ЧАСТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

А.В. Булычев, Ю.В. Бычков, З.В. Ясина

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ 110-220 кВ: РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ

Учебное пособие

Чебоксары 2019

УДК 621.316.925
ББК 31.27-05

Булычев В.А., Бычков Ю.В., Ясина З.В.
Б90 Основные защиты линий. Рекомендации по выбору параметров срабатывания. Учебное пособие – Чебоксары: ИПК РЗА, 2019. – 160 с.

В методическом пособии приведены краткие методические указания по выбору параметров срабатывания основных защит линий 110-220 кВ.
Пособие предназначено для специалистов в области электроэнергетики, обучающихся на курсах повышения квалификации, а также, для студентов и магистрантов электроэнергетических специальностей вузов.

Научный редактор А.В. Булычев, д-р техн. наук, профессор

УДК 621.316.925
ББК 31.27-05

ISBN978-5-6042431-1-4

© ИПК РЗА, 2019
© А.В. Булычев, 2019

Изложены методы построения основных защит линий электропередачи 110-220 кВ. Рассмотрены принципы действия и расчет параметров срабатывания измерительных органов и таймеров направленной высокочастотной, дифференциально-фазной и продольной дифференциальной защит линий 110-220 кВ, реализованных на базах терминалов «Бреслер-0107.500», «Бреслер-0107.502», «Бреслер-0107.520», «Бреслер-0107.522», «Бреслер-0107.530», «Бреслер-0107.532».

Учебное пособие предназначено для углубленного изучения теоретических и практических аспектов релейной защиты в электрических сетях 110-220 кВ и может служить практическим пособием при выполнении расчетов параметров эксплуатируемых защит, а также, при проектировании новых линий электропередач этих классов напряжения.

Учебное пособие полезно специалистам проектных организаций и предприятий, эксплуатирующих электрические сети и системы, преподавателям, студентам, аспирантам и слушателям курсов повышения квалификации по программам релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ 8
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ 9
1.1. Область применения защит 9
1.2. Принципы действия защит 11
1.2.1. Принцип действия направленной высокочастотной защиты 11
1.2.2. Принцип действия дифференциально-фазной защиты..... 13
1.2.3. Принцип действия продольной дифференциальной защиты 15
1.3. Описание устройств защиты БРЕСЛЕР 17
2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТ..... 22
2.1. Общие сведения 22
2.2. Направленная высокочастотная защита 24
2.2.1. Выбор параметров срабатывания НВЧЗ .. 24
2.2.2. Определение положения накладок НВЧЗ.. 40
2.3. Примеры расчета параметров срабатывания НВЧЗ 41
2.3.1. Пример расчета параметров срабатывания НВЧЗ для одиночной линии с двухсторонним питанием..... 41
2.3.2. Пример расчета параметров срабатывания НВЧЗ для линии с двухсторонним питанием при наличии ответвления на линии 55
2.4. Дифференциально-фазная защита 69
2.4.1. Выбор параметров срабатывания ДФЗ 69
2.4.2. Определение положения накладок ДФЗ ... 80
2.5. Примеры расчета параметров срабатывания ДФЗ 81

2.5.1. Пример расчета параметров срабатывания ДФЗ для одиночной линии с двухсторонним питанием 81
2.5.2. Пример расчета параметров срабатывания ДФЗ для линии с двухсторонним питанием при наличии ответвления на линии 91
2.6. Продольная дифференциальная защита линии .. 101
2.6.1. Выбор параметров срабатывания ДЗЛ 101
2.6.2. Определение положения накладок и переключателей ДЗЛ 104
2.7. Примеры расчета параметров срабатывания ДЗЛ 106
2.7.1. Пример расчета параметров срабатывания ДЗЛ на одиночной линии с двухсторонним питанием 106
2.7.2. Пример расчета параметров срабатывания ДЗЛ на линии с двухсторонним питанием при наличии ответвления на линии 109
2.8. Контроль цепей тока..... 114
2.8.1. Выбор параметров срабатывания КЦТ 114
2.8.2. Определение положения накладок КЦТ ... 115
2.8.3. Пример расчета параметров срабатывания КЦТ 115
2.9. Отстройка от замыкания за ответвлением 116
2.9.1. Выбор параметров срабатывания отстройки от замыкания за ответвлением 116
2.9.2. Определение положения накладок отстройки от замыкания за ответвлением 122
2.9.3. Пример расчета параметров срабатывания отстройки от замыкания за ответвлением 123
2.10. Определение тока точной работы реле сопротивления 128

2.10.1. Выбор параметра срабатывания логики определения тока точной работы реле сопротивления 128
2.10.2. Пример расчета параметра срабатывания логики определения тока точной работы реле сопротивления 129
2.11. Устройство резервирования при отказе выключателя 130
2.11.1. Выбор параметров срабатывания УРОВ 130
2.11.2. Определение положения накладок УРОВ 131
2.11.3. Пример расчета параметров срабатывания УРОВ 132
2.12. Блокировка при неисправности цепей напряжения 133
2.12.1. Выбор параметров срабатывания БНН .. 133
2.12.2. Определение положения накладок и селекторов БНН 139
2.12.3.Пример расчета параметров срабатывания БНН 140
2.13. Блокировка при броске тока намагничивания 145
2.13.1. Выбор параметров срабатывания БТН высокочастотных защит 145
2.13.2. Определение положения накладок БТН высокочастотных защит 145
2.13.3. Выбор параметров срабатывания БТН продольной дифференциальной защиты линии 146
2.13.4. Определение положения накладок БТН продольной дифференциальной защиты линии.. 147
2.13.5. Пример расчета параметров срабатывания БТН высокочастотной защиты ... 148

2.13.6. Пример расчета параметров срабатывания БТН продольной дифференциальной защиты 149
3. ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ В ТЕРМИНАЛЕ 151
3.1. Программный комплекс «TranSet» 151
3.1.1. Назначение 151
3.1.2. Описание файла уставок 151
3.1.3. Изменение параметров срабатывания в файле уставок 152
3.1.4. Загрузка файла уставок в терминал 155
3.2. Заполнение шаблона уставок в программе «Transet» 155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 156

Перечень сокращений

- БК – блокировка при качаниях
- БНН – блокировка при неисправности цепей напряжения
- БТН – блокировка при броске тока намагничивания
- ВЛ – воздушная линия
- ВЧ – высокочастотный
- ДЗЛ – дифференциальная защита линии
- ДФЗ – дифференциально-фазная защита
- ИО – измерительный орган
- КВЛ – кабельно-воздушная линия
- КЗ – короткое замыкание
- КЛ – кабельная линия
- КЦТ – контроль цепей тока
- ЛЭП – линия электропередачи
- НВЧЗ – направленная высокочастотная защита
- ОМ – орган манипуляции
- ОСФ – орган сравнения фаз
- ПП – приемопередатчик
- РНМ – реле направления мощности
- РНМНП – реле направления мощности нулевой последовательности
- РНМОП – реле направления мощности обратной последовательности
- ТН – трансформатор напряжения
- ТТ – трансформатор тока
- УРОВ – устройство резервирования при отказе выключателя
- КСЗ – комплект ступенчатых защит
- ДЗ – дистанционная защита
- МТЗ – максимальная токовая защита
- ТНЗНП – токовая направленная защита нулевой последовательности

1. Общие сведения

1.1. Область применения защит

Согласно ПУЭ, если дистанционная и токовая ступенчатые защиты не удовлетворяют требованию быстродействия, в качестве основных защит одиночных и параллельных линий 110-220 кВ с двусторонним питанием следует предусматривать высокочастотные и продольные дифференциальные защиты [1].

К высокочастотным относятся направленная высокочастотная защита (НВЧЗ) и дифференциально-фазная защита (ДФЗ).

Каждая высокочастотная защита линии состоит из двух и более полукомплектов, устанавливаемых по концам воздушной линии. Устройство полукомплекта защиты для одной стороны ВЛ состоит из терминала защиты (релейная часть) и соответствующей аппаратуры ВЧ-связи (высокочастотная часть), обеспечивающей передачу высокочастотных сигналов (ВЧ-сигналов) на другую сторону защищаемой линии (или другие стороны, если это обусловлено условиями обеспечения селективности) по фазным проводам или по проводящим тросам (рисунок 1.1).

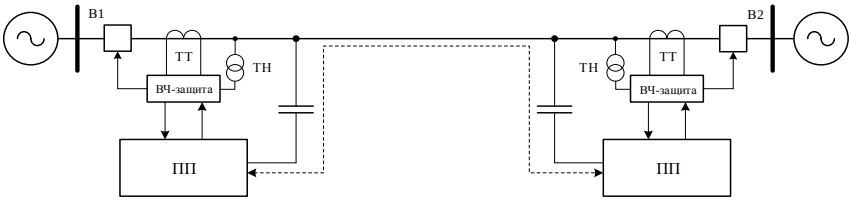

Рисунок 1.1 – Взаимодействие полукомплектов высокочастотной защиты

В состав релейной части входит микропроцессорный терминал «Бреслер-0107.50Х» или «Бреслер-0107.52Х». Высокочастотная часть защиты состоит из приемопередатчика (ПП), аппаратуры, канала (линии электропередачи) связи и соответствующей высоковольтной части. Приемопередатчик

обеспечивает автоматический контроль канала связи.

В продольной дифференциальной защите линии (ДЗЛ) также на каждом конце защищаемой линии устанавливаются полукомплекты защиты «Бреслер-0107.53Х» (рисунок 1.2). Для связи полукомплектов прокладываются волоконно-оптические линии связи, по которым полукомплекты защиты обмениваются пакетами данных, содержащими информацию о фазных токах и ряд необходимых дискретных сигналов.

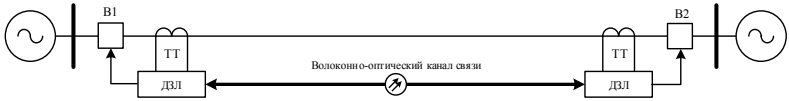

Рисунок 1.2 – Взаимодействие полукомплектов ДЗЛ

Рассматриваемые защиты широко применяются в качестве основных защит линий электропередач (ЛЭП) высокого напряжения. Данные защиты отключают защищаемую линию при всех внутренних КЗ и по принципу действия не реагируют на внешние повреждения. Для ВЧ-защит традиционно используется один канал связи (КС). При применении ДЗЛ рекомендуется использовать два физически разделенных КС.

С ростом городов имеющиеся воздушные линии (ВЛ) частично или полностью заменяют на кабельные линии (КЛ), прокладываемые под землей. Применение ВЧ-защит на кабельных и кабельно-воздушных линиях (КВЛ) усложняется: появляется необходимость проверять параметры измененного канала связи, которым является одна из фаз КЛ или КВЛ, на способность пропускать ВЧ-сигнал с допустимым уровнем затухания. В таких случаях ДЗЛ получает преимущество перед высокочастотными защитами, так как кабельные вставки никак не влияют на способность защиты выявлять и устранять внутренние КЗ.

При установке защит на линии с ответвлениями появляется ряд особенностей. Отходящее от основной ЛЭП ответвление

является частью защищаемой линии. Это значит, что защита должна правильно срабатывать при КЗ на самом ответвлении и при этом не реагировать на повреждения за силовым трансформатором ответвления. В каждой защите предусмотрена логика отстройки от замыкания за ответвлением. В случаях, когда отстроиться от замыкания за трансформатором ответвления невозможно или со стороны ответвления есть подпитка, на этом ответвлении устанавливается дополнительный полукомплект защиты.

1.2. Принципы действия защит

1.2.1. Принцип действия направленной высокочастотной защиты

Направленная высокочастотная защита реагирует на направление (знак) мощности КЗ по концам защищаемой ЛЭП, которое зависит от направления измеряемого тока. При КЗ на защищаемой линии мощности КЗ на обоих концах поврежденного участка имеют одинаковое направление от шин в линию для мощности прямой последовательности, или от места повреждения к шинам для мощности обратной последовательности. В случае внешнего КЗ направления мощности по концам защищаемой ЛЭП различны. Таким образом, можно определить, где возникло повреждение: на защищаемой линии или за ее пределами [2].

Тогда при внутреннем замыкании (рисунок 1.3, а) мощность прямой последовательности на обоих концах линии будет протекать от шин в линию (при этом мощность обратной последовательности по концам линии, наоборот, от линии в шины), и в этом случае оба полукомплекта будут разрешать срабатывание, и защита отключит линию. В случае внешнего повреждения (рисунок 1.3, б) направления мощностей по концам линии различны. Полукомплект А сработает, разрешая действие на отключение, но для полукомплекта Б мощность прямой последовательности направлена к шинам, поэтому он запрещает действие защиты на отключение. Специальные генераторы высокой частоты посылают блокирующий сигнал на другой конец линии, который блокирует действие

противоположного комплекта.

В начальный момент возникновения повреждения срабатывают блокирующие измерительные органы, обеспечивая тем самым ускоренный пуск приемопередатчика, который посылает блокирующий сигнал на противоположный конец линии. Передача блокирующих ВЧ-сигналов осуществляется по защищаемой линии с одного конца на другой посредством токов высокой частоты по каналу, в качестве которого используется сама защищаемая линия.

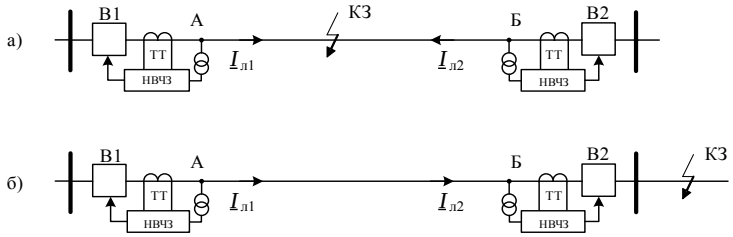

Рисунок 1.3 – Направления токов прямой последовательности при внутреннем (а) и внешнем (б) замыканиях

После срабатывания отключающих ИО, имеющих более грубые уставки по сравнению с блокирующими, блокирующий ВЧ-сигнал снимается тем полукомплектом защиты, для которого мощность обратной последовательности направлена к шинам в случае несимметричных КЗ, либо мощность прямой последовательности направлена в линию при симметричных КЗ. В случае повреждения на защищаемой линии блокирующие ВЧ-сигналы отсутствуют у обоих терминалов, и каждому из полукомплектов разрешается действовать на отключение выключателя. Внешнее КЗ один из терминалов видит как замыкание «за спиной», и останова приемопередатчика на соответствующем конце линии не происходит, и, тем самым, блокируются оба полукомплекта защиты.

1.2.2. Принцип действия дифференциально-фазной защиты

Принцип действия защиты основан на косвенном сравнении фаз токов манипуляции по концам линии. Ток манипуляции представляет собой комбинацию токов прямой и обратной последовательностей в месте измерения:

$$\underline{I}_{\text{м}} = \frac{1}{k_{\text{м}}}\underline{I}_1 + \underline{I}_2 .$$

За положительное направление берется направление тока от шин в линию. При отрицательной полуволне своего тока приемопередатчик посылает импульсы в ВЧ-канал. При внешних замыканиях (рисунок 1.4, а) токи по концам линии направлены в одну сторону, а токи, измеряемые полукомплектами, сдвинуты относительно друг друга почти на 180°. При этом ВЧ-пакеты образуют на входах ВЧ-приемников практически сплошной сигнал, так как промежутки импульсов одного передатчика заполняются серией импульсов второго комплекта. При внутренних замыканиях (рисунок 1.4, б) токи по концам линии направлены от шин в линию, передатчики начинают работать одновременно, и ВЧ-пакеты по концам линии практически совпадают по фазе, так как импульсы с обоих передатчиков накладываются друг на друга. При этом паузы в сигналах на входах ВЧ-приемников могут достигать половины периода промышленной частоты. Длительность паузы определяется разностью фаз токов манипуляции по концам линии, и, если длина паузы превышает уставку, появляется сигнал, разрешающий срабатывание защиты.

Таким образом, информация о фазе тока передается с одного конца защищаемой линии на другой посредством ВЧ-сигналов по каналу связи, в качестве которого используется сама защищаемая линия. ВЧ-передатчик генерирует токи высокой частоты пакетами, длительность которых приблизительно равна интервалам перехода мгновенного тока манипуляции через ноль.

