, указываются для среднего и двух крайних положений РПН. Эти значения отнесены к номинальной мощности Т (АТ) и номинальным напряжениям среднего и двух крайних ответвлений регулируемой обмотки соответственно.

При отсутствии заводских данных значений Uк для крайних положений РПН целесообразно использовать справочные расчетные данные, приведенные в ГОСТ 12965 для Т (АТ) напряжением 110 и 150 кВ и ГОСТ 17544 для Т (АТ) напряжением 220, 330, 500 и 750 кВ.

Значение напряжения КЗ $U\text{к}_{Ni}$ для промежуточных положений РПН определяется исходя из линейной интерполяции между значениями напряжения КЗ для среднего положения РПН $U\text{к}_{\text{ном}}$ и двух крайних положений $U\text{к}_{\text{кр}+}$ или $U\text{к}_{\text{кр}-}$.

Для определения $U\text{к}_{Ni}$ используются выражения:

$$U\text{к}_{Ni+} = U\text{к}_{\text{ном}} + \frac{N_{i+}}{N_{\text{КР}}}\left(U\text{к}_{\text{кр}+} - U\text{к}_{\text{ном}}\right), \quad (\text{Г.1})$$

$$U\text{к}_{Ni-} = U\text{к}_{\text{ном}} + \frac{N_{i-}}{N_{\text{КР}}}\left(U\text{к}_{\text{кр}-} - U\text{к}_{\text{ном}}\right), \quad (\text{Г.2})$$

где $N_{\text{КР}}$ — число ступеней регулирования напряжения от среднего до крайнего положения РПН;

N_{i+} — ступень регулирования в сторону повышения напряжения, для которой определяется значение $U\text{к}_{Ni+}$;

N_{i-} — ступень регулирования в сторону понижения напряжения, для которой определяется значение $U\text{к}_{Ni-}$.

Для определения $U\text{к}_{Ni}$ также допустимо использовать следующие выражения:

$$U\text{к}_{Ni+} = U\text{к}_{\text{ном}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_i\%}{100}\right)^{n_+} = U\text{к}_{\text{ном}} \cdot \left(k_{i+}\right)^{n_+}, \quad (\text{Г.3})$$

$$U\text{к}_{Ni-} = U\text{к}_{\text{ном}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_i\%}{100}\right)^{n_-} = U\text{к}_{\text{ном}} \cdot \left(k_{i-}\right)^{n_-}, \quad (\text{Г.4})$$

где k_{i+} и k_{i-} — относительное изменение напряжения на i-м ответвлении.

Значения n_+ и n_- определяются по выражениям, в которых значения k_{i+} и k_{i-} соответствуют относительному изменению напряжения на крайних ответвлениях регулируемой обмотки:

$$n_+ = \frac{\lg \dfrac{U\text{к}_{\text{кр}_+}}{U\text{к}_{\text{ном}}}}{lgk_{i+}}, \quad (\text{Г.5})$$

$$n_- = \frac{\lg \dfrac{U\text{к}_{\text{кр}_-}}{U\text{к}_{\text{ном}}}}{lgk_{i-}}. \quad (\text{Г.6})$$

Трехобмоточные Т и АТ при наличии РПН на стороне ВН имеют зависимости напряжений КЗ $U\text{к}_{BH\,Ni}$ и $U\text{к}_{BC\,Ni}$ от положения РПН.

АТ при наличии РПН на стороне СН имеют зависимости напряжений КЗ $U\text{к}_{BC\,Ni}$ и $U\text{к}_{CH\,Ni}$ от положения РПН.

Расчет реактивных сопротивлений Т (АТ) в именованных единицах (Ом) для соответствующих положений РПН проводится по выражениям:

- при приведении к стороне без регулирования напряжения

$$X_{\mathrm{T}i(\mathrm{нр})} = \frac{U\mathrm{к}_{Ni}\%}{100} \cdot \frac{U^2_{\mathrm{ном(нр)}}}{S_{\mathrm{ном}}}; \qquad (\Г.7)$$

- при приведении к стороне, где проводится регулирование напряжения

$$X_{\mathrm{T}i(\mathrm{р})} = \frac{U\mathrm{к}_{Ni}\%}{100} \cdot \frac{U^2_{\mathrm{ном(р)}Ni}}{S_{\mathrm{ном}}}, \qquad (\Г.8)$$

где $U\mathrm{к}_{Ni}$, % — напряжение КЗ для соответствующего положения РПН;

$U_{\mathrm{ном(нр)}}$ — номинальное напряжение стороны без регулирования напряжения;

$U_{\mathrm{ном(р)}Ni}$ — номинальное напряжение соответствующего ответвления стороны, где проводится регулирование напряжения.

Для крайних положений РПН величина $U_{\mathrm{ном(р)}Ni}$ принимает значения:

$$U_{\mathrm{ном(р)кр+}} = U_{\mathrm{ном(р)ср}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_*\%}{100}\right), \qquad (\Г.9)$$

$$U_{\mathrm{ном(р)кр-}} = U_{\mathrm{ном(р)ср}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_*\%}{100}\right), \qquad (\Г.10)$$

где $U_{\mathrm{ном(р)ср}}$ — номинальное напряжение ответвления регулируемой обмотки для среднего положения РПН;

$\Delta U_*\%$ — половина суммарного диапазона регулирования напряжения.

Приложение Д
(рекомендуемое)

Расчет переходных сопротивлений в месте короткого замыкания

Д.1 Переходные сопротивления при различных видах КЗ

При междуфазных КЗ переходное сопротивление в месте повреждения определяется сопротивлением электрической дуги между фазными проводниками. При КЗ на землю к сопротивлению дуги добавляются сопротивления элементов между фазным проводником и землей в точке замыкания (сопротивление металлической опоры, заземляющего проводника и т.д.).

Влияние переходного сопротивления в месте КЗ на дистанционные замеры при различных видах повреждений для ЛЭП с односторонним и двусторонним питанием изложено в приложении Б.

В настоящем разделе рассматриваются вопросы расчета величины переходных сопротивлений при различных видах КЗ.

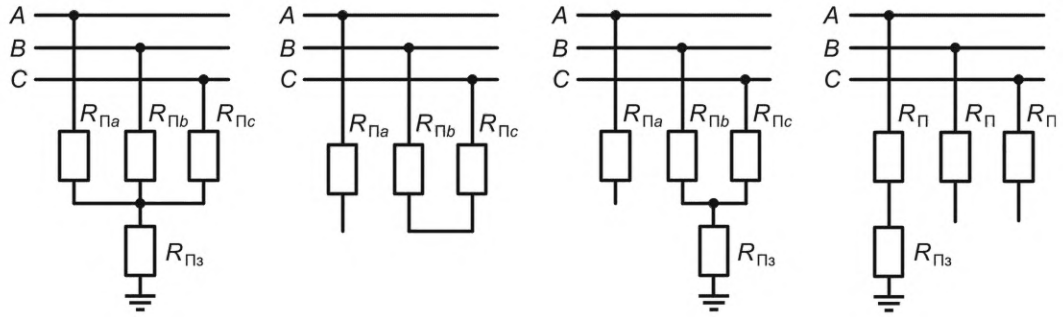
Виды и характер повреждений, величина переходного сопротивления зависят в значительной степени от взаимного расположения токоведущих частей, конструкции и материала опор ЛЭП.

Замыкания через переходное сопротивление можно представить как металлическое КЗ на ответвлении (рисунок Д.1), фазы которого имеют сопротивление $R_П$.

При междуфазных КЗ в общем случае сопротивления $R_П$ в разных фазах не равны.

В случае трехфазного КЗ при перекрытии двух крайних фаз на среднюю (рисунок Г.1, а)) $R_{Пa} \neq 0$, $R_{Пb} = 0$, $R_{Пc} \neq 0$, $R_{Пз} = 0$. При перекрытии всех трех фаз на траверсу металлической опоры по гирляндам изоляторов (рисунок Д.1, а)) $R_{Пa} \neq R_{Пb} \neq R_{Пc}$, $R_{Пз} \neq 0$.

В случае двухфазного КЗ на землю при перекрытии двух фаз на траверсу металлической опоры по гирляндам изоляторов (рисунок Д.1, в)) $R_{Пb} \neq R_{Пc}$, $R_{Пз} \neq 0$. При перекрытии одной из фаз на заземляющий спуск грозотроса с одновременным перекрытием той же фазы на соседнюю фазу возможны случаи: $R_{Пb} \neq 0$, $R_{Пc} = 0$, $R_{Пз} \neq 0$ или $R_{Пb} = 0$, $R_{Пc} \neq 0$, $R_{Пз} \neq 0$.