В начальный момент возникновения повреждения срабатывают блокирующие измерительные органы, обеспечивая

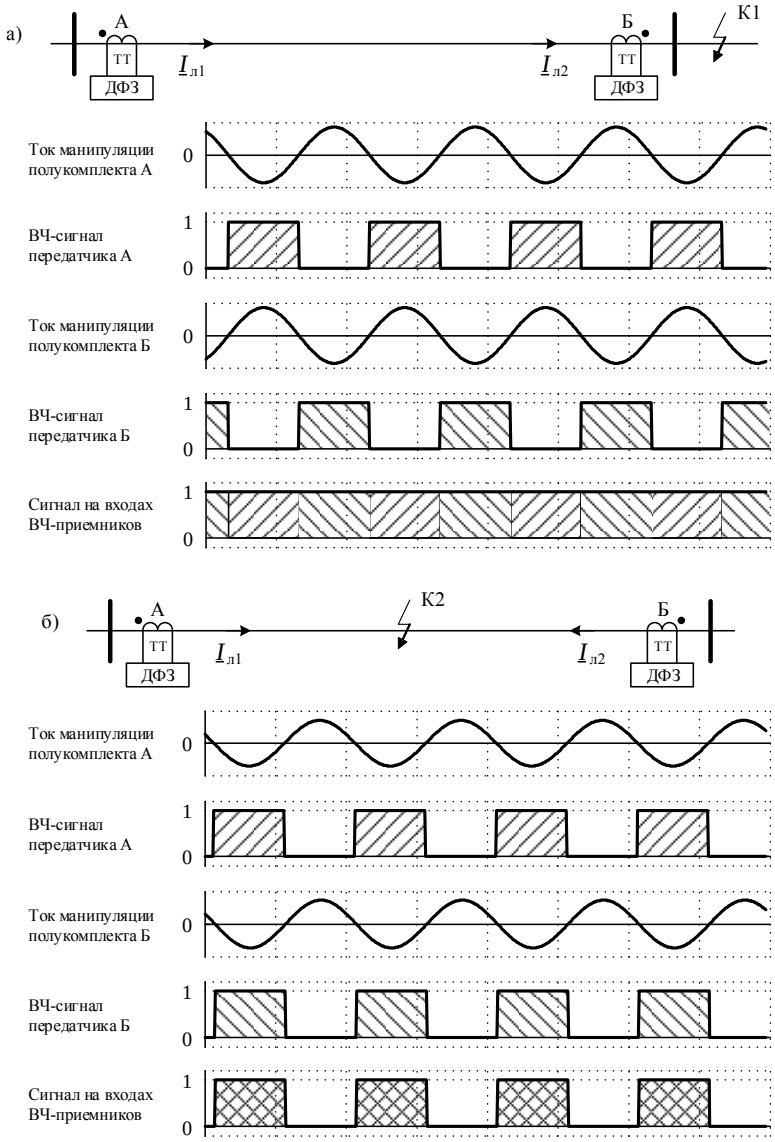

Рисунок 1.4 – Принцип действия ДФЗ

тем самым ускоренный пуск приемопередатчика, который посылает информацию о фазе тока манипуляции на противоположный конец линии. Далее срабатывают отключающие ИО, имеющие более

грубые уставки по сравнению с блокирующими, и подготавливают цепь отключения линии. Одновременно с этим работает орган сравнения фаз, который по длительности паузы в сигнале ВЧ-приемника определяет разность фаз токов манипуляции по концам ЛЭП. При превышении разности фаз уставки ОСФ и готовности цепи отключения принимается решение об отключении линии.

1.2.3. Принцип действия продольной дифференциальной защиты

Продольная дифференциальная защита линии основана на сравнении токов в начале и конце защищаемого объекта путем вычисления дифференциального тока. Защита срабатывает, когда вычисленный ток превышает порог срабатывания.

Дифференциальный ток, в свою очередь, находится как геометрическая сумма векторов токов по концам защищаемой линии:

$$\underline{I}_{диф} = \underline{I}_{л1} + \underline{I}_{л2} .$$

За положительное направление берется направление тока от шин в линию.

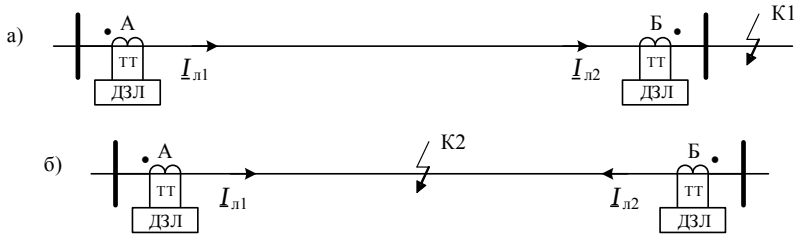

Рисунок 1.5 – К пояснению принципа действия ДЗЛ
а) – внешнее замыкание; б) – замыкание на защищаемой линии

В нормальном режиме и при внешнем замыкании (рисунок 1.5, а) векторы токов $\underline{I}_{л1}$ и $\underline{I}_{л2}$ противонаправлены, и дифференциальный ток равен нулю (без учета токов небаланса). При КЗ на защищаемой линии (рисунок 1.5, б) токи $\underline{I}_{л1}$ и $\underline{I}_{л2}$ направлены

к месту КЗ, и дифференциальный ток становится практически равным сумме их действующих значений:

$$I_{диф} \approx I_{л1} + I_{л2}.$$

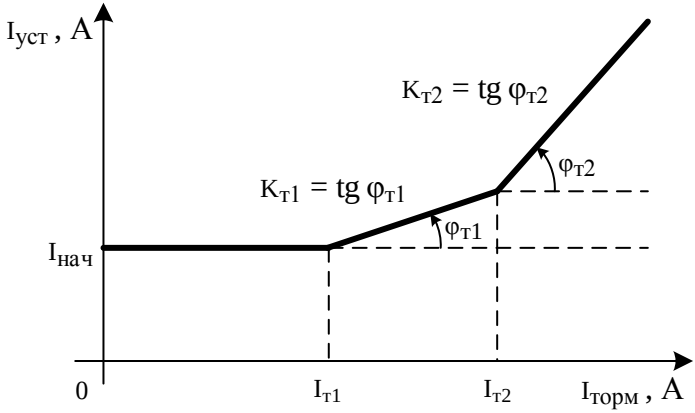

Рисунок 1.6 – Тормозная характеристика с тремя участками

Для отстройки от токов небаланса при внешних повреждениях защита выполняется с торможением. Ток срабатывания такой защиты возрастает с увеличением тока внешнего короткого замыкания. Тормозная характеристика срабатывания измерительного органа по дифференциальному току с тремя участками представлена (рисунок 1.6).

За тормозной ток берется максимальный из токов по концам защищаемой линии:

$$I_{торм} = \max\left(I_{л1}, I_{л2}\right).$$

Порог срабатывания $I^{Т}_{уст}$ в зависимости от уставок будет определяться следующим образом:

$$I^{Т}_{уст} = \begin{cases} I_{нач}, \text{ если } I_{торм} < I_{т1}; \\ I_{нач} + K_{т1}\left(I_{торм} - I_{т1}\right), \text{ если } I_{т1} \le I_{торм} < I_{т2}; \\ I_{нач} + K_{т1}\left(I_{т2} - I_{т1}\right) + K_{т2}\left(I_{торм} - I_{т2}\right), \text{ если } I_{торм} \ge I_{т2}, \end{cases}$$

где $I_{нач}$ – порог срабатывания без торможения (уставка);

$K_{т1}$ и $K_{т2}$ – коэффициенты торможения второго и третьего участков соответственно (уставки);

$I_{т1}$ и $I_{т2}$ – границы участков тормозной характеристики (уставки).

В случае линии с трехсторонним питанием дифференциальный и тормозной токи находятся с учетом всех трех токов по концам защищаемой линии:

$$\underline{I}_{диф} = \underline{I}_{л1} + \underline{I}_{л2} + \underline{I}_{л3};$$

$$I_{торм} = \max\left(I_{л1}, I_{л2}, I_{л3}\right).$$

Обмен пакетами данных осуществляется по волоконно-оптической линии связи. Связь между полукомплектами может осуществляться по двум независимым оптическим каналам связи, подключаемым к терминалу.

1.3. Описание устройств защиты БРЕСЛЕР

Вышеописанные защиты реализованы на базах следующих устройств производства «НПП Бреслер».

Устройство **«Бреслер-0117.500»** является шкафом направленной высокочастотной защиты линии. Оно предназначено для обеспечения основной защиты с абсолютной селективностью линий электропередачи напряжением 110-220 кВ с питанием с двух или более сторон и содержит устройство «Бреслер-0107.500» [3].

Устройство **«Бреслер-0107.500»** является терминалом направленной высокочастотной защиты линии, в котором реализованы следующие функции [4]:

- направленная высокочастотная защита линии (НВЧЗ);
- логика отстройки от замыкания за ответвлением;
- логика устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ);
- логика блокировки при неисправности цепей напряжения (БНН);
- логика блокировки при броске тока намагничивания (БТН).

Устройство **«Бреслер-0117.502»** является шкафом направленной высокочастотной защиты линии и ступенчатых защит присоединения. Оно предназначено для обеспечения основной защиты с абсолютной селективностью линий электропередачи напряжением 110-220 кВ с питанием с двух или более сторон и содержит устройство «Бреслер-0107.502» [5].

Устройство **«Бреслер-0107.502»** является терминалом направленной высокочастотной защиты линии и ступенчатых защит присоединения, в котором дополнительно к функциям устройства «Бреслер-0107.500» реализованы функции комплекта ступенчатых защит (КСЗ) [6]:

- дистанционная защита (ДЗ);
- токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП);
- максимальная токовая защита (МТЗ).

Устройство **«Бреслер-0117.520»** является шкафом дифференциально-фазной защиты линии. Оно предназначено для обеспечения основной защиты с абсолютной селективностью линий электропередачи напряжением 110-220 кВ с питанием с двух или более сторон и содержит устройство «Бреслер-0107.520» [7].

Устройство **«Бреслер-0107.520»** является терминалом дифференциально-фазной защиты линии, в котором реализованы следующие функции [8]:

- дифференциально-фазная защита линии (ДФЗ);
- логика отстройки от замыкания за ответвлением;
- логика устройства резервирования отказа выключателя;
- логика блокировки при неисправности цепей напряжения;
- логика блокировки при броске тока намагничивания.

Устройство **«Бреслер-0117.522»** является шкафом дифференциально-фазной защиты линии и ступенчатых защит присоединения. Оно предназначено для обеспечения основной защиты с абсолютной селективностью линий электропередачи

напряжением 110-220 кВ с питанием с двух или более сторон и содержит устройство «Бреслер-0107.522» [9].

Устройство **«Бреслер-0107.522»** является терминалом дифференциально-фазной защиты линии и ступенчатых защит присоединения, в котором дополнительно к функциям устройства «Бреслер-0107.520» реализованы функции комплекта ступенчатых защит [10]:

- дистанционная защита;
- токовая направленная защита нулевой последовательности;
- максимальная токовая защита.

Устройство **«Бреслер-0117.530»** является шкафом продольной дифференциальной токовой защиты линии. Оно предназначено для обеспечения основной защиты с абсолютной селективностью линий электропередачи напряжением 110-220 кВ и содержит устройство «Бреслер-0107.530» [11].

Устройство **«Бреслер-0107.530»** является терминалом продольной дифференциальной токовой защиты линии, в котором реализованы следующие функции [12]:

- продольная дифференциальная защита линии (ДЗЛ);
- логика отстройки от замыкания за ответвлением;
- логика устройства резервирования отказа выключателя;
- логика блокировки при неисправности цепей напряжения;
- логика блокировки при броске тока намагничивания;
- логика контроля цепей тока (КЦТ).

Устройство **«Бреслер-0117.532»** является шкафом продольной дифференциальной токовой защиты линии и ступенчатых защит присоединения. Оно предназначено для обеспечения основной защиты с абсолютной селективностью линий электропередачи напряжением 110-220 кВ и содержит устройство «Бреслер-0107.532» [13].

Устройство **«Бреслер-0107.532»** является терминалом продольной дифференциальной токовой защиты линии и ступенчатых защит присоединения, в котором дополнительно к

функциям устройства «Бреслер-0107.530» реализованы функции комплекта ступенчатых защит [14]:

- дистанционная защита;
- токовая направленная защита нулевой последовательности;
- максимальная токовая защита.

При наличии ответвлений на защищаемой линии для обеспечения селективности необходимо отстраиваться от повреждений за трансформатором ответвления. Логика отстройки от замыканий за трансформатором отпайки вводится в работу с помощью соответствующей накладки. При этом если отпайка является достаточно мощной, что выполнить отстройку с помощью данной логики невозможно, то для обеспечения селективной работы на отпайке устанавливается дополнительный полукомплект защиты.

УРОВ выполняет функцию ближнего резервирования. Если на защищаемой линии происходит короткое замыкание и срабатывание ее релейной защиты, но при этом выключатель по каким-либо причинам не отключает поврежденный участок, то «УРОВ на себя» через определенную выдержку времени выдает повторную команду на отключение данного выключателя, а «УРОВ на смежный выключатель» через другую соответствующую выдержку времени подает сигнал на отключение смежных выключателей, через которые идет подпитка точки КЗ. УРОВ вводится в работу с помощью соответствующих накладок.

Во вторичных цепях трансформаторов напряжения (ТН) могут возникать обрывы и замыкания, что может привести к неправильной работе релейной защиты (РЗ). Для предупреждения ложных действий РЗ в логику защиты с помощью соответствующих накладок вводится логика блокировки при неисправностях цепей напряжения.

Во вторичных цепях трансформаторов тока (ТТ) также могут возникать обрывы и замыкания, что может привести к неправильной работе релейной защиты. Для предупреждения ложных действий РЗ

в логику защиты с помощью соответствующей накладки вводится контроль исправности токовых цепей.

На линиях может наблюдаться бросок тока намагничивания, возникающий в результате включения силовых трансформаторов под напряжение, возникновения внешних КЗ или восстановления уровня напряжения после внешних коротких замыканий. Для предотвращения излишнего срабатывания защиты в таком режиме в логику работы РЗ с помощью соответствующей накладки вводится блокировка при броске тока намагничивания.

2. Выбор параметров срабатывания защит

2.1. Общие сведения

В приведенных далее расчетных выражениях приняты следующие обозначения:

- $U_{\text{ном}}$ – номинальное вторичное напряжение ТН, В;
- $I_{\text{ном}}$ – номинальный вторичный ток ТТ, А.
- $I_{\text{раб макс}}$ – максимальный рабочий ток, кА;
- L – длина линии, км.
- $R_{1\,\text{уд}}$ – удельное активное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км;
- $X_{1\,\text{уд}}$ – удельное реактивное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км;
- $R_{0\,\text{уд}}$ – удельное активное сопротивление защищаемой линии по нулевой последовательности, Ом/км;
- $X_{0\,\text{уд}}$ – удельное реактивное сопротивление защищаемой линии по нулевой последовательности, Ом/км.
- $k_{\text{ТТ}}$ – коэффициент трансформации ТТ, о.е.
- $k_{\text{ТН}}$ – коэффициент трансформации ТН, о.е.

Выбор порога срабатывания измерительного органа и его задание в устройстве можно осуществлять двумя способами:

- в первичных величинах (кА, кВ, Ом);
- в относительных единицах (о.е.).

В тех случаях, когда порог срабатывания задается в долях от номинальной величины (первичной или вторичной – не важно), расчет рекомендуется производить в относительных единицах, и

тогда параметр срабатывания будет обозначаться следующим образом:

$$I_{\text{уст(н)}},\ U_{\text{уст(н)}}$$

Перевод рассчитанных величин из первичных величин во вторичные может быть осуществлен следующим образом:

$$I_{\text{уст2}} = \frac{I_{\text{уст}} \cdot 1000}{k_{\text{ТТ}}};$$

$$U_{\text{уст2}} = \frac{U_{\text{уст}} \cdot 1000}{k_{\text{ТН}}};$$

$$Z_{\text{уст2}} = Z_{\text{уст}} \cdot \frac{k_{\text{ТТ}}}{k_{\text{ТН}}},$$

где $I_{\text{уст}}$, $U_{\text{уст}}$, $Z_{\text{уст}}$ – пороги срабатывания ИО в первичных величинах,

$I_{\text{уст2}}$, $U_{\text{уст2}}$, $Z_{\text{уст2}}$ – пороги срабатывания ИО во вторичных величинах.

Перевод рассчитанных величин из первичных величин в относительные единицы может быть осуществлен следующим образом:

$$I_{\text{уст(н)}} = \frac{I_{\text{уст}} \cdot 1000}{I_{\text{ном}} \cdot k_{\text{ТТ}}},$$

$$U_{\text{уст(н)}} = \frac{U_{\text{уст}} \cdot 1000}{U_{\text{ном}} \cdot k_{\text{ТН}}}.$$

где $I_{\text{уст(н)}}$, $U_{\text{уст(н)}}$ – пороги срабатывания, приведенные к номинальным значениям, о.е.

Перевод рассчитанных величин из относительных единиц в первичные величины может быть осуществлен следующим образом:

$$I_{\text{уст1}} = \frac{I_{\text{уст(н)}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot k_{\text{ТТ}}}{1000},$$

$$U_{\text{уст1}} = \frac{U_{\text{уст(н)}} \cdot U_{\text{ном}} \cdot k_{\text{ТН}}}{1000}.$$

Перевод рассчитанных величин из относительных единиц во вторичные величины может быть осуществлен следующим образом:

$$I_{\text{уст2}} = I_{\text{уст(н)}} \cdot I_{\text{ном}},$$

$$U_{\text{уст2}} = U_{\text{уст(н)}} \cdot U_{\text{ном}}.$$

Все значения, полученные в ходе расчетов, округляются до сотых долей. Все измерительные органы по нулевой последовательности реагируют на утроенное значение измеряемой величины.

2.2. Направленная высокочастотная защита

2.2.1. Выбор параметров срабатывания НВЧЗ

Пороги срабатывания всех измерительных органов НВЧЗ, за исключением реле сопротивления, должны выбираться одинаковыми для обоих полукомплектов.

2.2.1.1. Измерительный орган по напряжению обратной последовательности

2.2.1.1.1. Параметр срабатывания блокирующего ИО по напряжению обратной последовательности выбирают, исходя из отстройки от напряжения небаланса обратной последовательности и несимметрии нагрузочного режима, с учетом коэффициента отстройки:

$$U_{2\,\text{бл(н)}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot \left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right),$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{в}} = 0{,}95$ – коэффициент возврата, о.е.;

$k_{2\,\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, о.е.;

$k_{2\,\text{нс}} = 0 \div 0{,}1$ – коэффициент несимметрии (при отсутствии источников несимметрии в сети принимается равным нулю), о.е.

2.2.1.1.2. Параметр срабатывания отключающего ИО по напряжению обратной последовательности выбирают, исходя из отстройки от блокирующего:

$$U_{2\,\text{откл(н)}} = k_{\text{отс}} \cdot U_{2\,\text{бл(н)}},$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.

2.2.1.1.3. Чувствительность отключающего ИО по напряжению обратной последовательности определяется коэффициентом чувствительности:

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2\,\text{мин}}}{U_{2\,\text{откл(н)}} \cdot \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}},$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети, кВ;

$U_{2\,\text{мин}}$ – минимальное напряжение обратной последовательности, контролируемое измерительным органом, при земляном КЗ в конце зоны действия, кВ.

Если $k_{\text{ч}} \geq 2$, то на том конце линии, где коэффициент ниже, необходимо загрубить его до $k_{\text{ч}} = 2$ и получить новое значение порога срабатывания:

$$U_{2\,\text{откл}} = \frac{U_{2\,\text{мин}}}{2}.$$

По нему необходимо уточнить $U_{2\,\text{бл}}$:

$$U_{2\,\text{бл}} = \frac{U_{2\,\text{откл}}}{k_{\text{отс}}}.$$

Если требуемая чувствительность рассматриваемого ИО не обеспечивается, может быть введена компенсация напряжения

обратной последовательности. При этом к пусковому органу будет подводится компенсированное напряжение:

$$U_{2\,\text{комп}} = \left|\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \cdot Z_{\text{комп}}\right| ,$$

где U_2 – напряжение обратной последовательности, кВ;

I_2 – ток обратной последовательности, кА;

$Z_{\text{комп}}$ – полное сопротивление компенсации, Ом.

Сопротивление компенсации рекомендуется брать равным половине сопротивления защищаемой линии:

$$Z_{\text{комп}} = 0{,}5 \cdot Z_{1\,\text{л}} ,$$

где $Z_{1\,\text{л}}$ – полное сопротивление защищаемой линии прямой последовательности, Ом.

Активное и индуктивное сопротивления компенсации вычисляются следующим образом:

$$R_{\text{комп}} = -Z_{\text{комп}} \cdot \cos\varphi_{\text{мч}} ;$$

$$X_{\text{комп}} = -Z_{\text{комп}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} ,$$

где $\varphi_{\text{мч}} = \text{arctg}\dfrac{X_{1\,\text{уд}}}{R_{1\,\text{уд}}}$ – угол максимальной чувствительности, град;

$R_{1\,\text{уд}}$ и $X_{1\,\text{уд}}$ – соответственно активное и реактивное удельные сопротивления линии прямой последовательности, Ом/км.

Если и после этого не будет обеспечена требуемая чувствительность, то при несимметричных замыканиях пуск приемопередатчика и отключение линии будет осуществляться от ИО по току обратной последовательности с торможением от тока прямой.

2.2.1.2. Измерительный орган по току обратной последовательности

2.2.1.2.1. Порог срабатывания блокирующего ИО по току обратной последовательности выбирают, исходя из отстройки от тока небаланса обратной последовательности и несимметрии нагрузочного режима, с учетом коэффициента отстройки:

$$I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot \left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right),$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{в}} = 0{,}95$ – коэффициент возврата, о.е.;

$k_{2\,\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, о.е.;

$k_{2\,\text{нс}} = 0 \div 0{,}1$ – коэффициент несимметрии (при отсутствии источников несимметрии в сети принимается равным нулю), о.е.

2.2.1.2.2. Порог срабатывания отключающего ИО по току обратной последовательности выбирают, исходя из отстройки от блокирующего ИО:

$$I_{2\,\text{откл}(\text{н})} = k_{\text{отс}} \cdot I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})},$$

где $k_{\text{отс}} = 2$ – коэффициент отстройки, о.е.

2.2.1.2.3. Чувствительность отключающего ИО по току обратной последовательности определяется коэффициентом чувствительности:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}},$$

где $I_{2\,\text{мин}}$ – минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кА.

$I_{1\,\text{ном}}$ – номинальный первичный ток ТТ, кА.

Если $k_{ч} \geq 2$, то на том конце линии, где коэффициент ниже, необходимо загрубить его до $k_{ч} = 2$ и получить новое значение порога срабатывания:

$$I_{2\,откл} = \frac{I_{2\,мин}}{2}.$$

По нему необходимо уточнить $I_{2\,бл}$:

$$I_{2\,бл} = \frac{I_{2\,откл}}{k_{отс}}.$$

2.2.1.3. Измерительный орган по приращению тока прямой последовательности

2.2.1.3.1. Порог срабатывания отключающего органа отстраивается от минимального приращения тока прямой последовательности при трехфазном коротком замыкании с учетом требуемого коэффициента чувствительности. Для упрощения расчетов принимается, что в нагрузочном режиме ток отсутствовал и приращение определяется только током КЗ:

$$\Delta I_{1\,откл} = \frac{I_{1\,мин}}{k_{отс} \cdot k_{ч}},$$

где $I_{1\,мин}$ – минимальный ток в месте установки полукомплекта при трехфазном КЗ в конце защищаемой линии, кА;

$k_{отс} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерения и погрешности расчетов, о.е.;

$k_{ч} = 1{,}5$ – коэффициент чувствительности, о.е.

2.2.1.3.2. Порог срабатывания блокирующего органа отстраивается от установившегося значения приращения в режиме качаний или асинхронного хода:

$$\Delta I_{1\,бл} = k_{отс} \cdot \Delta I_{кач\,уст},$$

где $k_{отс} = 2 \div 4$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$\Delta I_{\text{кач уст}}$ – максимальное установившееся приращение тока прямой последовательности при качаниях, кА.

Максимальное установившееся приращение тока при качаниях определяется следующим образом:

$$\Delta I_{\text{кач уст}} = 2 \cdot I_{\text{кач макс}} \cdot \sin^2\left(\frac{\omega_s \cdot T}{4}\right),$$

где $I_{\text{кач макс}} = \dfrac{2E}{Z_\Sigma}$ – максимальный ток качаний, кА;

$E = 1{,}05 \cdot U_{1\,\text{ном}}$ – максимальные ЭДС систем по концам ЛЭП, кВ;

$U_{1\,\text{ном}}$ – номинальное напряжение первичной обмотки ТН, кВ;

$Z_\Sigma = \left|\underline{Z}_{\text{с}1} + \underline{Z}_{\text{л}} + \underline{Z}_{\text{с}2}\right|$ – минимальное суммарное сопротивление между системами, Ом;

$\underline{Z}_{\text{с}\,i}$ – минимальное полное сопротивление i-й системы, Ом;

$\underline{Z}_{\text{л}}$ – полное сопротивление защищаемой линии, Ом;

$\omega_{\text{s}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{s}}$ – угловая частота скольжения, рад/с;

f_{s} – частота скольжения, Гц;

T – период промышленной частоты, с.

Расчет рекомендуется проводить при частоте скольжения, равной 3 Гц.

2.2.1.4. Измерительный орган по приращению тока обратной последовательности

2.2.1.4.1. Порог срабатывания отключающего ИО отстраивается от минимального тока обратной последовательности с учетом требуемого коэффициента чувствительности. Для упрощения расчетов принимается, что в нагрузочном режиме ток обратной последовательности отсутствовал и приращение определяется только током КЗ:

$$\Delta I_{2\,\text{откл}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{ч}}},$$

где $I_{2\,\text{мин}}$ – минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кА.

$k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерения и погрешности расчетов, о.е.;

$k_{\text{ч}} = 1{,}5$ – коэффициент чувствительности, о.е.

2.2.1.4.2. Порог срабатывания блокирующего ИО по приращению тока обратной последовательности рекомендуется отстраивать от максимального небаланса в режиме качаний или асинхронного хода:

$$\Delta I_{2\,\text{бл}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot k_{2\,\text{нб}} \cdot I_{\text{кач}\,\text{макс}},$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерения и погрешности расчетов, о.е.;

$k_{\text{в}} = 0{,}95$ – коэффициент возврата, о.е.;

$k_{2\,\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, о.е.;

$I_{\text{кач}\,\text{макс}}$ – максимальный ток качаний, кА.

2.2.1.5. Измерительный орган по току обратной последовательности с торможением

2.2.1.5.1. Начальный порог срабатывания блокирующего измерительного органа берется равным порогу срабатывания блокирующего ИО по току обратной последовательности:

$$I_{2\,\text{нач}\,\text{бл}} = I_{2\,\text{бл}},$$

где $I_{2\,\text{бл}}$ – порог срабатывания блокирующего ИО по току обратной последовательности, кА.

2.2.1.5.2. Начальный порог срабатывания отключающего измерительного органа берется равным порогу срабатывания отключающего ИО по току обратной последовательности:

$$I_{2\,\text{нач откл}} = I_{2\,\text{откл}},$$

где $I_{2\,\text{откл}}$ – порог срабатывания отключающего ИО по току обратной последовательности, кА.

2.2.1.5.3. Границу наклонной части характеристики срабатывания как блокирующего, так и отключающего ИО рекомендуется брать равной номинальному первичному току ТТ:

$$I_{1\,\text{т бл}} = I_{1\,\text{т откл}} = I_{1\,\text{ном}},$$

где $I_{1\,\text{ном}}$ – номинальный первичный ток ТТ, кА.

2.2.1.5.4. Коэффициент торможения блокирующего ИО определяется по условию отстройки от тока небаланса при качаниях:

$$k_{\text{т бл}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right) \cdot I_{\text{кач макс}} - I_{2\,\text{нач бл}}}{I_{\text{кач макс}} - I_{1\,\text{ном}}},$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{2\,\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, о.е.;

$k_{2\,\text{нс}} = 0 \div 0{,}1$ – коэффициент несимметрии (при отсутствии источников несимметрии в сети принимается равным нулю), о.е.;

$I_{\text{кач макс}}$ – максимальный ток качаний, кА;

$I_{1\,\text{ном}}$ – номинальный первичный ток ТТ, кА.

2.2.1.5.5. Выбор коэффициента торможения отключающего ИО

Для обеспечения правильного действия защиты в режиме КЗ на шинах противоположной системы рассматриваемый измерительный орган должен согласовываться с блокирующим ИО по напряжению обратной последовательности: при срабатывании

отключающего органа по току обратной последовательности с торможением от тока прямой последовательности противоположный полукомплект должен гарантированно обеспечить пуск своего приемопередатчика. Это означает, что порог срабатывания в рабочей точке характеристики торможения, соответствующей замыканию в конце защищаемой линии, должен вычисляться следующим образом:

$$I_{2\,\text{уст}}^{\text{Т}} = k_{\text{отс}} \cdot \frac{U_{2\,\text{бл}}}{\dfrac{Z_{\text{с}}}{k_{\text{ток}}} + Z_{\text{л}}},$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}7 \div 2$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$U_{2\,\text{бл}}$ – порог срабатывания блокирующего ИО по напряжению обратной последовательности противоположного полукомплекта, кВ;

$Z_{\text{с}}$ – полное сопротивление прямой последовательности системы, примыкающей к месту установки рассматриваемого полукомплекта;

$Z_{\text{л}}$ – полное сопротивление защищаемой линии, Ом;

$k_{\text{ток}}$ – коэффициент токораспределения, равный отношению тока обратной последовательности в месте установки рассматриваемого полукомплекта к току обратной последовательности в сопротивлении $Z_{\text{с}}$ при коротком замыкании на противоположном конце линии. Принимается для режима, соответствующего максимальному значению коэффициента.

При наличии обходной связи порог срабатывания определяется по выражению:

$$I_{2\,\text{уст}}^{\text{Т}} = k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{р}} \cdot \frac{U_{2\,\text{бл}}}{Z_{\text{л}}},$$

где $k_{\text{р}}$ – коэффициент несимметричного режима, учитывающий возможность возникновения кратковременного разрыва (например, вследствие коммутации выключателей с пофазными приводами) в

одной или двух фазах на обходной связи (параллельной линии), непосредственно шунтирующей рассматриваемую линию. Принимается равным 2, исходя из предельного режима, когда абсолютные значения напряжения обратной последовательности по концам линии равны $U_{2\,бл}$.

Коэффициент торможения отключающего ИО будет вычисляться следующим образом:

$$k_{т\,откл} = \frac{I^{Т}_{2\,уст} - I_{2\,нач\,откл}}{I_{1\,торм} - I_{1\,ном}},$$

где $I_{1\,торм}$ – тормозной ток, равный току прямой последовательности в месте установки полукомплекта в рассматриваемом режиме, кА. В качестве расчетного режима следует рассматривать двухфазное КЗ на землю в конце защищаемой линии.

2.2.1.5.6. Чувствительность измерительного органа проверяется при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии и определяется соответствующим коэффициентом:

$$k_{ч} = \frac{I_2^{(1,1)}}{I^{Т}_{2\,уст}},$$

где $I_2^{(1,1)}$ – ток обратной последовательностей в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА.

Коэффициент чувствительности должен быть не менее 1,5.

2.2.1.6. Отключающее реле сопротивления

2.2.1.6.1. Угол максимальной чувствительности рассчитывается по формуле:

$$\varphi_{мч} = \mathrm{arctg}\frac{X_{1\,уд}}{R_{1\,уд}},$$

где $R_{1\,уд}$ и $X_{1\,уд}$ – соответственно активное и реактивное удельные

сопротивления линии прямой последовательности, Ом/км.

2.2.1.6.2. Расчетное сопротивление срабатывания отключающего реле отстраивается от минимального сопротивления в месте установки полукомплекта:

$$Z_{\text{откл}} = \frac{Z_{\text{раб мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}} \cdot \cos(\varphi_{\text{мч}} - \varphi_{\text{нг}})},$$

где $Z_{\text{раб мин}} = \dfrac{U_{\text{раб мин}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб макс}}}$ – минимальное сопротивление в месте установки защиты в максимальном нагрузочном режиме, Ом;

$U_{\text{раб мин}} = (0{,}9 \div 0{,}95) \cdot U_{\text{ном}}$ – минимальное линейное напряжение в месте установки защиты в максимальном нагрузочном режиме, кВ;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети, кВ;

$k_{\text{отс}} = 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{в}} = 1{,}05$ – коэффициент возврата, о.е.;

$\varphi_{\text{нг}}$ – максимальное значение угла полного сопротивления нагрузки, которое, исходя из $\cos\varphi_{\text{нг}}$, обычно принимают равным 30÷45°.

Реактивное сопротивление срабатывания определяется следующим образом:

$$X_{\text{откл}} = Z_{\text{откл}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}}.$$

2.2.1.6.3. Активное сопротивление срабатывания определяется, исходя из отстройки от минимального сопротивления нагрузки линии:

$$R_{\text{откл}} = \frac{1}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot Z_{\text{раб мин}} \cdot \left(\cos\varphi_{\text{нг}} - \frac{\sin\varphi_{\text{нг}}}{tg\,\varphi_{\text{мч}}} \right),$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{в}} = 1{,}05$ – коэффициент возврата, о.е.

2.2.1.6.4. Чувствительность по реактивному сопротивлению срабатывания должна удовлетворять условию:

$$X_{\text{чувст}} \le X_{\text{откл}},$$

где $X_{\text{чувст}}$ – максимальное реактивное сопротивление, которое должна чувствовать защита.