а) — трехфазное КЗ; б) — двухфазное КЗ; в) — двухфазное КЗ на землю; г) — однофазное КЗ

Рисунок Д.1 — Примеры учета переходных сопротивлений в месте КЗ

В практических расчетах не учитывается пофазное неравенство переходных сопротивлений и принимается:

- при двухфазном КЗ при моделировании КЗ в виде «звезды» переходных сопротивлений (рисунок Д.2, а)):

$$R_П^{(2)} = \frac{R_Д^{(2)}}{2}, \quad (Д.1)$$

где $R_Д^{(2)}$ — сопротивление электрической дуги при двухфазном КЗ, Ом;

$R_П^{(2)}$ — переходное сопротивление при двухфазном КЗ, Ом/фазу;

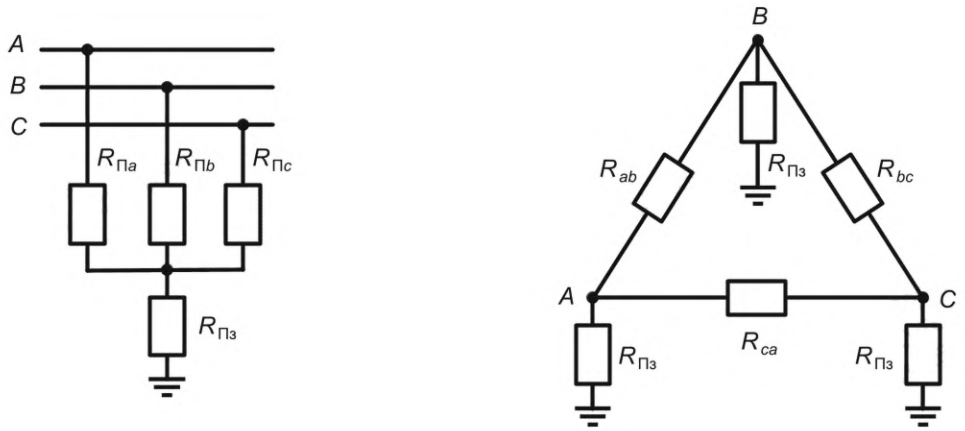
- при трехфазном КЗ при моделировании КЗ в виде «звезды» переходных сопротивлений (рисунок Д.2, а)):

$$R_{Пa} = R_{Пb} = R_{Пc} = R_П^{(3)} = \frac{R_Д^{(3)}}{3}, \quad (Д.2)$$

где $R_Д^{(3)}$ — сопротивление электрической дуги при трехфазном КЗ, Ом;

$R_П^{(3)}$ — переходное сопротивление при трехфазном КЗ, Ом/фазу.

При моделировании междуфазного КЗ в виде «треугольника» переходных сопротивлений (рисунок Д.2, б)), когда в каждую фазу добавляется одинаковая величина $R_П$, при двухфазных КЗ $R_Д^{(2)} = 2R_П^{(2)}$, при трехфазных КЗ $R_Д^{(3)} = 3R_П^{(3)}$.



а) б)

а) «звезда» переходных сопротивлений; б) «треугольник» переходных сопротивлений

Рисунок Д.2 — Примеры моделирования переходных сопротивлений в месте КЗ

Д.2 Расчет переходных сопротивлений при междуфазных КЗ

При замыкании между фазами переходное сопротивление в месте повреждения определяется величиной сопротивления электрической дуги, которое с некоторым приближением принимается чисто активным.

На основании экспериментальных исследований было установлено, что градиент напряжения на дуге мало зависит от величины тока в значительном диапазоне токов КЗ. Напряжение на дуге в отличие от тока, который остается синусоидальным, сильно искажается, поэтому градиент напряжения на дуге характеризуется амплитудным значением.

В отечественной практике принято рассчитывать сопротивление электрической дуги по эмпирической формуле

$$R_Д = \frac{1050 \cdot L_Д}{I_Д}, \qquad (Д.3)$$

где $R_Д$ — сопротивление дуги, Ом;

$L_Д$ — длина дуги с учетом ее раздувания за время действия защиты, м;

$I_Д$ — действующее значение тока в дуге при металлическом междуфазном КЗ в расчетной точке и расчетном режиме, А.

Электрическая дуга имеет неправильную форму и может удлиняться под действием электродинамических усилий в самой дуге, а также под действием ветра.

В течение первых четырех-пяти периодов горения дуги даже при сильном ветре длина дуги может превысить расстояние между фазными проводниками не более чем в 1,2-1,3 раза.

При действии ступеней ДЗ с выдержкой времени не более 0,5—1 с длина дуги может превысить междуфазовое расстояние в полтора-два раза в безветренную погоду, в три-четыре раза при небольшом ветре и в восемьдесять раз при сильных порывах ветра.

В соответствии с расчетными условиями проверки чувствительности ступеней ДЗ ЛЭП расчет значений переходного сопротивления следует проводить в минимальных режимах прилегающей сети при КЗ в начале и в конце защищаемой ЛЭП в режимах транзита и одностороннего отключения ЛЭП с противоположной стороны.

Необходимо учитывать, что сопротивления срабатывания ступеней ДЗ, как правило, задаются в Ом/фазу.

Измерительные органы ДЗ выполняются так, что при металлических междуфазных КЗ дистанционный замер по поврежденному контуру соответствует сопротивлению прямой последовательности участка сети от места установки защиты до места повреждения, в Ом/фазу (см. приложение Б).

При дуговых междуфазных повреждениях к дистанционному замеру добавляется активное сопротивление, равное $R_П$, Ом/фазу для ЛЭП с односторонним питанием, и сопротивление, пропорциональное $R_П$, Ом/фазу для ЛЭП с двусторонним питанием.

При двухфазных КЗ ток в дуге равен суммарному фазному току $I_ф^{(2)}$ в месте повреждения, значение переходного сопротивления с учетом формулы (Д.1) рассчитывается по формуле

$$R_{П}^{(2)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1050 \cdot L_{Д}}{I_{Д}^{(2)}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1050 \cdot L_{Д}}{I_{ф}^{(2)}}, \quad (Д.4)$$

где $I_{ф}^{(2)}$ — суммарный фазный ток в месте повреждения при металлическом двухфазном КЗ в расчетном режиме, А.

При равенстве сопротивлений прямой и обратной последовательности всех элементов сети справедливо соотношение:

$$I_{ф}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{ф}^{(3)}, \quad (Д.5)$$

где $I_{ф}^{(3)}$ — суммарный фазный ток в месте повреждения при металлическом трехфазном КЗ в расчетном режиме, А.

С учетом формулы (Д.5) переходное сопротивление при двухфазном КЗ рассчитывается по формуле

$$R_{П}^{(2)} = \frac{1050 \cdot L_{Д}}{\sqrt{3} I_{ф}^{(3)}}. \quad (Д.6)$$

При трехфазном КЗ справедливо следующее соотношение между током в дуге $I_{Д}^{(3)}$ и фазным током:

$$I_{Д}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{3} I_{ф}^{(3)}. \quad (Д.7)$$

Переходное сопротивление с учетом принятого допущения по формуле (Д.2) рассчитывается как

$$R_{П}^{(3)} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1050 \cdot L_{Д}}{I_{Д}^{(3)}} = \frac{1050 \cdot L_{Д}}{\sqrt{3} I_{ф}^{(3)}}. \quad (Д.8)$$

Из формул (Д.6) и (Д.8) следует, что $R_{П}^{(2)} = R_{П}^{(3)}$, величина переходного сопротивления на фазу одинакова при двухфазных и трехфазных КЗ в данном расчетном режиме при КЗ в одной и той же точке сети.

Таким образом, при разных видах дуговых междуфазных повреждений при подключении измерительных органов ДЗ на линейные напряжения и разность токов соответствующих фаз, дистанционные замеры по поврежденным контурам будут одинаковы.

Д.3 Учет переходных сопротивлений при КЗ на землю

Переходное сопротивление $R_{Пз}$ при КЗ на землю (рисунок Д.1, «г») определяется многими факторами: сопротивлением возникающей электрической дуги, сопротивлением заземляющих устройств опоры, режимом заземления грозозащитных тросов, сопротивлением растеканию токов нулевой последовательности в грунте и т.д.

Наиболее характерными причинами КЗ на землю на ЛЭП являются: перекрытие изоляции во время грозы с ветром при приближении шлейфов проводов к стойке опоры, обрыв гирлянды, провода или грозотроса, перекрытие провода ЛЭП на поросль, падение деревьев на провода, перекрытие гирлянды изоляторов при ее загрязнении или наличии нулевых изоляторов в гирлянде, прохождение под ЛЭП негабаритного транспортного средства, образование гололеда с возникновением «пляски» проводов, пожар на трассе под ЛЭП и т.д.

При замыкании фазного провода на стойку металлической опоры длину дуги можно принять равной 1,2 длины гирлянды изоляторов при длительности КЗ, не превышающей 0,1 с.

Сопротивление заземления металлических и железобетонных опор нормируется, его значение зависит от характера грунта и его влажности. Собственным сопротивлением такой опоры можно пренебречь.

В таблице Д.1 приведены наибольшие значения сопротивлений заземляющих устройств в зависимости от удельного эквивалентного сопротивления грунта.

Таблица Д.1 — Наибольшее сопротивление заземляющих устройств опор ВЛ

Удельное эквивалентное сопротивление грунта ρ, Ом·м	Наибольшее сопротивление заземляющего устройства, Ом
До 100	10
Более 100 до 500	15
Более 500 до 1000	20
Более 1000 до 5000	30

Для ВЛ напряжением выше 110 кВ с многократно глухозаземленными грозотросами или грозотросами со встроенной волоконно-оптической линией связи (как правило, имеют глухое заземление грозотроса на каждой анкерной опоре) эквивалентное сопротивление системы «опоры — грозотрос» не превосходит 5 Ом.

Если грозотросы разрезаны на участки, каждый участок имеет глухое заземление с одного конца, а с другого конца установлен искровой промежуток, значение $R_{Пз}$ принимается в соответствии с таблицей Д.1.

При замыканиях на землю, которые не связаны с перекрытием или пробоем изоляции на металлические опоры (повреждения с падением провода на землю, перекрытия на продукты горения, деревья, проезжающую технику под ЛЭП и др.), значения переходных сопротивлений $R_{Пз}$ могут достигать десятков и даже сотен Ом.

При практических расчетах для ВЛ напряжением 110 кВ и выше с многократно глухозаземленными грозотросами $R_{Пз}$ может быть принято равным 5 Ом.

При отсутствии точных данных удельного эквивалентного сопротивления грунта значение $R_{Пз}$ может быть принято равным:

- для ВЛ 110—220 кВ 5—10 Ом;
- для ВЛ 330 кВ 10—15 Ом;
- для ВЛ 500—750 кВ 10—30 Ом.

При КЗ на землю в пределах контура заземления ПС переходное сопротивление $R_{Пз}$ принимается равным 0,5-5 Ом.

Приложение Е
(справочное)

Вывод формул для согласования дистанционной защиты линий электропередачи с дистанционной защитой трансформатора (автотрансформатора)

В данном приложении приведен вывод расчетных выражений для выбора сопротивления срабатывания ДЗ одиночной ЛЭП по условию согласования с ДЗ Т (АТ) ПС, примыкающей к противоположной стороне защищаемой ЛЭП, с учетом схем подключения последней к измерительным ТТ и ТН.

На рисунках Е.1—Е.6 представлены различные варианты схем подключения ДЗ Т (АТ) к ТТ и ТН.

Расчет сопротивления срабатывания ДЗ А ЛЭП А-Б по условию согласования с ДЗ Б Т (АТ) проводится методом поиска конца зоны действия ступени защиты Б с учетом ее возможного сокращения и отстройкой от полученного замера с необходимым запасом.

Приведенные расчетные выражения применимы для согласования ДЗ с круговыми и полигональными характеристиками срабатывания. При согласовании ДЗ с разнотипными характеристиками необходимо дополнительно учитывать 4.2.2.9.

При выводе выражений принимается, что подпитка места КЗ со стороны обмотки НН АТ отсутствует, $I_{АТ\ НН} = 0$.

Сопротивления элементов электрической сети в схемах замещения приведены к ступени трансформации, где установлена защита ЛЭП. Если в фактически используемой схеме сети это не выполняется, то перед подстановкой в расчетные выражения следует выполнить соответствующее приведение.

Е.1 ДЗ Б Т (АТ) подключена к ТТ и ТН стороны ВН и направлена в Т (АТ).

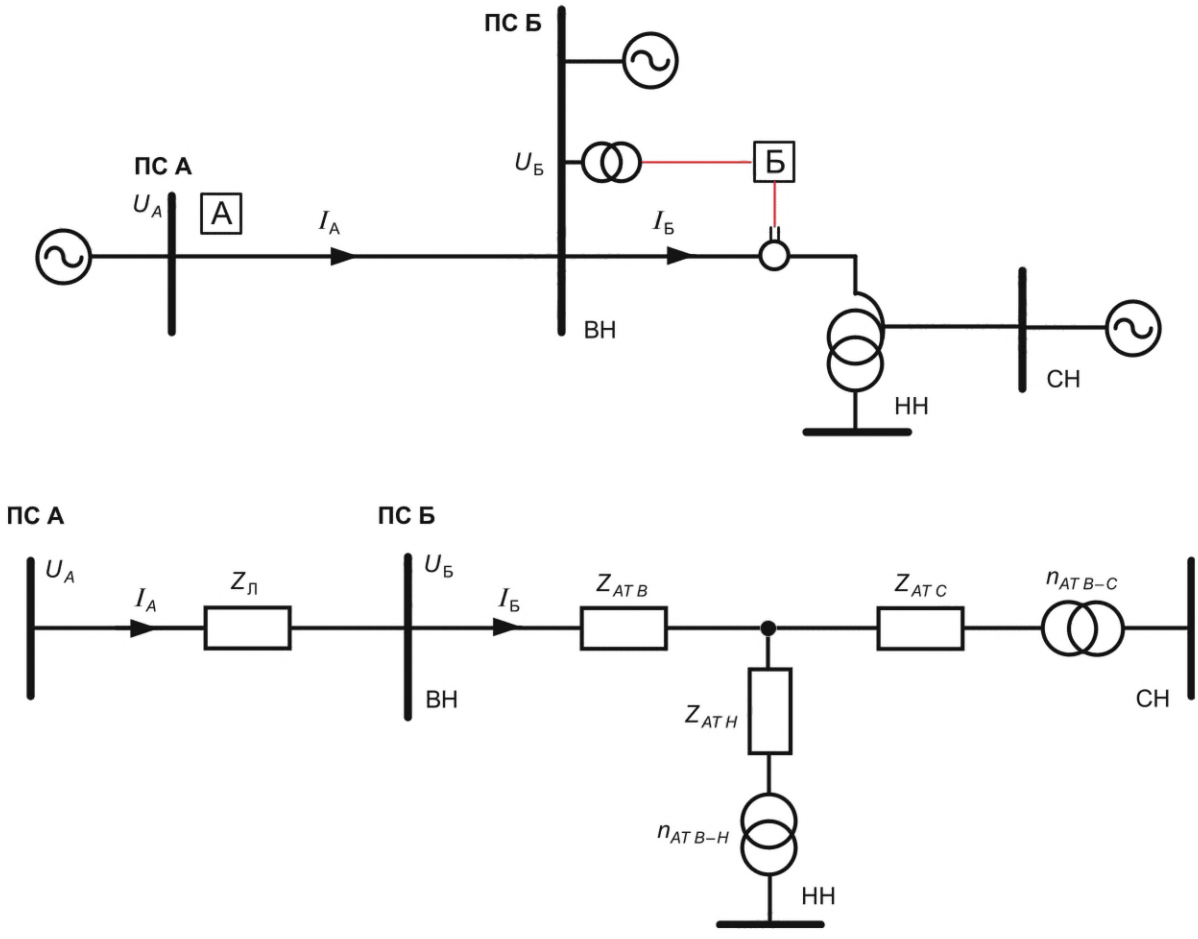


Рисунок Е.1 — Вариант схемы подключения ДЗ АТ к ТТ и ТН стороны ВН

Расчет сопротивления срабатывания защиты А по условию согласования с защитой Б АТ выполняется по неравенству

$$Z_{уст\ А} \le k_{отс} \cdot |\underline{Z}_A| \cdot d, \qquad (Е.1)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, принимается согласно 4.2.2;

$|\underline{Z}_А|$ — модуль расчетного сопротивления в месте установки защиты А;

d — параметр, который учитывает возможное отличие угла расчетного сопротивления $\underline{Z}_А$ от угла максимальной чувствительности круговой характеристики или от угла наклона полигональной характеристики защиты А, определяется согласно 4.2.2.

Модуль замера защиты Б при выводе ее на грань срабатывания равен уставке и определяется по формуле

$$|\underline{Z}_Б| = \left|\frac{\underline{U}_Б}{(1-\alpha)\cdot \underline{I}_Б}\right| = Z_{уст\ Б}, \quad (Е.2)$$

где $\underline{U}_Б$, $\underline{I}_Б$ — напряжение и ток в месте установки защиты Б;

α — коэффициент, который учитывает возможное снижение тока $\underline{I}_Б$ и сокращение зоны защиты Б из-за погрешности ТТ, значение принимается согласно 4.2.3.

Ток в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{I}_А = k_т \cdot \underline{I}_Б, \quad (Е.3)$$

где $k_т$ — коэффициент токораспределения, равный отношению первичного тока в защите А к первичному току в защите Б, с которой проводится согласование.