$X_{\text{чувст}}$ выбирается максимальным из двух значений, полученных по следующим условиям:

1) обеспечение чувствительности при КЗ на шинах подстанции ответвления (при наличии на линии ответвлений):

$$X_{\text{чувст}} = 1{,}5 \cdot Z_{\text{отвКЗ}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}},$$

где $Z_{\text{отвКЗ}}$ – максимальный замер сопротивления при трехфазном КЗ на шинах подстанции ответвления, Ом. Выбирается максимальным из возможных значений, рассчитанных для каждого i-го ответвления по формуле:

$$Z_{\text{отвКЗ}i} = \frac{U_{\text{остотв}i}}{I_{1\text{отв}i}},$$

где $U_{\text{остотв}i}$ – остаточное напряжение при трехфазном КЗ на шинах подстанции i-го ответвления, кВ;

$I_{1\text{отв}i}$ – ток прямой последовательности при трехфазном КЗ на шинах подстанции i-го ответвления, кА.

2) охват характеристикой всей линии:

$$X_{\text{чувст}} = k_{\text{удл}} \cdot X_{1\text{уд}} \cdot L,$$

где L – длина линии, км;

$k_{\text{удл}}$ – коэффициент удлинения, о.е. Берется равным 1,5, если $L \ge 150$, и 2, если $L < 150$.

Если для какого-либо ответвления чувствительность не обеспечивается, т.е. от замыканий за ним отстроиться не удается, на этом ответвлении должен устанавливаться дополнительный полукомплект защиты.

2.2.1.6.5. Угловые параметры характеристики срабатывания:

Угол φ_2 рекомендуется брать равным 30°.

Угол φ_3 рекомендуется брать равным 120°.

Угол φ_4 рекомендуется брать равным 5°.

2.2.1.7. Блокирующее реле сопротивления

2.2.1.7.1. Реактивное сопротивление срабатывания блокирующего реле рассчитывается по условию согласования с величиной $X_{\text{откл}}$ отключающего реле сопротивления противоположного конца линии:

$$X_{\text{бл}} = k_{\text{отс}} \cdot \left(X_{\text{откл}} - X_{1\,\text{л}}\right),$$

где $k_{\text{отс}} = 2$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$X_{\text{откл}}$ – максимальное из реактивных сопротивлений срабатывания противоположных полукомплектов, Ом;

$X_{1\,\text{л}}$ – реактивное сопротивление защищаемой линии прямой последовательности, Ом.

2.2.1.7.2. Активная часть блокирующего реле сопротивления определяется по выражению:

$$R_{\text{бл}} = 1{,}05 \cdot R_{\text{откл}}.$$

2.2.1.7.3. Угловые характеристики блокирующего реле сопротивления – углы $\varphi_{\text{мч}}$ и φ_4 – берутся равными аналогичным параметрам отключающего РС.

2.2.1.7.4. Коэффициент смещения характеристики срабатывания в первый квадрант рекомендуется брать равным 0,1 о.е.

2.2.1.7.5. Особенности параметрирования характеристики срабатывания блокирующего реле сопротивления:

В устройствах БРЕСЛЕР характеристика ненаправленного реле сопротивления задается так, как показано на рисунке 2.1.

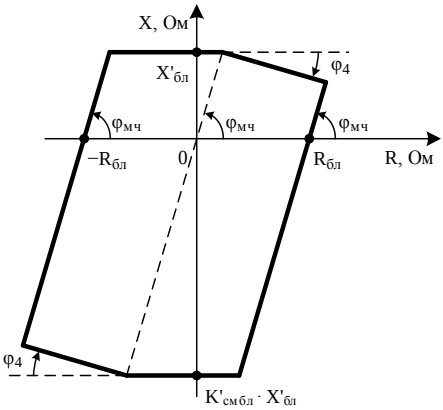

Рисунок 2.1 – Характеристика срабатывания блокирующего реле сопротивления, задаваемая в устройствах БРЕСЛЕР

Параметр срабатывания $X'_{\text{бл}}$ и коэффициент смещения $K'_{\text{см бл}}$ будут вычисляться следующим образом:

$$X'_{\text{бл}} = K_{\text{см бл}} \cdot X_{\text{бл}};$$

$$K'_{\text{см бл}} = -\frac{1}{K_{\text{см бл}}},$$

где $K_{\text{см бл}}$ – коэффициент смещения характеристики срабатывания блокирующего реле сопротивления в первый квадрант, о.е.

2.2.1.8. Реле направления мощности обратной последовательности

2.2.1.8.1. Параметр срабатывания по току равен параметру срабатывания блокирующего ИО по току обратной последовательности:

$$I_{\text{М2}} = I_{2\,\text{бл}},$$

где $I_{2\,бл}$ – параметр срабатывания блокирующего ИО по току обратной последовательности, кА.

2.2.1.8.2. Угол максимальной чувствительности реле вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{мч\,2} = \mathrm{arctg}\frac{X_{1\,уд}}{R_{1\,уд}} + 180^{\circ},$$

где $R_{1\,уд}$ и $X_{1\,уд}$ – соответственно активное и реактивное удельные сопротивления линии прямой последовательности, Ом/км.

2.2.1.8.3. Значение полного сопротивления смещения $Z_{2\,см}$

Значение напряжения, используемого РНМ, должно обеспечивать необходимую чувствительность и надежность срабатывания при замыкании в зоне действия.

Смещение вводится в том случае, если подводимое к РНМ напряжение не обеспечивает необходимую чувствительность и надежность срабатывания при замыканиях в зоне действия полукомплекта:

$$\frac{U_{2\,мин}}{U_{М2}} < k_{ч},$$

где $U_{2\,мин}$ – минимальное напряжение обратной последовательности в месте установки полукомплекта при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кВ;

$U_{М2} = 0{,}01 \cdot \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}$ – минимальное напряжение, при котором действует реле направления мощности, кВ;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение сети, кВ;

$k_{ч} = 1{,}2$ – коэффициент чувствительности, о.е.

В этом случае полное сопротивление смещения определяется следующим образом:

$$Z_{2\,см} = \frac{U_{М2} \cdot k_ч - U_{2\,мин}}{I_{2\,мин}},$$

где $I_{2\,мин}$ – минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кА. За расчетный вид КЗ принимается тот, при котором был произведен расчет $U_{2\,мин}$.

Если подводимое к РНМ напряжение обеспечивает необходимую чувствительность, то смещение вводить не нужно:

$$Z_{2\,см} = 0.$$

Активное и индуктивное сопротивления смещения вычисляются следующим образом:

$$R_{2\,см} = -Z_{2\,см} \cdot \cos\varphi_{мч};$$

$$X_{2\,см} = -Z_{2\,см} \cdot \sin\varphi_{мч}.$$

2.2.1.9. Выбор времени срабатывания таймеров НВЧЗ

Выдержки времени (таймеры) НВЧЗ принимаются равными значениям, приведенным в таблице 2.1. При этом значение выдержки времени «**Тср_срабат**» дополнительно рекомендуется уточнять при наладке.

Выдержка времени на срабатывание «**Тср_ввод_Z**» выбирается из условий отстройки от времени срабатывания защиты:

$$T_{ср\,ввод\,Z} = T_{защ} + T_{зап},$$

где $T_{защ}$ – время срабатывания защиты, которое в случае НВЧЗ рекомендуется взять равным 0,06, с;

$T_{зап}$ – время запаса, принимаемое равным 0,1, с.

Выдержка времени на срабатывание «**Тср_вывод_Z**» должна отстраиваться от максимально возможной длительности внешнего КЗ:

$$T_{ср\,вывод\,Z} = T_{внеш\,макс} + T_{зап},$$

где $T_{внешмакс}$ – максимальное время протекания тока внешнего короткого замыкания, с;

$T_{зап}$ – время запаса, принимаемое равным 0,1, с.

При определении $T_{внешмакс}$ необходимо учитывать время работы защит смежных присоединений, шин, силовых трансформаторов, и время полного отключения соответствующих выключателей.

Таблица 2.1 – Значения выдержек времени НВЧЗ

Таймер	Значение, мс
Тср_задерж_ПП	50
Тв_продл_ПП	35
Тср_срабат	25

2.2.2. Определение положения накладок НВЧЗ

Накладки, использующиеся в НВЧЗ, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Список накладок НВЧЗ

№	Назначение	Обозначение	Положение
1	Пуск приемопередатчика при выводе защиты	Пуск_при_выводе	0 – Не пускать 1 – Пускать
2	Пуск приемопередатчика при неисправностях цепей напряжения	Пуск_при_БНН	0 – Не пускать 1 – Пускать
3	Наличие тяговой нагрузки на линии	Тяговая_нагр	0 – Нет 1 – Есть
4	Признак длинной линии	Длинная_ЛЭП	0 – Нет 1 – Да

Программные накладки «**Пуск_при_выводе**» и «**Пуск_при_БНН**» рекомендуется выставлять в положение «Пускать» в целях автоматической блокировки противоположных полукомплектов при выявлении неисправности. Во время наладки или испытаний защиты накладки временно могут быть выставлены в нулевое положение.

Программная накладка «**Тяговая_нагр**» выставляется в положение «Есть», если защищаемая линия электропередачи питает тяговую нагрузку и пуск необходимо выполнять от измерительных органов, контролирующих приращения токов.

Программная накладка «**Длинная_ЛЭП**» выставляется в положение «Да», если измерительный орган по напряжению обратной последовательности не обеспечивает требуемую чувствительность и вместо него необходимо использовать ИО по току обратной последовательности с торможением от тока прямой.

2.3. Примеры расчета параметров срабатывания НВЧЗ

2.3.1. Пример расчета параметров срабатывания НВЧЗ для одиночной линии с двухсторонним питанием

Для примера рассмотрим линию электропередачи 220 кВ с двухсторонним питанием без ответвлений, представленную на рисунке 2.2. Необходимые параметры сети приведены в таблице 2.3, а расчетные данные – в таблице 2.4.

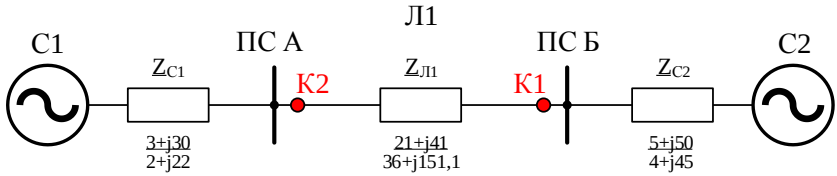

Рисунок 2.2 – Схема защищаемой линии

Таблица 2.3 – Параметры рассматриваемой сети

Параметры и данные линии		Значение
Обозначение	Описание	
$U_{ном}$	Номинальное напряжение сети, кВ	220
$I_{1ном}$	Номинальный первичный ток ТТ, А	300
L	Длина защищаемой линии, км	100
$X_{1уд}$	Удельное реактивное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км	0,41
$R_{1уд}$	Удельное активное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км	0,21

Таблица 2.4 – Расчетные данные для выбора параметров срабатывания

Расчетные величины		Для первого полукомплекта		Для второго полукомплекта	
Обозначение	Описание	Точка КЗ	Значение	Точка КЗ	Значение
$I_{раб\,макс}$	Максимальный рабочий ток, кА	—	0,19	—	0,19
$I_{1\,мин}$	Минимальный ток в месте установки полукомплекта при трехфазном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1	1,76	К2	1,34
$3I_{0\,мин}$	Минимальное значение утроенного тока нулевой последовательности в месте установки защиты при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1	0,95	К2	0,72
$I_{1\,мин}^{(1,1)}$	Минимальный ток прямой последовательности в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА;	К1	1,17	К2	0,91
$I_{2\,мин}^{(1,1)}$	Минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА;	К1	0,59	К2	0,44
$I_{2\,мин}^{(1)}$	Минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при однофазном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1	0,55	К2	0,49
$I_{кач\,макс}$	Максимальный ток качаний, кА	—	2,2	—	2,2

2.3.1.1. ИО по напряжению обратной последовательности

2.3.1.1.1. При наличии в нормальном режиме несимметрии по обратной последовательности, составляющей 3% от номинального напряжения, коэффициент $k_{2\,нс}$ будет равен 0,03 о.е. Коэффициент небаланса по напряжению обратной последовательности примем равным 0,03 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. В этом случае, порог срабатывания блокирующего ИО по напряжению обратной последовательности равен:

$$U_{2\,бл\,(н)} = \frac{k_{отс}}{k_{в}} \cdot \left(k_{2\,нб} + k_{2\,нс}\right) = \frac{1,4}{0,95} \cdot \left(0,03 + 0,03\right) = 0,09 \text{ о.е.}$$

2.3.1.1.2. Порог срабатывания отключающего ИО по напряжению обратной последовательности:

$$U_{2\,\text{откл(н)}} = k_{\text{отс}} \cdot U_{2\,\text{бл(н)}} = 1{,}5 \cdot 0{,}09 = 0{,}14 \text{ о.е.}$$

2.3.1.1.3. Чувствительность отключающего ИО по напряжению обратной последовательности для первого полукомплекта определяется следующим образом:

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2\,\text{мин}}}{U_{2\,\text{откл(н)}} \cdot \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}} = \frac{16{,}52}{0{,}14 \cdot \dfrac{220}{\sqrt{3}}} = 0{,}93,$$

а для второго полукомплекта – следующим:

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2\,\text{мин}}}{U_{2\,\text{откл(н)}} \cdot \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}} = \frac{22{,}25}{0{,}14 \cdot \dfrac{220}{\sqrt{3}}} = 1{,}25.$$

Требуемая чувствительность рассматриваемого ИО не обеспечивается, поэтому вводим компенсацию напряжения обратной последовательности. Сопротивление компенсации для обоих полукомплектов равно:

$$Z_{\text{комп}} = 0{,}5 \cdot Z_{1\,\text{л}} = 0{,}5 \cdot 46{,}07 = 23{,}04 \text{ Ом.}$$

Активное и индуктивное сопротивления компенсации для обоих полукомплектов будут вычисляться следующим образом:

$$R_{\text{комп}} = -Z_{\text{комп}} \cdot \cos\varphi_{\text{мч}} = -23{,}04 \cdot \cos\left(\operatorname{arctg}\frac{0{,}41}{0{,}21}\right) =$$

$$= -23{,}04 \cdot \cos 63° = -10{,}46 \text{ Ом;}$$

$$X_{\text{комп}} = -Z_{\text{комп}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} = -23{,}04 \cdot \sin 63° = -20{,}53 \text{ Ом.}$$

Значения параметров «**R2_комп**» и «**X2_комп**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равны $R_{\text{комп}}$ и $X_{\text{комп}}$ соответственно.

При этом к пусковому органу первого полукомплекта будет подводится компенсированное напряжение:

$$U_{2\,\text{комп}\,\text{мин}} = U_{2\,\text{мин}} + I_{2\,\text{мин}} \cdot Z_{\text{комп}} = 16{,}52 + 0{,}55 \cdot 23{,}04 = 29{,}17 \text{ кВ}.$$

Чувствительность отключающего ИО по напряжению обратной последовательности с компенсацией для первого полукомплекта равна:

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2\,\text{комп}\,\text{мин}}}{U_{2\,\text{откл(н)}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}} = \frac{29{,}17}{0{,}14 \cdot \frac{220}{\sqrt{3}}} = 1{,}6\,.$$

Компенсированное напряжение, подводимое к пусковому органу второго полукомплекта, будет вычисляться следующим образом:

$$U_{2\,\text{комп}\,\text{мин}} = U_{2\,\text{мин}} + I_{2\,\text{мин}} \cdot Z_{\text{комп}} = 22{,}25 + 0{,}44 \cdot 23{,}04 = 32{,}37 \text{ кВ}.$$

Чувствительность отключающего ИО по напряжению обратной последовательности с компенсацией для второго полукомплекта равна:

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2\,\text{комп}\,\text{мин}}}{U_{2\,\text{откл(н)}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}} = \frac{32{,}37}{0{,}14 \cdot \frac{220}{\sqrt{3}}} = 1{,}8\,.$$

Требуемая чувствительность не обеспечивается даже с компенсацией, поэтому при несимметричных замыканиях пуск приемопередатчика и отключение линии будет осуществляться от ИО по току обратной последовательности с торможением от тока прямой.

Значения порогов срабатывания «**U2_бл**» и «**U2_откл**» в относительных единицах для обоих полукомплектов равны $U_{2\,\text{бл(н)}}$ и $U_{2\,\text{откл(н)}}$ соответственно.