Напряжение в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{U}_А = \underline{U}_Б + \underline{Z}_Л \cdot \underline{I}_А. \quad (Е.4)$$

Напряжение в месте установки защиты Б определяется по формуле

$$\underline{U}_Б = (1-\alpha)\cdot \underline{I}_Б \cdot Z_{уст\ Б}. \quad (Е.5)$$

С учетом формулы (Е.5) напряжение в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{U}_А = (1-\alpha)\cdot \underline{I}_Б \cdot Z_{уст\ Б} + \underline{Z}_Л \cdot \underline{I}_А = (1-\alpha)\cdot \frac{\underline{I}_А}{k_т} \cdot Z_{уст\ Б} + \underline{Z}_Л \cdot \underline{I}_А. \quad (Е.6)$$

Дистанционный замер в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{Z}_А = |\underline{Z}_{Л\text{-}1}| + \frac{1-\alpha}{k_т} \cdot Z_{уст\ Б}. \quad (Е.7)$$

Сопротивление срабатывания защиты А определяется по неравенству

$$Z_{уст\ А} \le k_{отс} \cdot \left|\underline{Z}_{Л\text{-}1} + \frac{1-\alpha}{k_т} \cdot Z_{уст\ Б}\right| \cdot d. \quad (Е.8)$$

Е.2 ДЗ Б Т (АТ) подключена к ТТ и ТН стороны СН и направлена в Т (АТ).

Этот случай полностью аналогичен случаю, описанному в Е.1, и расчетное выражение для него выводится аналогично неравенству (Е.8).

Е.3 ДЗ Б Т (АТ) подключена к ТТ и ТН стороны СН и направлена в сторону шин СН

Модуль дистанционного замера защиты Б при выводе ее на грань срабатывания равен уставке и определяется по формуле

$$|\underline{Z}_Б| = \left|\frac{\underline{U}_Б}{(1-\alpha)\cdot \underline{I}_Б}\right| = Z_{уст\ Б}. \quad (Е.9)$$

Токи в месте установки защит равны:

$$\underline{I}_А = k_т \cdot \frac{\underline{I}_Б}{n_{АТ\ В\text{-}С}}, \quad (Е.10)$$

$$\underline{I}_Б = n_{АТ\ В\text{-}С} \cdot \frac{\underline{I}_А}{k_т}. \quad (Е.11)$$

Напряжение в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{U}_А = n_{АТ\ В\text{-}С} \cdot \underline{U}_Б + \frac{\underline{I}_Б}{n_{АТ\ В\text{-}С}} \cdot (\underline{Z}_{АТ\ В} + \underline{Z}_{АТ\ С}) + \underline{Z}_Л \cdot \underline{I}_А. \quad (Е.12)$$

Напряжение в месте установки защиты Б определяется по формуле

$$\underline{U}_Б = (1-\alpha)\cdot \underline{I}_Б \cdot Z_{уст\ Б} = (1-\alpha)\cdot n_{АТ\ В\text{-}С} \cdot \frac{\underline{I}_А}{k_т} \cdot Z_{уст\ Б}, \quad (Е.13)$$

$$\underline{U}_А = n^2_{АТ\ В\text{-}С} \cdot (1-\alpha)\cdot \frac{\underline{I}_А}{k_т} \cdot Z_{уст\ Б} + \frac{\underline{I}_Б}{n_{АТ\ В\text{-}С}} \cdot (\underline{Z}_{АТ\ В} + \underline{Z}_{АТ\ С}) + \underline{Z}_Л \cdot \underline{I}_А = n^2_{АТ\ В\text{-}С} \cdot (1-\alpha)\cdot \frac{\underline{I}_А}{k_т} \cdot Z_{уст\ Б} + \frac{\underline{I}_А}{k_т} \cdot (\underline{Z}_{АТ\ В} + \underline{Z}_{АТ\ С}) + \underline{Z}_Л \cdot \underline{I}_А.$$

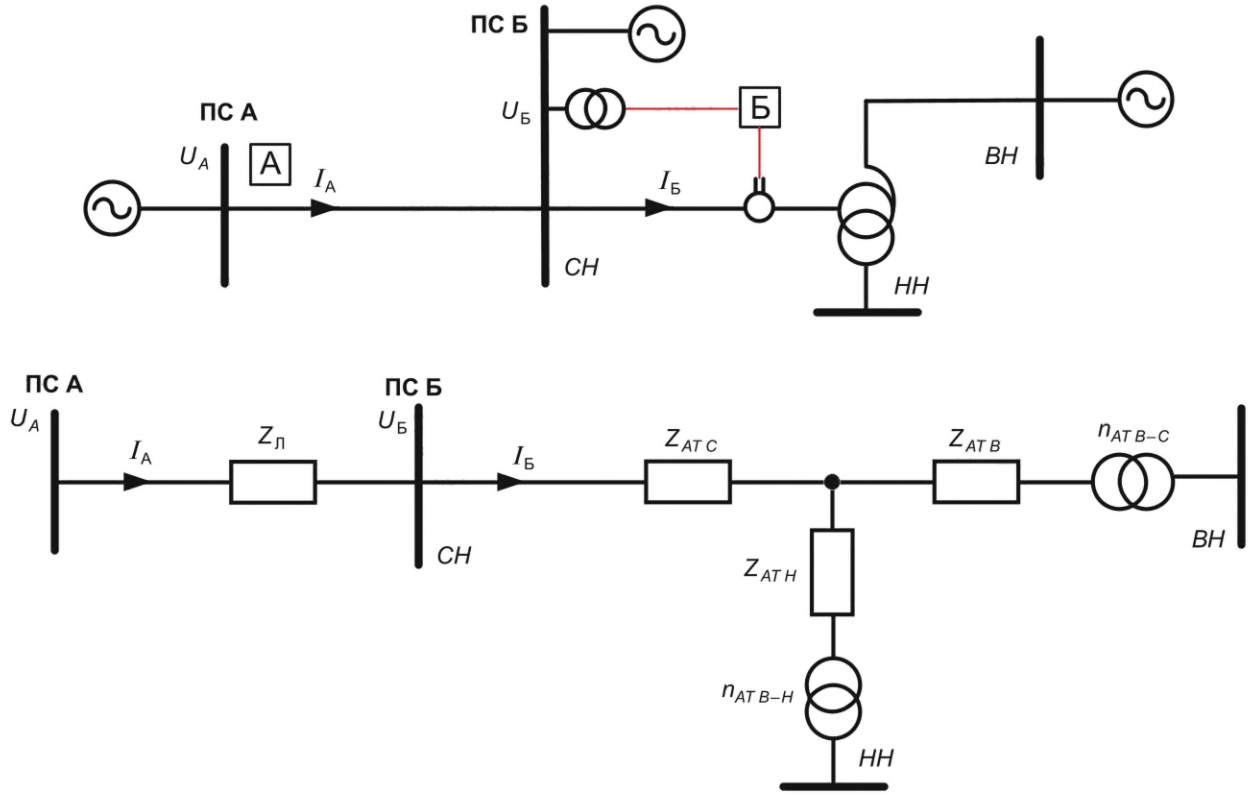


Рисунок Е.2 — Вариант схемы подключения ДЗ АТ к ТТ и ТН стороны СН

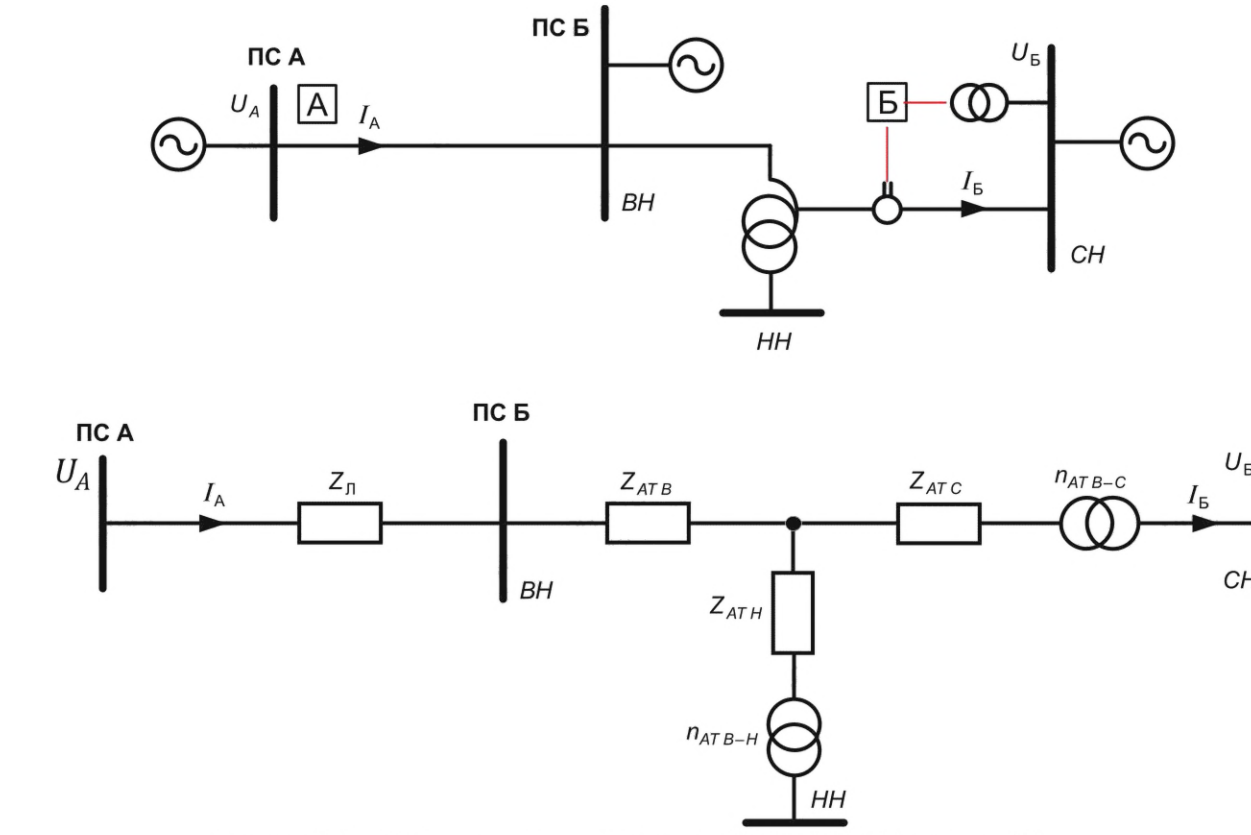


Рисунок Е.3 — Вариант схемы подключения ДЗ АТ к ТТ и ТН стороны СН

Дистанционный замер в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{Z}_{\text{А}} = \frac{\underline{U}_{\text{А}}}{\underline{I}_{\text{А}}} = n^2_{\text{АТ В-С}} \cdot \frac{1-\alpha}{k_{\text{т}}} \cdot Z_{\text{уст Б}} + \frac{1}{k_{\text{т}}} \cdot \left(\underline{Z}_{\text{АТ В}} + \underline{Z}_{\text{АТ С}}\right) + \underline{Z}_{\text{Л}}. \quad \text{(Е.14)}$$

Сопротивление срабатывания защиты А определяется по неравенству

$$Z_{\text{уст А}} \le k_{\text{отс}} \cdot \left| \underline{Z}_{\text{Л}} + \frac{1}{k_{\text{т}}} \cdot \left(\underline{Z}_{\text{АТ В}} + \underline{Z}_{\text{АТ С}}\right) + \frac{n^2_{\text{АТ В-С}} \cdot (1-\alpha)}{k_{\text{т}}} \cdot Z_{\text{уст Б}} \right| \cdot d. \quad \text{(Е.15)}$$

Е.4 ДЗ Б Т (АТ) подключена к ТТ и ТН стороны ВН Т (АТ) и направлена в сторону шин ВН.

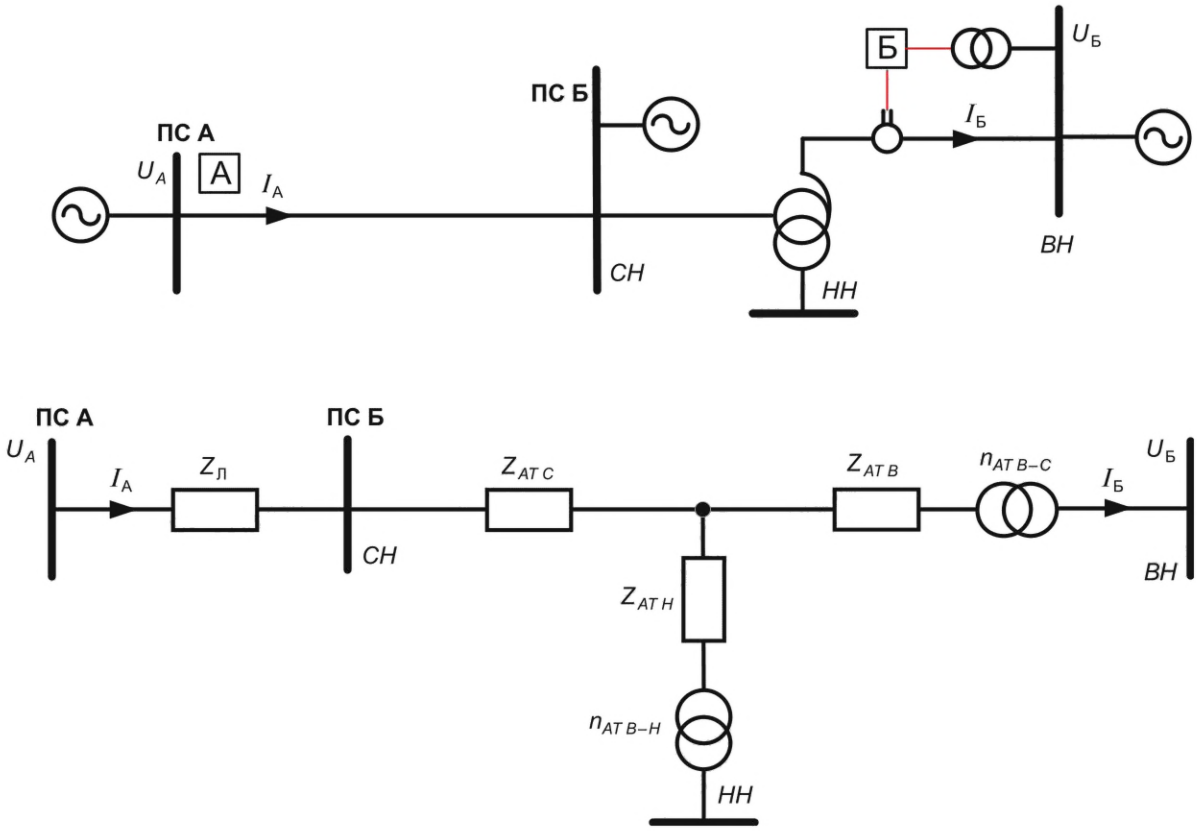


Рисунок Е.4 — Вариант схемы подключения ДЗ АТ к ТТ и ТН стороны ВН

Модуль дистанционного замера защиты Б при выводе ее на грань срабатывания равен уставке и определяется по формуле

$$\left|\underline{Z}_{\text{Б}}\right| = \left| \frac{\underline{U}_{\text{Б}}}{(1-\alpha) \cdot \underline{I}_{\text{Б}}} \right| = Z_{\text{уст Б}}. \quad \text{(Е.16)}$$

Токи в месте установки защит равны:

$$\underline{I}_{\text{А}} = n_{\text{АТ В-С}} \cdot k_{\text{т}} \cdot \underline{I}_{\text{Б}}, \quad \text{(Е.17)}$$

$$\underline{I}_{\text{Б}} = \frac{\underline{I}_{\text{А}}}{n_{\text{АТ В-С}} \cdot k_{\text{т}}}. \quad \text{(Е.18)}$$

Напряжение в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{U}_{\text{А}} = \frac{\underline{U}_{\text{Б}}}{n_{\text{АТ В-С}}} + n_{\text{АТ В-С}} \cdot \underline{I}_{\text{Б}} \cdot \left(\underline{Z}_{\text{АТ В}} + \underline{Z}_{\text{АТ С}}\right) + \underline{Z}_{\text{Л}} \cdot \underline{I}_{\text{А}}. \quad \text{(Е.19)}$$

Из формулы (Е.16) для замера защиты Б выразим напряжение $\underline{U}_{\text{Б}}$:

$$\underline{U}_{\text{Б}} = (1-\alpha) \cdot \underline{I}_{\text{Б}} \cdot Z_{\text{уст Б}} = (1-\alpha) \ \frac{\underline{I}_{\text{А}}}{n_{\text{АТ В-С}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot Z_{\text{уст Б}}, \quad \text{(Е.20)}$$

$$\underline{U}_{А} = (1-\alpha)\cdot\frac{\underline{I}_{А}}{n^{2}_{АТ\ В\text{-}С}\cdot k_{т}}\cdot Z_{уст\ Б} + n_{АТ\ В\text{-}С}\cdot\underline{I}_{Б}\cdot\left(\underline{Z}_{АТ\ В}+\underline{Z}_{АТ\ С}\right)+\underline{Z}_{Л}\cdot\underline{I}_{А} = \frac{(1-\alpha)}{n^{2}_{АТ\ В\text{-}С}}\cdot\frac{\underline{I}_{А}}{k_{т}}\cdot Z_{уст\ Б} + \frac{\underline{I}_{А}}{k_{т}}\cdot\left(\underline{Z}_{АТ\ В}+\underline{Z}_{АТ\ С}\right)+\underline{Z}_{Л}\cdot\underline{I}_{А}.$$

Дистанционный замер в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{Z}_{А} = \frac{\underline{U}_{А}}{\underline{I}_{А}} = \frac{1-\alpha}{n^{2}_{АТ\ В\text{-}С}\cdot k_{т}}\cdot Z_{уст\ Б} + \frac{1}{k_{т}}\cdot\left(\underline{Z}_{АТ\ В}+\underline{Z}_{АТ\ С}\right)+\underline{Z}_{Л}. \quad (Е.21)$$

Сопротивление срабатывания защиты А определяется по неравенству

$$Z_{уст\ А} \le k_{отс}\cdot\left|\underline{Z}_{Л}+\frac{1}{k_{т}}\cdot\left(\underline{Z}_{АТ\ В}+\underline{Z}_{АТ\ С}\right)+\frac{1-\alpha}{n^{2}_{АТ\ В\text{-}С}\cdot k_{т}}\cdot Z_{уст\ Б}\right|\cdot d. \quad (Е.22)$$

Е.5 ДЗ Б Т (АТ) подключена к ТТ стороны ВН и ТН стороны НН и направлена в Т (АТ).