2.3.1.2. Расчет порога срабатывания ИО по току обратной последовательности

2.3.1.2.1. При наличии в нормальном режиме несимметрии по обратной последовательности, составляющей 3% от номинального

напряжения, коэффициент $k_{2\,\text{нс}}$ будет равен 0,03 о.е. Коэффициент небаланса по току обратной последовательности примем равным 0,03 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. В этом случае порог срабатывания ИО по току обратной последовательности будет равен:

$$I_{2\,\text{бл}\,(н)} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot \left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right) = \frac{1{,}4}{0{,}95} \cdot \left(0{,}03 + 0{,}03\right) = 0{,}09 \text{ о.е.}$$

2.3.1.2.2. Порог срабатывания отключающего ИО по току обратной последовательности:

$$I_{2\,\text{откл}(\text{н})} = k_{\text{отс}} \cdot I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} = 2 \cdot 0{,}09 = 0{,}18 \text{ о.е.}$$

2.3.1.2.3. Чувствительность отключающего ИО по току обратной последовательности для первого полукомплекта проверяется следующим образом:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}55}{0{,}18 \cdot 0{,}3} = 10{,}2\,;$$

а для второго – следующим:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}44}{0{,}18 \cdot 0{,}3} = 8{,}1\,.$$

Так как $k_{\text{ч}} > 2$, то на втором конце линии, где коэффициент чувствительности ниже, загрубляем его до $k_{\text{ч}} = 2$ и получаем новые значения порогов срабатывания:

$$I_{2\,\text{откл}(\text{н})} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{2 \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}44}{2 \cdot 0{,}3} = 0{,}73 \text{ о.е.;}$$

$$I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} = \frac{I_{2\,\text{откл}(\text{н})}}{k_{\text{отс}}} = \frac{0{,}73}{2} = 0{,}37 \text{ о.е.}$$

Значения порогов срабатывания «**I2_бл**» и «**I2_откл**» в относительных единицах для обоих полукомплектов будут равны $I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})}$ и $I_{2\,\text{откл}(\text{н})}$ соответственно.

2.3.1.3. Расчет порога срабатывания ИО по приращению тока обратной последовательности

При отсутствии на линии тяговой нагрузки вводить в работу ИО по приращению токов не рекомендуется. Здесь расчеты приведены в качестве примера.

2.3.1.3.1. Порог срабатывания отключающего органа по приращению тока прямой последовательности для первого полукомплекта вычисляется следующим образом:

$$\Delta I_{1\,\text{откл}} = \frac{I_{1\,\text{мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{ч}}} = \frac{1{,}76}{1{,}2 \cdot 1{,}5} = 0{,}98 \text{ кА};$$

для второго – следующим:

$$\Delta I_{1\,\text{откл}} = \frac{I_{1\,\text{мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{ч}}} = \frac{1{,}34}{1{,}2 \cdot 1{,}5} = 0{,}74 \text{ кА}.$$

Значение параметра «**dI1_откл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов будет равно наименьшему из полученных значений, т.е. 0,74 кА.

2.3.1.3.2. Порог срабатывания блокирующего органа отстраивается от установившегося значения приращения в режиме качаний или асинхронного хода:

$$\Delta I_{1\,\text{бл}} = k_{\text{отс}} \cdot \Delta I_{\text{кач уст}} = k_{\text{отс}} \cdot 2 \cdot I_{\text{кач макс}} \cdot \sin^2\left(\frac{\omega_s \cdot T}{4}\right) =$$

$$= 2 \cdot 2 \cdot 2{,}2 \cdot \sin^2\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 0{,}02}{4}\right) = 0{,}08 \text{ кА}.$$

Значение порога срабатывания «**dI1_бл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $\Delta I_{1\,\text{бл}}$.

2.3.1.4. Расчет порога срабатывания ИО по приращению тока прямой последовательности

При отсутствии на линии тяговой нагрузки вводить в работу ИО по приращению токов не рекомендуется. Здесь же расчеты приведены лишь в качестве примера.

2.3.1.4.1. Порог срабатывания отключающего ИО по приращению тока обратной последовательности для первого полукомплекта вычисляется следующим образом:

$$\Delta I_{2\,\text{откл}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{ч}}} = \frac{0{,}55}{1{,}2 \cdot 1{,}5} = 0{,}31 \text{ кА};$$

для второго – следующим:

$$\Delta I_{2\,\text{откл}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{ч}}} = \frac{0{,}44}{1{,}2 \cdot 1{,}5} = 0{,}24 \text{ кА}.$$

Значение параметра «**dI2_откл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов будет равно наименьшему из полученных значений, т.е. 0,24 кА.

2.3.1.4.2. Порог срабатывания блокирующего ИО по приращению тока обратной последовательности отстраиваем от максимального небаланса в режиме качаний или асинхронного хода. Коэффициент небаланса по току обратной последовательности примем равным 0,03 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. Тогда получим следующее значение:

$$\Delta I_{2\,\text{бл}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot k_{2\,\text{нб}} \cdot I_{\text{кач макс}} = \frac{1{,}4}{0{,}95} \cdot 0{,}03 \cdot 2{,}2 = 0{,}1 \text{ кА}.$$

Значение порога срабатывания «**dI2_бл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $\Delta I_{2\,\text{бл}}$.

2.3.1.5. Расчет порога срабатывания ИО по току обратной последовательности с торможением от тока прямой

2.3.1.5.1. Начальный порог срабатывания блокирующего измерительного органа равен:

$$I_{2\,\text{нач бл}} = I_{2\,\text{бл}} = 0{,}11 \text{ кА}.$$

Значение порога срабатывания «**I2нач_бл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $I_{2\,\text{нач бл}}$.

2.3.1.5.2. Границу наклонной части характеристики срабатывания как блокирующего, так и отключающего ИО рекомендуется брать равной номинальному первичному току ТТ:

$$I_{1\,\text{т бл}} = I_{1\,\text{т откл}} = I_{1\,\text{ном}} = 0{,}3 \text{ кА}.$$

Значения порогов срабатывания «**I1т_бл**» и «**I1т_откл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равны $I_{1\,\text{т бл}}$ и $I_{1\,\text{т откл}}$ соответственно.

2.3.1.5.3. Коэффициент торможения блокирующего ИО для обоих полукомплектов равен:

$$k_{\text{т бл}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right) \cdot I_{\text{кач макс}} - I_{2\,\text{нач бл}}}{I_{\text{кач макс}} - I_{1\,\text{ном}}} =$$

$$= \frac{1{,}2 \cdot \left(0{,}03 + 0{,}03\right) \cdot 2{,}2 - 0{,}11}{2{,}2 - 0{,}3} = 0{,}03.$$

Значение параметра «**Кт_бл**» для обоих полукомплектов равно $k_{\text{т бл}}$.

2.3.1.5.4. Порог срабатывания отключающего измерительного органа равен:

$$I_{2\,\text{нач откл}} = I_{2\,\text{откл}} = 0{,}22 \text{ кА}.$$

Значение порога срабатывания «**I2нач_откл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $I_{2\,\text{нач откл}}$.

2.3.1.5.5. Расчет коэффициента торможения отключающего ИО

Порог срабатывания в рабочей точке, соответствующей междуфазному КЗ в конце защищаемой линии, для первого полукомплекта равен:

$$I^{\text{Т}}_{2\,\text{уст}} = k_{\text{отс}} \cdot \frac{U_{2\,\text{бл(н)}} \cdot \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}}{\dfrac{Z_{\text{с1}}}{k_{\text{ток}}} + Z_{\text{л}}} = 2 \cdot \frac{0{,}09 \cdot \dfrac{220}{\sqrt{3}}}{\dfrac{30{,}15}{1} + 46{,}07} = 0{,}30 \text{ кА},$$

а для второго:

$$I^{\text{Т}}_{2\,\text{уст}} = k_{\text{отс}} \cdot \frac{U_{2\,\text{бл(н)}} \cdot \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}}{\dfrac{Z_{\text{с2}}}{k_{\text{ток}}} + Z_{\text{л}}} = 2 \cdot \frac{0{,}09 \cdot \dfrac{220}{\sqrt{3}}}{\dfrac{50{,}25}{1} + 46{,}07} = 0{,}24 \text{ кА}.$$

Тогда коэффициент торможения отключающего ИО для первого полукомплекта равен:

$$k_{\text{т откл1}} = \frac{I^{\text{Т}}_{2\,\text{уст}} - I_{2\,\text{нач откл}}}{I^{(1,1)}_{1} - I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}30 - 0{,}22}{1{,}17 - 0{,}3} = 0{,}09,$$

а для второго:

$$k_{\text{т откл2}} = \frac{I^{\text{Т}}_{2\,\text{уст}} - I_{2\,\text{нач откл}}}{I^{(1,1)}_{1} - I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}24 - 0{,}22}{0{,}91 - 0{,}3} = 0{,}03.$$

Значение параметра «**Кт_откл**» для первого и второго полукомплектов равны $k_{\text{т откл1}}$ и $k_{\text{т откл2}}$ соответственно.

2.3.1.5.6. Чувствительность для первого полукомплекта:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I^{(1,1)}_{2}}{I^{\text{Т}}_{2\,\text{уст}}} = \frac{0{,}59}{0{,}30} = 2{,}0,$$

для второго:

$$k_{ч} = \frac{I_2^{(1,1)}}{I_{2\,уст}^{Т}} = \frac{0,44}{0,24} = 1,8 .$$

Для обоих полукомплектов ИО удовлетворяют условию чувствительности: $k_{ч} > 1,5$.

2.3.1.6. Расчет характеристики срабатывания отключающего реле сопротивления

2.3.1.6.1. Угол максимальной чувствительности вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{мч} = \mathrm{arctg}\frac{X_{1\,уд}}{R_{1\,уд}} = \mathrm{arctg}\frac{0,41}{0,21} = 63° .$$

Значение параметра «**фмч_откл**» равно $\varphi_{мч}$.

2.3.1.6.2. Полное сопротивление срабатывания отстраивается от минимального сопротивления нагрузки линии, которое для обоих полукомплектов вычисляется следующим образом:

$$Z_{раб\,мин} = \frac{U_{раб\,мин}}{\sqrt{3}\cdot I_{раб\,макс}} = \frac{0,95\cdot U_{ном}}{\sqrt{3}\cdot I_{раб\,макс}} = \frac{0,95\cdot 220}{\sqrt{3}\cdot 0,19} = 635,09 \text{ Ом.}$$

Расчетное сопротивление срабатывания отключающего реле сопротивления для обоих полукомплектов равно:

$$Z_{откл} = \frac{Z_{раб\,мин}}{k_{отс}\cdot k_{в}\cdot \cos(\varphi_{мч} - \varphi_{нг})} = \frac{635,09}{1,2\cdot 1,05\cdot \cos(63° - 40°)} = 547,57 \text{ Ом.}$$

Параметр срабатывания по реактивной составляющей для обоих полукомплектов вычисляется следующим образом:

$$X_{откл} = Z_{откл}\cdot \sin\varphi_{мч} = 547,57\cdot \sin 63° = 487,89 \text{ Ом.}$$

Значение параметра «**Хоткл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $X_{откл}$.

2.3.1.6.3. Параметр срабатывания по активной составляющей для обоих полукомплектов равен:

$$R_{\text{откл}} = \frac{1}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot Z_{\text{раб мин}} \cdot \left(\cos\varphi_{\text{нг}} - \frac{\sin\varphi_{\text{нг}}}{\operatorname{tg}\varphi_{\text{мч}}} \right) =$$

$$= \frac{1}{1{,}5 \cdot 1{,}05} \cdot 635{,}09 \cdot \left(\cos 40^\circ - \frac{\sin 40^\circ}{\operatorname{tg} 63^\circ} \right) = 176{,}83 \text{ Ом.}$$

Значение параметра «**Rоткл**» в первичных величинах равно $R_{\text{откл}}$.

2.3.1.6.4. На линии без ответвлений чувствительность по реактивной составляющей сопротивления для обоих полукомплектов проверяется только по условию охвата характеристикой всей линии:

$$X_{\text{чувст}} = k_{\text{удл}} \cdot X_{1\,\text{уд}} \cdot L = 2 \cdot 0{,}41 \cdot 100 = 82 \text{ Ом.}$$

Для обоих полукомплектов сопротивление чувствительности будет равно 82 Ом, и для обоих же полукомплектов выполняется условие:

$$\text{X}_{\text{чувс}} \le \text{X}_{\text{откл}},$$

т.е. реле сопротивления проходят по чувствительности.

2.3.1.6.5. Угловые параметры характеристики срабатывания

Для обоих полукомплектов значения параметров «**ф2_откл**», «**ф3_откл**» и «**ф4_откл**» примем равными 30°, 120° и 5° соответственно.

2.3.1.7. Расчет характеристики срабатывания блокирующего реле сопротивления

2.3.1.7.1. Параметр срабатывания по реактивной части блокирующего РС для обоих полукомплектов по условию согласования с величиной $X_{\text{откл}}$ отключающего реле сопротивления противоположного конца линии равен:

$$X_{бл} = k_{отс} \cdot \left(X_{откл} - L \cdot X_{1уд}\right) = 2 \cdot \left(487{,}89 - 0{,}41 \cdot 100\right) = 893{,}78 \text{ Ом.}$$

2.3.1.7.2. Параметр срабатывания по активной части блокирующего РС для обоих полукомплектов равен:

$$R_{бл} = 1{,}05 \cdot R_{откл} = 1{,}05 \cdot 176{,}83 = 185{,}67 \text{ Ом.}$$

Значение параметра «**Rбл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $R_{бл}$.

2.3.1.7.3. Угловые характеристики блокирующего реле сопротивления – углы $\varphi_{мч}$ и φ_4 – берутся равными аналогичным параметрам отключающего РС, т.е. для обоих полукомплектов значение параметров «**фмч_бл**» и «**ф4_бл**» принимаем равным 63° и 5° соответственно.

2.3.1.7.4. Коэффициент смещения характеристики для обоих полукомплектов примем равным 0,1 о.е.

2.3.1.7.5. Особенности параметрирования характеристики срабатывания блокирующего реле сопротивления

Параметр срабатывания $X'_{бл}$ и коэффициент смещения $K'_{см\,бл}$ будут вычисляться следующим образом:

$$X'_{бл} = K_{см\,бл} \cdot X_{бл} = 0{,}1 \cdot 891{,}78 = 89{,}18 \text{ Ом;}$$

$$K'_{см\,бл} = -\frac{1}{K_{см\,бл}} = -\frac{1}{0{,}1} = -10 .$$

Значение параметра «**Хбл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $X'_{бл}$.

Значение параметра «**Ксм_бл**» в относительных единицах для обоих полукомплектов равно $K'_{см\,бл}$.

2.3.1.8. Реле направления мощности обратной последовательности

2.3.1.8.1. Параметр срабатывания по току равен:

$$I_{\text{М2}} = I_{2\,\text{бл}} = 0{,}11 \text{ кА}.$$

Значение параметра «**РНМОП**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $I_{\text{М2}}$.

2.3.1.8.2. Угол максимальной чувствительности реле вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{\text{мч}\,2} = \text{arctg}\frac{X_{1\,\text{уд}}}{R_{1\,\text{уд}}} + 180 = \text{arctg}\frac{0{,}41}{0{,}21} + 180 = 243^\circ,$$

Значение параметра «**фмч2**» для обоих полукомплектов равно $\varphi_{\text{мч}\,2}$.

2.3.1.8.3. Определение сопротивления смещения

Чувствительность реле направления мощности по напряжению обратной последовательности для первого полукомплекта проверяется следующим образом:

$$\frac{U_{2\,\text{мин}}}{U_{\text{М2}}} = \frac{16{,}52}{0{,}01 \cdot \dfrac{220}{\sqrt{3}}} = 13{,}0,$$

а для второго полукомплекта – следующим:

$$\frac{U_{2\,\text{мин}}}{U_{\text{М2}}} = \frac{22{,}25}{0{,}01 \cdot \dfrac{220}{\sqrt{3}}} = 17{,}5.$$

Подводимое к РНМ напряжение обеспечивает необходимую чувствительность и надежность срабатывания ($k_{\text{ч}} \geq 1{,}2$) для обоих полукомплектов, поэтому смещение вводить не нужно:

$$Z_{2\,\text{см}} = 0.$$

Активное и индуктивное сопротивления смещения также будут равны нулю:

$$R_{2\,см} = Z_{2\,см} \cdot \cos\varphi_{мч\,2} = 0\,;$$

$$X_{2\,см} = Z_{2\,см} \cdot \sin\varphi_{мч\,2} = 0\,.$$

Значения параметров «**R2_см**» и «**X2_см**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равны $R_{2\,см}$ и $X_{2\,см}$ соответственно.

2.3.1.9. Расчет времени срабатывания таймеров

Выдержки времени «**Тср_задерж_ПП**», «**Тв_продл_ПП**» и «**Тср_срабат**», согласно таблице 2.1, возьмем равными 50, 35 и 25 мс соответственно.

Выдержка времени на срабатывание «**Тср_ввод_Z**» выбирается следующим образом:

$$T_{ср\,ввод\,Z} = T_{защ} + T_{зап} = 0{,}06 + 0{,}1 = 0{,}16 \text{ с.}$$

Считая, что замыкание на смежном участке в наиболее неблагоприятных условиях может быть отключено третьей ступенью дистанционной защиты, имеющей выдержку времени на срабатывание 6 с, а полное время отключения выключателя составляет 0,05 с, получим следующее значение выдержки времени «**Тср_вывод_Z**»:

$$T_{ср\,вывод\,Z} = T_{внеш\,макс} + T_{зап} = 6{,}05 + 0{,}1 = 6{,}15 \text{ с.}$$

2.3.2. Пример расчета параметров срабатывания НВЧЗ для линии с двухсторонним питанием при наличии ответвления на линии

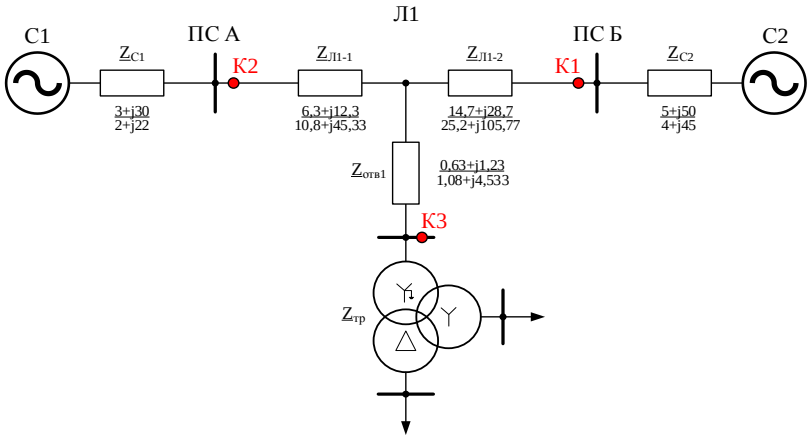

Рисунок 2.3 – Схема защищаемой линии

Для примера возьмем линию 220 кВ с двухсторонним питанием и с тупиковым ответвлением на ЛЭП (рисунок 2.3). На ответвлении установлен трансформатор ТДТН-25000/220 со схемой обмоток Y0/Y/Δ. Нагрузка сторон СН и НН одинаковая и равна 10 МВА с $\cos\varphi = 0{,}8$. Необходимые параметры сети приведены в таблице 2.5, а расчетные данные – в таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Параметры рассматриваемой сети

Параметры и данные линии		Значение
Обозначение	Описание	
$U_{ном}$	Номинальное напряжение сети, кВ	220
$I_{1ном}$	Номинальный первичный ток ТТ, А	300
L_1	Длина линии от подстанции А до ответвления, км	30
L_2	Длина линии от подстанции Б до ответвления, км	70
$L_{отв}$	Длина ответвления, км	3
$X_{1уд}$	Удельное реактивное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км	0,41

Параметры и данные линии		Значение
Обозначение	Описание	
$R_{1\,уд}$	Удельное активное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км	0,21
$R_{0\,уд}$	Удельное активное сопротивление защищаемой линии нулевой последовательности, Ом/км	0,36
$X_{0\,уд}$	Удельное реактивное сопротивление защищаемой линии нулевой последовательности, Ом/км	1,151
$B_{1\,уд}$	Удельная емкостная проводимость линии прямой последовательности, См/км	$2{,}68 \cdot 10^{-6}$
$X_{1\,удотв}$	Удельное реактивное сопротивление ВЛ ответвления прямой последовательности, Ом/км	0,41
$X_{тр}$	Эквивалентное реактивное сопротивление трансформаторов ответвления, Ом	275

Таблица 2.6 – Расчетные данные для выбора параметров срабатывания

Расчетные величины		Для первого полукомплекта		Для второго полукомплекта	
Обозначение	Описание	Точка КЗ	Значение	Точка КЗ	Значение
$I_{раб\,макс}$	Максимальный рабочий ток, кА	—	0,22	—	0,19
$I_{1\,мин}$	Минимальный ток в месте установки полукомплекта при трехфазном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1	1,77	К2	1,36
$I_{1\,мин}^{(1,1)}$	Минимальный ток прямой последовательности в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА;	К1	1,16	К2	0,88
$I_{2\,мин}^{(1,1)}$	Минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА;	К1	0,59	К2	0,42
$I_{2\,мин}^{(1)}$	Минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при однофазном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1	0,55	К2	0,48
$3U_{0\,мин}$	Минимальное напряжение нулевой последовательности, кВ	К1/К3	21,12	К2/К3	32,81

Расчетные величины		Для первого полукомплекта		Для второго полукомплекта	
Обозначение	Описание	Точка КЗ	Значение	Точка КЗ	Значение
$3I_{0\,\text{мин}}$	Минимальное значение утроенного тока нулевой последовательности в месте установки защиты при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1/К3	0,91	К2/К3	0,73
$U_{\text{остотв}}$	Остаточное напряжение при трехфазном КЗ на шинах ответвления, кВ	К3	43,28	К3	50,74
$I_{1\,\text{отв}}$	Ток прямой последовательности при трехфазном КЗ на шинах ответвления, кА	К3	2,98	К3	1,52

2.3.2.1.1. Порог срабатывания отключающего ИО по напряжению обратной последовательности:

$$U_{2\,\text{откл(н)}} = k_{\text{отс}} \cdot U_{2\,\text{бл(н)}} = 1{,}5 \cdot 0{,}09 = 0{,}14 \text{ о.е.}$$

2.3.2.1.2. Чувствительность отключающего ИО по напряжению обратной последовательности для первого полукомплекта определяется следующим образом:

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2\,\text{мин}}}{U_{2\,\text{откл(н)}} \cdot \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}} = \frac{16{,}44}{0{,}14 \cdot \dfrac{220}{\sqrt{3}}} = 0{,}92\,,$$

а для второго полукомплекта – следующим:

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2\,\text{мин}}}{U_{2\,\text{откл(н)}} \cdot \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}} = \frac{22{,}0}{0{,}14 \cdot \dfrac{220}{\sqrt{3}}} = 1{,}24\,.$$

Требуемая чувствительность рассматриваемого ИО не обеспечивается, поэтому вводим компенсацию напряжения обратной последовательности. Сопротивление компенсации для обоих полукомплектов равно:

$$Z_{\text{комп}} = 0{,}5 \cdot Z_{1\,\text{л}} = 0{,}5 \cdot 46{,}07 = 23{,}04 \text{ Ом.}$$

Активное и индуктивное сопротивления компенсации для обоих полукомплектов равны:

$$R_{\text{комп}} = -Z_{\text{комп}} \cdot \cos\varphi_{\text{мч}} = -23{,}04 \cdot \cos\left(\operatorname{arctg}\frac{0{,}41}{0{,}21}\right) = -10{,}46 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{комп}} = -Z_{\text{комп}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} = -23{,}04 \cdot \sin 63° = -20{,}53 \text{ Ом}.$$

Значения параметров «**R2_комп**» и «**X2_комп**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равны $R_{\text{комп}}$ и $X_{\text{комп}}$ соответственно.

При этом к пусковому органу первого полукомплекта будет подводится компенсированное напряжение:

$$U_{2\,\text{комп}\,\text{мин}} = U_{2\,\text{мин}} + I_{2\,\text{мин}} \cdot Z_{\text{комп}} = 16{,}44 + 0{,}55 \cdot 23{,}04 = 29{,}11 \text{ кВ}.$$

Чувствительность отключающего ИО по напряжению обратной последовательности с компенсацией для первого полукомплекта равна:

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2\,\text{комп}\,\text{мин}}}{U_{2\,\text{откл(н)}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}} = \frac{29{,}11}{0{,}14 \cdot \frac{220}{\sqrt{3}}} = 1{,}6\,.$$

Компенсированное напряжение, подводимое к пусковому органу второго полукомплекта, будет вычисляться следующим образом:

$$U_{2\,\text{комп}\,\text{мин}} = U_{2\,\text{мин}} + I_{2\,\text{мин}} \cdot Z_{\text{комп}} = 22{,}0 + 0{,}42 \cdot 23{,}04 = 31{,}68 \text{ кВ}.$$

Чувствительность отключающего ИО по напряжению обратной последовательности с компенсацией для второго полукомплекта равна:

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2\,\text{комп}\,\text{мин}}}{U_{2\,\text{откл(н)}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}} = \frac{31{,}68}{0{,}14 \cdot \frac{220}{\sqrt{3}}} = 1{,}8\,.$$

Требуемая чувствительность не обеспечивается даже с компенсацией, поэтому при несимметричных замыканиях пуск приемопередатчика и отключение линии будет осуществляться от

ИО по току обратной последовательности с торможением от тока прямой.

Значения порогов срабатывания «**U2_бл**» и «**U2_откл**» в относительных единицах для обоих полукомплектов равны $U_{2\,\text{бл}\,(\text{н})}$ и $U_{2\,\text{откл}(\text{н})}$ соответственно.

2.3.2.2. Выбор порога срабатывания ИО по току обратной последовательности

2.3.2.2.1. При наличии в нормальном режиме несимметрии по обратной последовательности, составляющей 3% от номинального напряжения, коэффициент $k_{2\,\text{нс}}$ будет равен 0,03 о.е. Коэффициент небаланса по току обратной последовательности примем равным 0,03 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. В этом случае порог срабатывания ИО по току обратной последовательности будет равен:

$$I_{2\,\text{бл}\,(н)} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot \left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right) = \frac{1{,}4}{0{,}95} \cdot \left(0{,}03 + 0{,}03\right) = 0{,}09 \text{ о.е.}$$

Порог срабатывания отключающего ИО по току обратной последовательности:

$$I_{2\,\text{откл}(\text{н})} = k_{\text{отс}} \cdot I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} = 2 \cdot 0{,}09 = 0{,}18 \text{ о.е.}$$

2.3.2.2.2. Чувствительность отключающего ИО по току обратной последовательности для первого полукомплекта проверяется следующим образом:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}55}{0{,}18 \cdot 0{,}3} = 10{,}2\,;$$

а для второго – следующим:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}42}{0{,}18 \cdot 0{,}3} = 7{,}8\,.$$

Так как $k_{\text{ч}} > 2$, то на втором конце линии, где коэффициент

чувствительности ниже, загрубляем его до $k_{ч} = 2$ и получаем новые значения порогов срабатывания:

$$I_{2\,откл} = \frac{I_{2\,мин}}{2} = \frac{0{,}42}{2} = 0{,}21 \text{ кА};$$

$$I_{2\,бл} = \frac{I_{2\,откл}}{k_{отс}} = \frac{0{,}21}{2} = 0{,}11 \text{ кА}.$$

Значения порогов срабатывания «**I2_бл**» и «**I2_откл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равны $I_{2\,бл}$ и $I_{2\,откл}$ соответственно.

2.3.2.3. Выбор порога срабатывания ИО по приращению тока обратной последовательности

При отсутствии на линии тяговой нагрузки вводить в работу ИО по приращению токов не рекомендуется. Расчет данного ИО приведен в предыдущем примере.

2.3.2.4. Выбор порога срабатывания ИО по приращению тока прямой последовательности

При отсутствии на линии тяговой нагрузки вводить в работу ИО по приращению токов не рекомендуется. Расчет данного ИО приведен в предыдущем примере.

2.3.2.5. Расчет порога срабатывания ИО по току обратной последовательности с торможением от тока прямой

2.3.2.5.1. Начальный порог срабатывания блокирующего измерительного органа равен:

$$I_{2\,нач\,бл} = I_{2\,бл} = 0{,}11 \text{ кА}.$$

Значение порога срабатывания «**I2нач_бл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $I_{2\,нач\,бл}$.

2.3.2.5.2. Границу наклонной части характеристики срабатывания как блокирующего, так и отключающего ИО, рекомендуется брать равной номинальному первичному току ТТ:

$$I_{1\,\text{т бл}} = I_{1\,\text{т откл}} = I_{1\,\text{ном}} = 0{,}3 \text{ кА}.$$

Значения порогов срабатывания «**I1т_бл**» и «**I1т_откл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равны $I_{1\,\text{т бл}}$ и $I_{1\,\text{т откл}}$ соответственно.

2.3.2.5.3. Коэффициент торможения блокирующего ИО для обоих полукомплектов равен:

$$k_{\text{т бл}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right) \cdot I_{\text{кач макс}} - I_{2\,\text{нач бл}}}{I_{\text{кач макс}} - I_{1\,\text{ном}}} =$$

$$= \frac{1{,}2 \cdot (0{,}03 + 0{,}03) \cdot 2{,}2 - 0{,}11}{2{,}2 - 0{,}3} = 0{,}03 .$$

Значение параметра «**Кт_бл**» в относительных единицах для обоих полукомплектов равно $k_{\text{т бл}}$.

Порог срабатывания отключающего измерительного органа равен:

$$I_{2\,\text{нач откл}} = I_{2\,\text{откл}} = 0{,}21 \text{ кА}.$$

Значение порога срабатывания «**I2нач_откл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $I_{2\,\text{нач откл}}$.

2.3.2.5.4. Расчет коэффициента торможения отключающего ИО

Порог срабатывания в рабочей точке, соответствующей междуфазному КЗ в конце защищаемой линии, для первого полукомплекта равен:

$$I^{\text{Т}}_{2\,\text{уст}1} = k_{\text{отс}} \cdot \frac{U_{2\,\text{бл(н)}} \cdot \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}}{\dfrac{Z_{\text{с}1}}{k_{\text{ток}}} + Z_{\text{л}}} = 2 \cdot \frac{0{,}09 \cdot \dfrac{220}{\sqrt{3}}}{\dfrac{30{,}15}{1} + 46{,}07} = 0{,}30 \text{ кА},$$

для второго:

$$I^{\text{Т}}_{2\,\text{уст}2} = k_{\text{отс}} \cdot \frac{U_{2\,\text{бл(н)}} \cdot \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}}{\dfrac{Z_{\text{с}2}}{k_{\text{ток}}} + Z_{\text{л}}} = 2 \cdot \frac{0{,}09 \cdot \dfrac{220}{\sqrt{3}}}{\dfrac{50{,}25}{1} + 46{,}07} = 0{,}24 \text{ кА}.$$

Тогда коэффициент торможения отключающего ИО для первого полукомплекта равен:

$$k_{\text{т откл}1} = \frac{I^{\text{Т}}_{2\,\text{уст}1} - I_{2\,\text{нач откл}}}{I^{(1,1)}_{1} - I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}30 - 0{,}21}{1{,}16 - 0{,}3} = 0{,}10,$$

а для второго:

$$k_{\text{т откл}2} = \frac{I^{\text{Т}}_{2\,\text{уст}2} - I_{2\,\text{нач откл}}}{I^{(1,1)}_{1} - I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}24 - 0{,}21}{0{,}88 - 0{,}3} = 0{,}05.$$

Значение параметра «**Кт_откл**» в относительных единицах для первого и второго полукомплектов равны $k_{\text{т откл}1}$ и $k_{\text{т откл}2}$ соответственно.

2.3.2.5.5. Чувствительность для первого полукомплекта:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I^{(1,1)}_{2}}{I^{\text{Т}}_{2\,\text{уст}1}} = \frac{0{,}59}{0{,}30} = 2{,}0,$$

для второго:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I^{(1,1)}_{2}}{I^{\text{Т}}_{2\,\text{уст}2}} = \frac{0{,}42}{0{,}24} = 1{,}8.$$

Для обоих полукомплектов ИО удовлетворяют условию чувствительности: $k_{\text{ч}} > 1{,}5$.

2.3.2.6. Расчет характеристики срабатывания отключающего реле сопротивления

2.3.2.6.1. Угол максимальной чувствительности вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{мч} = \mathrm{arctg}\frac{X_{1\,уд}}{R_{1\,уд}} = \mathrm{arctg}\frac{0{,}41}{0{,}21} = 63^\circ .$$

Значение параметра «**фмч_откл**» равно $\varphi_{мч}$.

2.3.2.6.2. Полное сопротивление срабатывания отстраивается от минимального сопротивления нагрузки линии, которое для полукомплекта со стороны подстанции А вычисляется следующим образом:

$$Z_{раб\,мин\,1} = \frac{U_{раб\,мин}}{\sqrt{3}\cdot I_{раб\,макс}} = \frac{0{,}95\cdot U_{ном}}{\sqrt{3}\cdot I_{раб\,макс}} = \frac{0{,}95\cdot 220}{\sqrt{3}\cdot 0{,}22} = 548{,}48 \text{ Ом};$$

а стороны подстанции Б:

$$Z_{раб\,мин\,2} = \frac{U_{раб\,мин}}{\sqrt{3}\cdot I_{раб\,макс}} = \frac{0{,}95\cdot U_{ном}}{\sqrt{3}\cdot I_{раб\,макс}} = \frac{0{,}95\cdot 220}{\sqrt{3}\cdot 0{,}19} = 635{,}09 \text{ Ом}.$$

Расчетное сопротивление срабатывания отключающего реле сопротивления для полукомплекта со стороны подстанции А равно:

$$Z_{откл1} = \frac{Z_{раб\,мин\,1}}{k_{отс}\cdot k_{в}\cdot \cos(\varphi_{мч} - \varphi_{нг})} = \frac{548{,}48}{1{,}2\cdot 1{,}05\cdot \cos(63^\circ - 40^\circ)} = 472{,}89 \text{ Ом};$$

а стороны подстанции Б:

$$Z_{откл2} = \frac{Z_{раб\,мин\,2}}{k_{отс}\cdot k_{в}\cdot \cos(\varphi_{мч} - \varphi_{нг})} = \frac{635{,}09}{1{,}2\cdot 1{,}05\cdot \cos(63^\circ - 40^\circ)} = 547{,}57 \text{ Ом}.$$

Для каждого полукомплекта получаем следующие значения параметра срабатывания по реактивной составляющей:

$$X_{откл1} = Z_{откл1}\cdot \sin\varphi_{мч} = 472{,}89\cdot \sin 63^\circ = 421{,}35 \text{ Ом};$$

$$X_{откл2} = Z_{откл2}\cdot \sin\varphi_{мч} = 547{,}57\cdot \sin 63^\circ = 487{,}89 \text{ Ом}.$$

Значение параметра «**Хоткл**» в первичных величинах для первого полукомплекта равно $X_{\text{откл}1}$, а для второго – $X_{\text{откл}\,2}$.

2.3.2.6.3. Параметр срабатывания по активной составляющей для полукомплекта со стороны подстанции А:

$$R_{\text{откл}1} = \frac{1}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot Z_{\text{раб мин}1} \cdot \left(\cos\varphi_{\text{нг}} - \frac{\sin\varphi_{\text{нг}}}{\operatorname{tg}\varphi_{\text{мч}}} \right) =$$

$$= \frac{1}{1{,}5 \cdot 1{,}05} \cdot 548{,}48 \cdot \left(\cos 40° - \frac{\sin 40°}{\operatorname{tg} 63°} \right) = 152{,}71 \text{ Ом};$$

а стороны подстанции Б:

$$R_{\text{откл}2} = \frac{1}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot Z_{\text{раб мин}\,2} \cdot \left(\cos\varphi_{\text{нг}} - \frac{\sin\varphi_{\text{нг}}}{\operatorname{tg}\varphi_{\text{мч}}} \right) =$$

$$= \frac{1}{1{,}5 \cdot 1{,}05} \cdot 635{,}09 \cdot \left(\cos 40° - \frac{\sin 40°}{\operatorname{tg} 63°} \right) = 176{,}83 \text{ Ом}.$$

Значения параметра «**Rоткл**» в первичных величинах для первого полукомплекта равно $R_{\text{откл}1}$, а для второго – $R_{\text{откл}\,2}$.

2.3.2.6.4. Чувствительность по реактивной составляющей сопротивления для каждого полукомплекта проверяется по двум условиям:

1) обеспечение чувствительности при КЗ на шинах подстанции ответвления;

2) охват характеристикой всей линии.

По первому условию сопротивление чувствительности для полукомплекта со стороны подстанции А равно:

$$X_{\text{чувст}} = 1{,}5 \cdot Z_{\text{отв КЗ}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} = 1{,}5 \cdot \frac{U_{\text{остотв}}}{I_{1\text{отв}}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} =$$

$$= 1{,}5 \cdot \frac{43{,}28}{2{,}98} \cdot \sin 63° = 19{,}41 \text{ Ом}.$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б:

$$X_{\text{чувст}} = 1{,}5 \cdot Z_{\text{отвКЗ}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} = 1{,}5 \cdot \frac{U_{\text{остотв}}}{I_{1\text{отв}}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} =$$

$$= 1{,}5 \cdot \frac{50{,}74}{1{,}52} \cdot \sin 63° = 44{,}61 \text{ Ом}.$$

По второму условию сопротивление чувствительности для обоих полукомплектов равно:

$$X_{\text{чувст}} = k_{\text{удл}} \cdot X_{1\text{уд}} \cdot L = 2 \cdot 0{,}41 \cdot 100 = 82 \text{ Ом}.$$

Для обоих полукомплектов сопротивление чувствительности равно 82 Ом, и для обоих же полукомплектов выполняется условие:

$$X_{\text{чувст}} \le X_{\text{откл}},$$

т.е. реле сопротивления проходят по чувствительности.

2.3.2.6.5. Угловые параметры характеристики срабатывания:

Для обоих полукомплектов значения параметров «**ф2_откл**», «**ф3_откл**» и «**ф4_откл**» примем равными 30°, 120° и 5° соответственно.

2.3.2.7. Расчет характеристики срабатывания блокирующего реле сопротивления

2.3.2.7.1. Параметр срабатывания по реактивной части блокирующего РС по условию согласования с величиной $X_{\text{откл}}$ отключающего реле сопротивления противоположного конца линии для первого полукомплекта равен:

$$X_{\text{бл}1} \ge k_{\text{отс}} \cdot \left(X_{\text{откл}2} - L \cdot X_{1\text{уд}}\right) = 2 \cdot \left(487{,}89 - 0{,}41 \cdot 100\right) = 893{,}78 \text{ Ом},$$

а для второго:

$$X_{\text{бл}2} \ge k_{\text{отс}} \cdot \left(X_{\text{откл}1} - L \cdot X_{1\text{уд}}\right) = 2 \cdot \left(421{,}35 - 0{,}41 \cdot 100\right) = 841{,}88 \text{ Ом}.$$

2.3.2.7.2. Параметр срабатывания по активной части блокирующего РС для первого полукомплекта будет равен:

$$R_{бл1} = 1{,}05 \cdot R_{откл1} = 1{,}05 \cdot 152{,}71 = 160{,}35 \text{ Ом},$$

а для второго:

$$R_{бл2} = 1{,}05 \cdot R_{откл2} = 1{,}05 \cdot 176{,}83 = 185{,}67 \text{ Ом}.$$

Значение параметра «**Rбл**» в первичных величинах для первого и второго полукомплектов равны $R_{бл1}$ и $R_{бл2}$ соответственно.

2.3.2.7.3. Угловые характеристики блокирующего реле сопротивления – углы $\varphi_{мч}$ и φ_4 – берутся равными аналогичным параметрам отключающего РС, т.е. для обоих полукомплектов значение параметров «**фмч_бл**» и «**ф4_бл**» принимаем равным 63° и 5° соответственно.

Коэффициент смещения характеристики для обоих полукомплектов примем равным 0,1 о.е.

2.3.2.7.4. Особенности параметрирования характеристики срабатывания блокирующего реле сопротивления:

Параметр срабатывания $X'_{бл}$ для первого полукомплекта будет вычисляться следующим образом:

$$X'_{бл1} = K_{см\,бл} \cdot X_{бл1} = 0{,}1 \cdot 893{,}78 = 89{,}38 \text{ Ом},$$

а для второго – следующим:

$$X'_{бл2} = K_{см\,бл} \cdot X_{бл2} = 0{,}1 \cdot 841{,}88 = 84{,}19 \text{ Ом}.$$

Значения параметра «**Хбл**» в первичных величинах для первого и второго полукомплектов равны $X'_{бл1}$ и $X'_{бл2}$ соответственно.

Параметр срабатывания $K'_{\text{см бл}}$ будет вычисляться следующим образом:

$$K'_{\text{см бл}} = -\frac{1}{K_{\text{см бл}}} = -\frac{1}{0{,}1} = -10\,.$$

Значение параметра «**Ксм_бл**» в относительных единицах для обоих полукомплектов равно $K'_{\text{см бл}}$.

2.3.2.8. Реле направления мощности обратной последовательности

2.3.2.8.1. Параметр срабатывания по току равен:

$$I_{\text{М2}} = I_{2\,\text{бл}} = 0{,}11 \text{ кА}.$$

Значение параметра «**РНМОП**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $I_{\text{М2}}$.

2.3.2.8.2. Угол максимальной чувствительности реле вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{\text{мч 2}} = \text{arctg}\frac{X_{1\,\text{уд}}}{R_{1\,\text{уд}}} + 180^{\circ} = \text{arctg}\frac{0{,}41}{0{,}21} + 180^{\circ} = 243^{\circ}\,,$$

Значение параметра «**фмч2**» для обоих полукомплектов равно $\varphi_{\text{мч 2}}$.

2.3.2.8.3. Определение сопротивления смещения

Чувствительность реле направления мощности по напряжению обратной последовательности для первого полукомплекта проверяется следующим образом:

$$\frac{U_{2\,\text{мин}}}{U_{\text{М2}}} = \frac{16{,}44}{0{,}01\dfrac{220}{\sqrt{3}}} = 12{,}9\,,$$

а для второго полукомплекта – следующим:

$$\frac{U_{2\,\text{мин}}}{U_{\text{М}2}} = \frac{22{,}0}{0{,}01\dfrac{220}{\sqrt{3}}} = 17{,}3\,.$$

Подводимое к РНМ напряжение обеспечивает необходимую чувствительность и надежность срабатывания ($k_{\text{ч}} \geq 1{,}2$) для обоих полукомплектов, поэтому смещение вводить не нужно:

$$Z_{2\,\text{см}} = 0\,.$$

Активное и индуктивное сопротивления смещения также будут равны нулю:

$$R_{2\,\text{см}} = Z_{2\,\text{см}} \cdot \cos\varphi_{\text{мч}\,2} = 0\,;$$

$$X_{2\,\text{см}} = Z_{2\,\text{см}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}\,2} = 0\,.$$

Значения параметров «**R2_см**» и «**X2_см**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равны $R_{2\,\text{см}}$ и $X_{2\,\text{см}}$ соответственно.

2.3.2.9. Расчет времени срабатывания таймеров

Выдержки времени «**Тср_задерж_ПП**», «**Тв_продл_ПП**» и «**Тср_срабат**», согласно таблице 2.1, возьмем равными 50, 35 и 25 мс соответственно.

Выдержка времени на срабатывание «**Тср_ввод_Z**» выбирается следующим образом:

$$T_{\text{ср ввод}\,Z} = T_{\text{защ}} + T_{\text{зап}} = 0{,}06 + 0{,}1 = 0{,}16 \text{ с.}$$

Считая, что замыкание на смежном участке в наиболее неблагоприятных условиях может быть отключено третьей ступенью дистанционной защиты, имеющей выдержку времени на срабатывание 6 с, а полное время отключения выключателя составляет 0,05 с, получим следующее значение выдержки времени «**Тср_вывод_Z**»:

$$T_{\text{ср вывод}\,Z} = T_{\text{внеш макс}} + T_{\text{зап}} = 6{,}05 + 0{,}1 = 6{,}15 \text{ с.}$$

2.4. Дифференциально-фазная защита

2.4.1. Выбор параметров срабатывания ДФЗ

Пороги срабатывания всех измерительных органов ДФЗ, за исключением реле сопротивления, должны выбираться одинаковыми для обоих полукомплектов.

2.4.1.1. ИО по току обратной последовательности

2.4.1.1.1. Порог срабатывания блокирующего ИО по току обратной последовательности выбирают, исходя из отстройки от тока небаланса обратной последовательности и несимметрии нагрузочного режима с учетом коэффициента отстройки:

$$I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot \left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right),$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е;

$k_{\text{в}} = 0{,}95$ – коэффициент возврата, о.е;

$k_{2\,\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, о.е;

$k_{2\,\text{нс}} = 0 \div 0{,}1$ – коэффициент несимметрии (при отсутствии источников несимметрии в сети принимается равным нулю), о.е.

2.4.1.1.2. Порог срабатывания отключающего ИО по току обратной последовательности выбирают, исходя из отстройки от блокирующего:

$$I_{2\,\text{откл}(\text{н})} = k_{\text{отс}} \cdot I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})},$$

где $k_{\text{отс}} = 2$ – коэффициент отстройки, о.е.

2.4.1.1.3. Чувствительность отключающего ИО по току обратной последовательности определяется коэффициентом чувствительности:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}},$$

где $I_{2\,мин}$ – минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кА.

$I_{1\,ном}$ – номинальный первичный ток ТТ, кА;

Если $k_ч \geq 2$, то на том конце линии, где коэффициент ниже, необходимо загрубить его до $k_ч = 2$ и получить новое значение порога срабатывания:

$$I_{2\,откл(н)} = \frac{I_{2\,мин}}{2 \cdot I_{1\,ном}}.$$

По нему необходимо уточнить $I_{2\,бл\,(н)}$:

$$I_{2\,бл\,(н)} = \frac{I_{2\,откл(н)}}{k_{отс}}.$$

2.4.1.2. ИО по разности токов фаз

2.4.1.2.1. Порог срабатывания блокирующего ИО по разности токов фаз отстраивается от максимального рабочего тока:

$$I_{л\,бл} = \sqrt{3} \cdot k_{отс} \cdot I_{раб\,макс},$$

где $k_{отс} = 1{,}3$ – коэффициент отстройки, о.е.

Для всех полукомплектов рекомендуется принимать одинаковые токи срабатывания, подставляя максимальное из значений токов $I_{раб\,макс}$, определяемых для всех концов линии.

2.4.1.2.2. Порог срабатывания отключающего ИО по разности токов фаз выбирается, исходя из отстройки от блокирующего:

$$I_{л\,откл} = k_{отс} \cdot I_{л\,бл},$$

где $k_{отс} = 1{,}3$ – коэффициент отстройки, о.е.

2.4.1.2.3. Чувствительность ИО по разности токов фаз определяется коэффициентом чувствительности, который

вычисляется по формуле:

$$k_{ч} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{1\,мин}}{I_{л\,откл}},$$

где $I_{1\,мин}$ – минимальный ток в месте установки полукомплекта при трехфазном КЗ в конце защищаемой линии, кА.

Коэффициент чувствительности должен удовлетворять условию $k_{ч} \geq 2$. Если для какого-либо полукомплекта данное условие не выполняется, то возможен пересчет параметра срабатывания с использованием максимального рабочего тока данного полукомплекта.

Если ИО не проходит по чувствительности, то основным органом, реагирующим на симметричные замыкания, будет реле сопротивления.

2.4.1.3. ИО по току нулевой последовательности

2.4.1.3.1. Порог срабатывания блокирующего ИО по току нулевой последовательности отстраивают от максимально возможного тока небаланса:

$$3I_{0\,бл\,(н)} = \frac{k_{отс}}{k_{в}} \cdot \left(k_{0\,нб} + k_{0\,нс}\right),$$

где $k_{отс} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{в} = 0{,}95$ – коэффициент возврата, о.е.;

$k_{0\,нб} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, о.е.;

$k_{0\,нс} = 0 \div 0{,}03$ – коэффициент несимметрии (при отсутствии источников несимметрии в сети принимается равным нулю), о.е.

2.4.1.3.2. Порог срабатывания отключающего ИО по току нулевой последовательности рекомендуется выбирать, исходя из отстройки от блокирующего:

$$3I_{0\,откл(н)} = k_{отс} \cdot 3I_{0\,бл\,(н)},$$

где $k_{отс} = 2$ – коэффициент отстройки, о.е.

2.4.1.3.3. Чувствительность ИО по току нулевой последовательности определяется коэффициентом чувствительности, который вычисляется по формуле:

$$k_ч = \frac{3I_{0\,мин}}{3I_{0\,откл(н)} \cdot I_{1\,ном}},$$

где $3I_{0\,мин}$ – минимальное значение тока нулевой последовательности в месте установки защиты при земляном КЗ в конце зоны действия защиты, кА.

Коэффициент чувствительности должен удовлетворять условию $k_ч \geq 2$.

2.4.1.4. ИО по приращению тока прямой последовательности

2.4.1.4.1. Порог срабатывания отключающего органа отстраивается от минимального приращения тока прямой последовательности при трехфазном коротком замыкании с учетом требуемого коэффициента чувствительности. Для упрощения расчетов принимается, что в нагрузочном режиме ток отсутствовал и приращение определяется только током КЗ:

$$\Delta I_{1\,откл} = \frac{I_{1\,мин}}{k_{отс} \cdot k_ч},$$

где $I_{1\,мин}$ – минимальный ток в месте установки полукомплекта при трехфазном КЗ в конце защищаемой линии, кА;

$k_{отс} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерения и погрешности расчетов, о.е.;

$k_ч = 1{,}5$ – коэффициент чувствительности, о.е.

2.4.1.4.2. Порог срабатывания блокирующего органа отстраивается от установившегося значения приращения в режиме качаний или асинхронного хода:

$$\Delta I_{1\text{бл}} = k_{\text{отс}} \cdot \Delta I_{\text{кач уст}},$$

где $k_{\text{отс}} = 2 \div 4$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$\Delta I_{\text{кач уст}}$ – максимальное установившееся приращение тока прямой последовательности при качаниях, кА.