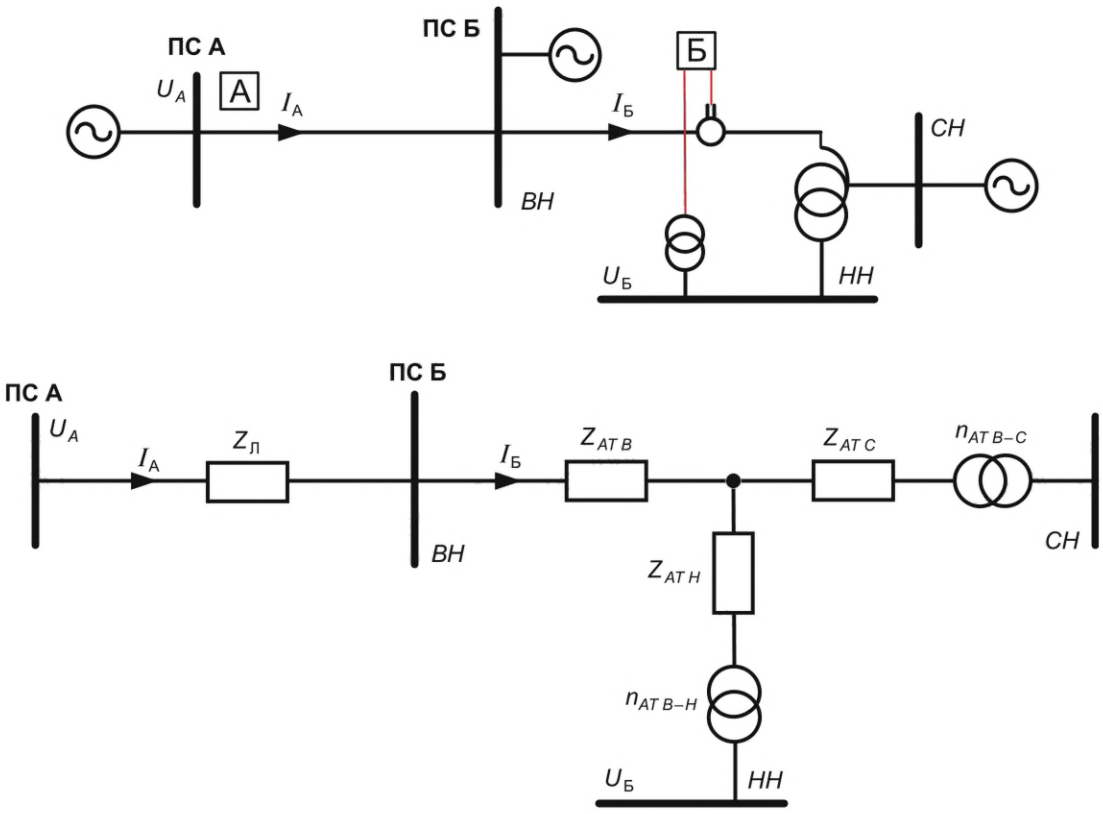


Рисунок Е.5 — Вариант схемы подключения ДЗ АТ к ТТ стороны ВН и ТН стороны НН

Если ТТ и ТН установлены на разных ступенях трансформации Т (АТ), в качестве первичного сопротивления срабатывания защиты Б принимается сопротивление, приведенное к стороне, где установлены ТТ. В дальнейшем считаем, что приведение выполнено через номинальный коэффициент трансформации силового Т (АТ) $n_{АТ\ В\text{-}Н\ ном}$.

Модуль замера защиты Б при выводе ее на грань срабатывания равен уставке и определяется по формуле

$$\left|\underline{Z}_{Б}\right| = \left|\frac{n_{АТ\ В\text{-}Н\ ном}\cdot\underline{U}_{Б}}{(1-\alpha)\cdot\underline{I}_{Б}}\right| = Z_{уст\ Б}. \quad (Е.23)$$

Выразим замер защиты А через замер защиты Б:

$$\underline{I}_{А} = k_{т}\cdot\underline{I}_{Б}. \quad (Е.24)$$

Напряжение в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{U}_{А} = n_{АТ\ В\text{-}Н}\cdot\underline{U}_{Б} + \underline{Z}_{АТ\ В}\cdot\underline{I}_{Б} + \underline{Z}_{Л}\cdot\underline{I}_{А}. \quad (Е.25)$$

Из формулы для замера защиты Б выразим напряжение $\underline{U}_{Б}$:

$$\underline{U}_{Б} = \frac{(1-\alpha)\cdot\underline{I}_{Б}\cdot Z_{уст\ Б}}{n_{АТ\ В\text{-}Н\ ном}}. \quad (Е.26)$$

Напряжение в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{U}_{А} = n_{АТ\ В\text{-}Н} \cdot \frac{(1-\alpha)\cdot \underline{I}_{Б} \cdot Z_{уст\ Б}}{n_{АТ\ В\text{-}Н\ ном}} + \underline{Z}_{АТ\ В} \cdot \underline{I}_{Б} + \underline{Z}_{Л} \cdot \underline{I}_{А} = = \frac{n_{АТ\ В\text{-}Н}}{n_{АТ\ В\text{-}Н\ ном}} \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{\underline{I}_{А}}{k_{т}} \cdot Z_{уст\ Б} + \underline{Z}_{АТ\ В} \cdot \frac{\underline{I}_{А}}{k_{т}} + \underline{Z}_{Л} \cdot \underline{I}_{А}. \quad (Е.27)$$

Дистанционный замер в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{Z}_{А} = \frac{\underline{U}_{А}}{\underline{I}_{А}} = \frac{n_{АТ\ В\text{-}Н}}{n_{АТ\ В\text{-}Н\ ном}} \cdot \frac{(1-\alpha)}{k_{т}} \cdot Z_{уст\ Б} + \frac{\underline{Z}_{АТ\ В}}{k_{т}} + \underline{Z}_{Л}. \quad (Е.28)$$

Сопротивление срабатывания защиты А определяется по неравенству

$$Z_{уст\ А} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_{Л} + \frac{\underline{Z}_{АТ\ В}}{k_{т}} + \frac{n_{АТ\ В\text{-}Н}}{n_{АТ\ В\text{-}Н\ ном}} \cdot \frac{1-\alpha}{k_{т}} \cdot Z_{уст\ Б} \right| \cdot d. \quad (Е.29)$$

Е.6 ДЗ Б Т (АТ) подключена к ТТ стороны СН и ТН стороны НН и направлена в сторону шин СН.

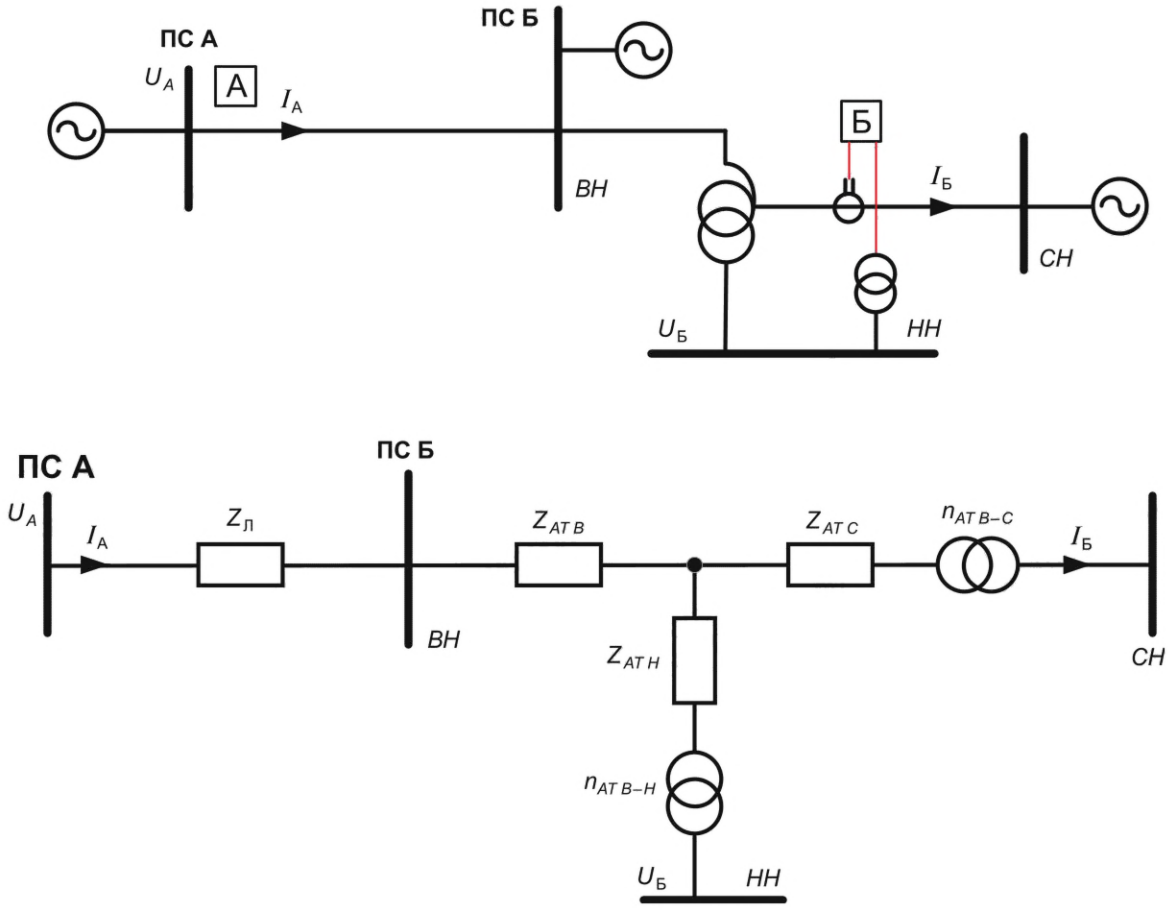


Рисунок Е.6 — Вариант схемы подключения ДЗ АТ к ТТ стороны СН и ТН стороны НН

Если ТТ и ТН установлены на разных ступенях трансформации Т (АТ), в качестве первичного сопротивления срабатывания защиты Б принимается сопротивление, приведенное к стороне, где установлены ТТ. В дальнейшем считаем, что приведение выполнено через номинальный коэффициент трансформации силового Т (АТ) $n_{АТ\ С\text{-}Н\ ном}$.

Модуль дистанционного замера защиты Б при выводе ее на грань срабатывания равен уставке и определяется по формуле

$$\left|\underline{Z}_{Б}\right| = \left| \frac{n_{АТ\ С\text{-}Н\ ном} \cdot \underline{U}_{Б}}{(1-\alpha)\cdot \underline{I}_{Б}} \right| = Z_{уст\ Б}. \quad (Е.30)$$

Токи в месте установки защит определяются:

$$\underline{I}_{А} = k_{т} \cdot \frac{\underline{I}_{Б}}{n_{АТ\ В\text{-}С}}, \quad (Е.31)$$

$$\underline{I}_{Б} = n_{АТ\ В\text{-}С} \cdot \frac{\underline{I}_{А}}{k_{т}}. \quad (Е.32)$$

Напряжение в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{U}_{А} = n_{АТ\ В\text{-}Н} \cdot \underline{U}_{Б} + \frac{\underline{I}_{Б}}{n_{АТ\ В\text{-}С}} \cdot \underline{Z}_{АТ\ В} + \underline{Z}_{Л} \cdot \underline{I}_{А}. \quad (Е.33)$$

Из выражения для замера защиты Б выразим напряжение $\underline{U}_{Б}$:

$$\underline{U}_{Б} = \frac{(1-\alpha)}{n_{АТ\ С\text{-}Н\ ном}} \cdot \underline{I}_{Б} \cdot Z_{уст\ Б} = \frac{n_{АТ\ В\text{-}С}}{n_{АТ\ С\text{-}Н\ ном}} \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{\underline{I}_{А}}{k_{т}} \cdot Z_{уст\ Б}. \quad (Е.34)$$

Напряжение в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\begin{aligned} \underline{U}_{А} &= n_{АТ\ В\text{-}Н} \cdot \frac{n_{АТ\ В\text{-}С}}{n_{АТ\ С\text{-}Н\ ном}} \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{\underline{I}_{А}}{k_{т}} Z_{уст\ Б} + \frac{\underline{I}_{Б}}{n_{АТ\ В\text{-}С}} \cdot \underline{Z}_{АТ\ В} + \underline{Z}_{Л} \cdot \underline{I}_{А} = \\ &= \frac{n_{АТ\ В\text{-}Н} \cdot n_{АТ\ В\text{-}С}}{n_{АТ\ С\text{-}Н\ ном}} \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{\underline{I}_{А}}{k_{т}} \cdot Z_{уст\ Б} + \frac{\underline{I}_{А}}{k_{т}} \cdot \underline{Z}_{АТ\ В} + \underline{Z}_{Л} \cdot \underline{I}_{А}. \end{aligned} \quad (Е.35)$$

Дистанционный замер в месте установки защиты А определяется по формуле

$$\underline{Z}_{А} = \frac{\underline{U}_{А}}{\underline{I}_{А}} = \frac{n_{АТ\ В\text{-}Н} \cdot n_{АТ\ В\text{-}С}}{n_{АТ\ С\text{-}Н\ ном}} \cdot \frac{1-\alpha}{k_{т}} \cdot Z_{уст\ Б} + \frac{1}{k_{т}} \cdot \underline{Z}_{АТ\ В} + \underline{Z}_{Л}. \quad (Е.36)$$

Сопротивление срабатывания защиты А определяется по неравенству

$$Z_{уст\ А} \le k_{отс} \cdot \left| \underline{Z}_{Л} + \frac{1}{k_{т}} \cdot \underline{Z}_{АТ\ В} + \frac{n_{АТ\ В\text{-}Н} \cdot n_{АТ\ В\text{-}С}}{n_{АТ\ С\text{-}Н\ ном}} \cdot \frac{1-\alpha}{k_{т}} \cdot Z_{уст\ Б} \right| \cdot d. \quad (Е.37)$$

Приложение Ж
(рекомендуемое)

Расчет сопротивления срабатывания дистанционной защиты линий электропередачи по условию отстройки от броска тока намагничивания трансформатора и автотрансформатора

Переходный процесс, проявляющийся в резком увеличении намагничивающего тока ненагруженного силового Т (АТ) или трансформаторного комплекса (совокупности соединенных друг с другом Т (АТ) при включении Т (АТ) под напряжение или при восстановлении напряжения после отключения внешнего КЗ), называется БТН.

При включении ЛЭП под напряжение с присоединенными к ней ненагруженными силовыми Т в фазах линии могут протекать БТН, форма и значения которых зависят от различных факторов.

Параметры, характеризующие величину и форму БТН, зависят от момента коммутации при включении Т под напряжение и при его отключении. При практических расчетах для целей РЗ пользуются предельными характеристиками БТН, возникающими при наиболее неблагоприятных условиях.

В связи с возможной разновременностью включения фаз выключателя ЛЭП следует рассматривать:

- трехфазное включение (одновременное включение всех трех фаз);
- двухфазное включение (одновременное включение двух фаз с некоторым запаздыванием включения третьей фазы);
- однофазное включение (включение одной фазы с некоторым запаздыванием включения двух других фаз).

Расчетным для определения сопротивления срабатывания ДЗ ЛЭП при наличии ответвлений по условию отстройки от БТН Т ПС на ответвлениях является двухфазное включение.

Ток двухфазного включения можно выразить через расчетное значение БТН при однофазном включении, при этом нейтрали всех Т ПС на ответвлениях учитываются как заземленные вне зависимости от их фактического состояния.

В режиме включения ненагруженного силового Т под напряжение в действительности не происходит полного насыщения ярм магнитопровода, поэтому при расчетах параметров срабатывания защит по рассматриваемому условию создается значительный запас (порядка 30 %).