Максимальное установившееся приращение тока при качаниях определяется следующим образом:

$$\Delta I_{\text{кач уст}} = 2 \cdot I_{\text{кач макс}} \cdot \sin^2\left(\frac{\omega_s \cdot T}{4}\right),$$

где $I_{\text{кач макс}} = \dfrac{2E}{Z_\Sigma}$ – максимальный ток качаний, кА;

$E = 1{,}05 \cdot U_{1\text{ном}}$ – максимальные ЭДС систем по концам ЛЭП, кВ;

$U_{1\text{ном}}$ – номинальное напряжение первичной обмотки ТН, кВ;

$Z_\Sigma = \left|\underline{Z}_{\text{с}1} + \underline{Z}_{\text{л}} + \underline{Z}_{\text{с}2}\right|$ – минимальное суммарное сопротивление между системами, Ом;

$\underline{Z}_{\text{с}i}$ – минимальное полное сопротивление i-й системы, Ом;

$\underline{Z}_{\text{л}}$ – полное сопротивление защищаемой линии, Ом;

$\omega_{\text{s}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{s}}$ – угловая частота скольжения, рад/с;

f_{s} – частота скольжения, Гц;

T – период промышленной частоты, с.

Расчет рекомендуется проводить при частоте скольжения, равной 3 Гц.

2.4.1.5. ИО по приращению тока обратной последовательности

2.4.1.5.1. Порог срабатывания отключающего ИО отстраивается от минимального тока обратной последовательности с учетом требуемого коэффициента чувствительности. Для упрощения расчетов принимается, что в нагрузочном режиме ток обратной последовательности отсутствовал и приращение определяется только током КЗ:

$$\Delta I_{2\,\text{откл}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{ч}}},$$

где $I_{2\,\text{мин}}$ – минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кА.

$k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерения и погрешности расчетов, о.е.;

$k_{\text{ч}} = 1{,}5$ – коэффициент чувствительности, о.е.

2.4.1.5.2. Порог срабатывания блокирующего ИО по приращению тока обратной последовательности рекомендуется отстраивать от максимального небаланса в режиме качаний или асинхронного хода:

$$\Delta I_{2\,\text{бл}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot k_{2\,\text{нб}} \cdot I_{\text{кач макс}},$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерения и погрешности расчетов, о.е.;

$k_{\text{в}} = 0{,}95$ – коэффициент возврата, о.е;

$k_{2\,\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, о.е;

$I_{\text{кач макс}}$ – максимальный ток качаний, кА.

2.4.1.6. Отключающее реле сопротивления

2.4.1.6.1. Угол максимальной чувствительности рассчитывается по формуле:

$$\varphi_{\text{мч}} = \text{arctg}\frac{X_{1\,\text{уд}}}{R_{1\,\text{уд}}},$$

где $R_{1\,\text{уд}}$ и $X_{1\,\text{уд}}$ – соответственно активное и реактивное удельные сопротивления линии прямой последовательности, Ом/км.

2.4.1.6.2. Расчетное сопротивление срабатывания отключающего реле отстраивается от минимального сопротивления в месте

установки полукомплекта:

$$Z_{\text{откл}} = \frac{Z_{\text{раб мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}} \cdot \cos(\varphi_{\text{мч}} - \varphi_{\text{нг}})},$$

где $Z_{\text{раб мин}} = \dfrac{U_{\text{раб мин}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб макс}}}$ – минимальное сопротивление в месте установки защиты в максимальном нагрузочном режиме, Ом;

$U_{\text{раб мин}} = (0{,}9 \div 0{,}95) \cdot U_{\text{ном}}$ – минимальное линейное напряжение в месте установки защиты в максимальном нагрузочном режиме, кВ;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети, кВ;

$k_{\text{отс}} = 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{в}} = 1{,}05$ – коэффициент возврата, о.е.;

$\varphi_{\text{нг}}$ – максимальное значение угла полного сопротивления нагрузки, которое, исходя из $\cos\varphi_{\text{нг}}$, обычно принимают равным 30÷45°.

Реактивное сопротивление срабатывания определяется следующим образом:

$$X_{\text{откл}} = Z_{\text{откл}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}}.$$

Активное сопротивление срабатывания определяется, исходя из отстройки от минимального сопротивления нагрузки линии:

$$R_{\text{откл}} = \frac{1}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot Z_{\text{раб мин}} \cdot \left(\cos\varphi_{\text{нг}} - \frac{\sin\varphi_{\text{нг}}}{tg\,\varphi_{\text{мч}}} \right),$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{в}} = 1{,}05$ – коэффициент возврата, о.е.

2.4.1.6.3. Чувствительность по реактивному сопротивлению срабатывания должна удовлетворять условию:

$$X_{\text{чувст}} \le X_{\text{откл}},$$

где $X_{\text{чувст}}$ – максимальное реактивное сопротивление, которое должна чувствовать защита.

$X_{\text{чувст}}$ выбирается максимальным из двух значений, полученных по следующим условиям:

1) обеспечение чувствительности при КЗ на шинах подстанции ответвления (при наличии на линии ответвлений):

$$X_{\text{чувст}} = 1{,}5 \cdot Z_{\text{отв КЗ}} \cdot \sin \varphi_{\text{мч}} ,$$

где $Z_{\text{отв КЗ}}$ – максимальный замер сопротивления при трехфазном КЗ на шинах подстанции ответвления, Ом. Выбирается максимальным из возможных значений, рассчитанных для каждого i-го ответвления по формуле:

$$Z_{\text{отв КЗ}\,i} = \frac{U_{\text{ост отв}\,i}}{I_{1\,\text{отв}\,i}} ,$$

где $U_{\text{ост отв}\,i}$ – остаточное напряжение при трехфазном КЗ на шинах подстанции i-го ответвления, кВ;

$I_{1\text{отв}i}$ – ток прямой последовательности при трехфазном КЗ на шинах подстанции i-го ответвления, кА.

2) охват характеристикой всей линии:

$$X_{\text{чувст}} = k_{\text{удл}} \cdot X_{1\,\text{уд}} \cdot L ,$$

где L – длина линии, км;

$k_{\text{удл}}$ – коэффициент удлинения, о.е. Берется равным 1,5, если $L \geq 150$, и 2, если $L < 150$.

Если для какого-либо ответвления чувствительность не обеспечивается, т.е. от замыканий за ним отстроиться не удается, на этом ответвлении должен устанавливаться дополнительный полукомплект защиты.

2.4.1.6.4. Угол φ_4 рекомендуется брать равным 5°.

2.4.1.6.5. Коэффициент смещения характеристики срабатывания в третий квадрант рекомендуется брать равным $-0{,}1$ о.е.

2.4.1.7. Орган манипуляции

2.4.1.7.1. Ток органа манипуляции ОМ рассчитывается по выражению:

$$\underline{I}_{\text{м}} = \left(\frac{1}{k_{\text{м}}} \underline{I}_1 + \underline{I}_2 \right) \cdot e^{j\psi_{\text{см}}},$$

где $\underline{I}_1$ – ток прямой последовательности, кА;

$\underline{I}_2$ – ток обратной последовательности, кА;

$k_{\text{м}}$ – коэффициент манипуляции, о.е.;

$\psi_{\text{см}}$ – угол смещения, град.

2.4.1.7.2. Коэффициент манипуляции выбирают по условию обеспечения при несимметричном КЗ преимущественного сравнения фаз токов обратной последовательности.

Для каждого из полукомплектов коэффициент манипуляции вычисляется при двух видах короткого замыкания:

1) двухфазном КЗ на землю по формуле:

$$k_{\text{м}} = k_{\text{н}} \cdot \frac{I_{1\,\text{мин}}^{(1,1)} + I_{\text{раб макс}}}{I_{2\,\text{мин}}^{(1,1)}},$$

где $I_{1\,\text{мин}}^{(1,1)}$ – минимальный ток прямой последовательности в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА;

$I_{2\,\text{мин}}^{(1,1)}$ – минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА;

$k_{\text{н}} = 1{,}5$ – коэффициент надежности.

2) однофазном КЗ по следующему выражению:

$$k_{\text{м}} = k_{\text{н}} \cdot \frac{I_{\text{раб макс}}}{I_{2\,\text{мин}}^{(1)}},$$

где $I_{2\,\text{мин}}^{(1)}$ – минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при однофазном КЗ в конце защищаемой линии, кА.

В качестве максимального рабочего тока рекомендуется брать максимальное из значений токов $I_{\text{раб макс}}$, определяемых для всех концов линии.

Окончательно коэффициент манипуляции $k_{\text{м}}$ выбирается наибольшим из рассчитанных для полукомплектов и обязательно одинаковым для концов ВЛ.

При этом:

- если $k_{\text{м}} \le 6$, то $k_{\text{м}} = 6$;
- если $6 < k_{\text{м}} \le 8$, то $k_{\text{м}} = 8$;
- если $8 < k_{\text{м}} \le 10$, то $k_{\text{м}} = 10$.

2.4.1.7.3. Чувствительность органа манипуляции определяется коэффициентом чувствительности, который выбирается минимальным из полученных по следующим формулам значений:

1) при двухфазном КЗ на землю:

$$k_{\text{ч}} = \frac{\left| I_{2\,\text{мин}}^{(1,1)} - \frac{I_{1\,\text{мин}}^{(1,1)}}{k_{\text{м}}} \right|}{I_{2\,\text{бл(н)}} \cdot I_{1\,\text{ном}}},$$

где $I_{2\,\text{бл(н)}}$ – порог срабатывания блокирующего ИО по току обратной последовательности, о.е.

2) при однофазном КЗ на землю:

$$k_{ч} = \frac{\left| I_{2\,мин}^{(1)} - \frac{I_{раб\,макс}}{k_{м}} \right|}{I_{2\,бл\,(н)} \cdot I_{1\,ном}}.$$

3) при трехфазном КЗ:

$$k_{ч} = \frac{I_{1\,мин}}{k_{м} \cdot I_{2\,бл\,(н)} \cdot I_{1\,ном}},$$

где $I_{1\,мин}$ – минимальный ток в месте установки полукомплекта при трехфазном КЗ в конце защищаемой линии, кА.

Коэффициент чувствительности должен удовлетворять условию $k_{ч} \geq 1{,}3$.

2.4.1.7.4. Угол смещения определяется при наладке.

2.4.1.8. Орган сравнения фаз

Угол блокировки ОСФ определяется максимальным углом между токами манипуляции по концам линии при внешнем замыкании, и его значение зависит от следующих факторов:

- длины линии;
- погрешности трансформаторов тока;
- однотипности полукомплектов защиты.

Порог срабатывания первой ступени ОСФ принимается равным 90°, а угол блокировки второй и третьей степеней выбирается согласно таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Значения угла блокировки

Длина линии, км	Угол блокировки, °
Больше или равна 150	65
От 60 до 150	60
Меньше 60	50

Если у одной из ступеней угол блокировки равен 180° или он больше порога срабатывания предыдущей ступени, то это означает вывод ступени из работы.

2.4.1.9. Выбор выдержек времени

Выдержки времени ДФЗ зависят от того, совместно с каким полукомплектом защиты работает устройство БРЕСЛЕР, и должны принимать значения, приведенные в таблице 2.18.

Таблица 2.8 – Значения выдержек времени ДФЗ

Таймер	Значение в зависимости от противоположного полукомплекта, мс		
	Микропроцессорное устройство		Электромеханическая панель ДФЗ-201
	Аналогичное	Другого производителя	
Тв_блок	600	600	Уточняется при наладке
Тср_откл1	10	20	
Тср_откл2	20	20	
Тср_задерж_ОСФ	50	50	
Тв_продл_ОСФ	35	35	
Тср_срабат	5	20	

2.4.2. Определение положения накладок ДФЗ

Накладки, использующиеся в НВЧЗ, представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Список накладок ДФЗ

№	Назначение	Обозначение	Положение
1	Пуск приемопередатчика при выводе защиты	Пуск_при_выводе	0 – Не пускать 1 – Пускать
2	Пуск приемопередатчика при неисправностях цепей напряжения	Пуск_при_БНН	0 – Не пускать 1 – Пускать
3	Ввод в работу ИО по приращению токов	Пуск_по_dI	0 – Нет 1 – Да
4	Ввод в работу ИО по току нулевой последовательности	Пуск_по_I0	0 – Нет 1 – Да

Программные накладки «**Пуск_при_выводе**» и «**Пуск_при_БНН**» рекомендуется выставлять в положение «Пускать» в целях автоматической блокировки противоположных полукомплектов при выявлении неисправности. Во время наладки или испытаний защиты накладки временно могут быть выставлены в нулевое положение.

Программная накладка «**Пуск_по_dI**» выставляется в положение «Да», если защищаемая линия электропередачи питает тяговую нагрузку и пуск необходимо выполнять от измерительных органов, контролирующих приращения токов.

Программная накладка «**Пуск_по_I0**» выставляется в положение «Да», если измерительный орган по току обратной последовательности не обеспечивает требуемую чувствительность и пуск необходимо выполнять от ИО по току нулевой.

2.5. Примеры расчета параметров срабатывания ДФЗ

2.5.1. Пример расчета параметров срабатывания ДФЗ для одиночной линии с двухсторонним питанием

Для примера рассмотрим линию электропередачи 220 кВ с двухсторонним питанием без ответвлений, представленную на рисунке 2.4. Необходимые параметры сети приведены в таблице 2.10, а расчетные данные – в таблице 2.11.

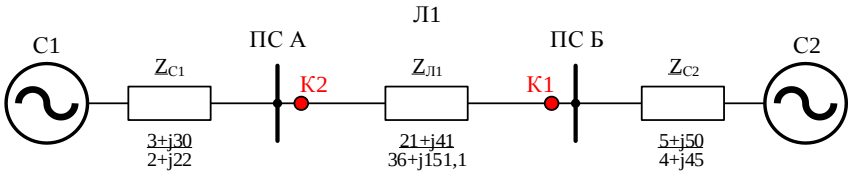

Рисунок 2.4 – Схема защищаемой линии

Таблица 2.10 – Параметры рассматриваемой сети

Параметры и данные линии		Значение
Обозначение	Описание	
$U_{ном}$	Номинальное напряжение сети, кВ	220
$I_{1ном}$	Номинальный первичный ток ТТ, А	300
L	Длина защищаемой линии, км	100
$X_{1уд}$	Удельное реактивное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км	0,41
$R_{1уд}$	Удельное активное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км	0,21

Таблица 2.11 – Расчетные данные для выбора параметров срабатывания

Расчетные величины		Для первого полукомплекта		Для второго полукомплекта	
Обозначение	Описание	Точка КЗ	Значение	Точка КЗ	Значение
$I_{раб\,макс}$	Максимальный рабочий ток, кА	—	0,19	—	0,19
$I_{1\,мин}$	Минимальный ток в месте установки полукомплекта при трехфазном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1	1,76	К2	1,34
$3I_{0\,мин}$	Минимальное значение утроенного тока нулевой последовательности в месте установки защиты при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1	0,95	К2	0,72
$I_{1\,мин}^{(1,1)}$	Минимальный ток прямой последовательности в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА;	К1	1,17	К2	0,91
$I_{2\,мин}^{(1,1)}$	Минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА;	К1	0,59	К2	0,44
$I_{2\,мин}^{(1)}$	Минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при однофазном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1	0,55	К2	0,49
$I_{кач\,макс}$	Максимальный ток качаний, кА	—	2,2	—	2,2

2.5.1.1. Выбор порога срабатывания ИО по току обратной последовательности

2.5.1.1.1. При наличии в нормальном режиме несимметрии по обратной последовательности, составляющей 3% от номинального напряжения, коэффициент $k_{2\,нс}$ будет равен 0,03 о.е. Коэффициент небаланса по току обратной последовательности примем равным

0,03 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. В этом случае порог срабатывания ИО по току обратной последовательности будет равен:

$$I_{2\,\text{бл}\,(н)} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot \left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right) = \frac{1{,}4}{0{,}95} \cdot \left(0{,}03 + 0{,}03\right) = 0{,}09 \text{ о.е.}$$

2.5.1.1.2. Порог срабатывания отключающего ИО по току обратной последовательности:

$$I_{2\,\text{откл}(\text{н})} = k_{\text{отс}} \cdot I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} = 2 \cdot 0{,}09 = 0{,}18 \text{ о.е.}$$

2.5.1.1.3. Чувствительность отключающего ИО по току обратной последовательности для первого полукомплекта проверяется следующим образом:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}55}{0{,}18 \cdot 0{,}3} = 10{,}2\,;$$

а для второго – следующим:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}44}{0{,}18 \cdot 0{,}3} = 8{,}1\,.$$

Так как $k_{\text{ч}} > 2$, то на втором конце линии, где коэффициент чувствительности ниже, загрубляем его до $k_{\text{ч}} = 2$ и получаем новые значения порогов срабатывания:

$$I_{2\,\text{откл}(\text{н