Учитывая указанные запасы, значение БТН рассчитывают по формуле

$$I_{\text{нам}} = \frac{C_{\text{б}}^{(k)} \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\left(x_{\text{С-1}} + X_{\text{Т экв}}^{(k)}\right)}, \qquad \text{(Ж.1)}$$

где $C_{\text{б}}^{(k)}$ — коэффициент броска, учитывающий вид включения и изменение действующего значения тока при затухании, а также сорт стали, из которой изготовлен Т;

$U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение ЛЭП;

$X_{\text{С-1}}$ — индуктивное сопротивление прямой последовательности энергосистемы со стороны ПС, откуда ЛЭП ставится под напряжение;

$X_{\text{Т экв}}^{(k)}$ — эквивалентное сопротивление Т (АТ) и ЛЭП.

При наличии на линии одного Т (АТ) эквивалентное сопротивление рассчитывается по формуле

$$X_{\text{Т экв}}^{(k)} = X_{\text{Л-1}} + X_{\text{Т}}^{(k)}, \qquad \text{(Ж.2)}$$

где $X_{\text{Л-1}}$ — сопротивление прямой последовательности участка линии от питающей ПС до шин ПС, на которой установлен рассматриваемый Т (АТ);

$X_{\text{Т}}^{(k)}$ — сопротивление Т (АТ) при включении $X_{\text{Т}}^{(1)}$ или $X_{\text{Т}}^{(3)}$;

$X_{\text{Т}}^{(1)}$, $X_{\text{Т}}^{(3)}$ — сопротивления Т в условиях насыщения магнитопровода, соответственно, при однофазном и трехфазном включении.

При выполнении расчетов для случая двухфазного включения в формуле (Ж.2) используется значение $X_{\text{Т}}^{(1)}$.

В целях упрощения при однофазном включении значения сопротивлений $X_{\text{С-1}}$ и $X_{\text{Л-1}}$ принимаются равными сопротивлениям прямой последовательности системы и ЛЭП, а не сопротивлению контура включения «провод — земля».

Значение $X_{\text{Т}}^{(k)}$ может быть вычислено по приближенным расчетным выражениям, приведенным в таблице Ж.1.

Таблица Ж.1 — Расчетные выражения для определения сопротивления Т (АТ) при включении под напряжение

Включаемый элемент	Мощность, $S_{ном}$, МВА	Расчетное выражение для определения сопротивления	
		$X_T^{(3)}$, %	$X_T^{(1)}$, %
Трансформатор	6,3—60	$12,7 + U_k$	$\frac{12,7 + U_k}{1,35}$
	80	$21,4 + U_k$	$\frac{21,4 + U_k}{1,35}$
Автотрансформатор	125	$25,7 + U_k$	$\frac{25,7 + U_k}{1,3}$
	200	$35 + U_k$	$\frac{35 + U_k}{1,28}$
Примечание — U_k, % — напряжение КЗ Т при наличии РПН принимается для среднего положения РПН.			

Для трехобмоточных Т и АТ U_k соответствует наибольшему из значений напряжений КЗ между обмоткой, со стороны которой проводится включение, и одной из двух других обмоток. Для АТ U_k должно быть приведено к проходной мощности АТ.

Реактивное сопротивление Т $X_T^{(k)}$ в именованных единицах рассчитывается по формуле

$$X_T^{(k)} = \frac{X_{T\,\%}^{(k)} \cdot U_{ном}^2}{100 \cdot S_{ном}}, \text{ Ом}, \qquad (Ж.3)$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение Т, кВ;

$S_{ном}$ — номинальная мощность Т, МВА;

$X_{T,\,\%}^{(k)}$ — сопротивление Т в %, определяемое с помощью расчетных выражений таблицы Ж.1.

При наличии на линии нескольких Т эквивалентное сопротивление $X_{T\,экв}^{(k)}$ рассчитывается с помощью эквивалентирования участков линии и подключенных Т.

Пример — Для схемы на рисунке Ж.1 при включении ЛЭП 1-2 под напряжение со стороны ПС 1:

$$\boldsymbol{X}_{T\,экв}^{(k)} = \left[\left(\boldsymbol{X}_{\text{Т-1}} + \boldsymbol{X}_{\text{Л-1}} + \boldsymbol{X}_{\text{Л-4}}\right) \| \left(\boldsymbol{X}_{\text{Т-2}} + \boldsymbol{X}_{\text{Л-2}}\right) + \boldsymbol{X}_{\text{Л-5}}\right] \| \ldots \| \left[\boldsymbol{X}_{\text{Т-3}} + \boldsymbol{X}_{\text{Л-3}}\right] + \boldsymbol{X}_{\text{Л-6}}. \qquad \textit{(Ж.4)}$$

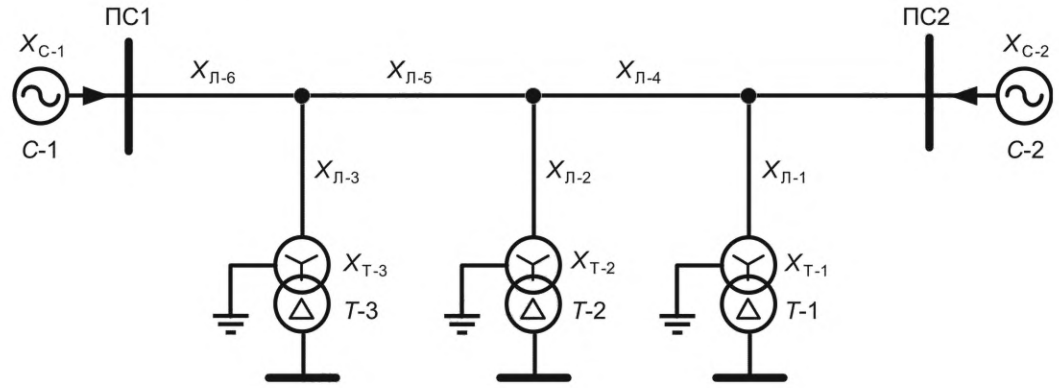


Рисунок Ж.1 — Схема сети для определения $\boldsymbol{X}_{T\,экв}^{(k)}$

Первичное сопротивление срабатывания ДО защиты, включенного на междуфазное напряжение и разность соответствующих фазных токов, по условию отстройки от БТН определяется на основании формулы

$$Z_{уст} \le \frac{U_{1г}^{(2)}}{2 \cdot I_{1г}^{(2)}}, \qquad (Ж.5)$$

где $Z_{уст}$ — первичное сопротивление срабатывания, выбранное по условию отстройки от БТН Т;

$U_{1г}^{(2)}$ и $I_{1г}^{(2)}$ — напряжение и ток основной гармоники при двухфазном включении.

На основании формулы (Ж.5) может быть получено расчетное неравенство:

$$Z_{уст} \le C_б \cdot \left(X_{С\text{-}1} + X_{Т\,экв}^{(1)} \right) - X_{С\text{-}1}, \qquad (Ж.6)$$

где $X_{Т\,экв}^{(1)}$ — эквивалентное сопротивление Т (АТ) и линии, рассчитывается по формуле (Ж.2) или (Ж.4);

$C_б$ — коэффициент броска, принимается равным:

1) для ЛЭП напряжением 110 кВ:

- 1,75 — для Т (АТ) из холоднокатаной стали;
- 2,65 — для Т (АТ) из горячекатаной стали;

2) для ЛЭП напряжением 220 кВ:

- 1,55 — для Т (АТ) из холоднокатаной стали;
- 2,5 — для Т (АТ) из горячекатаной стали.

Значения коэффициента броска приведены для ступени ДЗ, действующей без выдержки времени. Если ступень ДЗ действует с выдержкой времени, необходимо учитывать затухание БТН. Как правило, ступени ДЗ с выдержкой времени 0,3 с и более отстроены от БТН. Для ступеней ДЗ с меньшими выдержками времени целесообразно выполнить проверку по формуле (Ж.6) с приведенными значениями $C_б$, это даст дополнительный запас по отстройке.

Для ЛЭП напряжением выше 220 кВ рекомендуется применять значения $C_б$, приведенные для ЛЭП напряжением 220 кВ, в связи с отсутствием уточненных данных. Коэффициенты $C_б$ уменьшаются с увеличением уровня напряжения, поэтому использование данных для напряжения 220 кВ на более высоких уровнях напряжений, даст дополнительный запас по отстройке.

Библиография

[1] Правила технологического функционирования электроэнергетических систем (утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации от 13 августа 2018 г. № 937)

[2] Требования к релейной защите и автоматике различных видов и ее функционированию в составе энергосистемы (утверждены приказом Минэнерго России от 10 июля 2020 г. № 546)

[3] Сборник распорядительных материалов по эксплуатации энергосистем (СРМ-2000). Часть 2. Электротехническая часть (утверждено РАО «ЕЭС России» 27.06.2002)

УДК 621.311:006.354 ОКС 27.010-01

Ключевые слова: релейная защита, дистанционная защита, линия электропередачи, метод расчета, параметр настройки

Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.В. Бучная*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 08.12.2025. Подписано в печать 27.01.2026. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 20,00. Уч.-изд. л. 19,00.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru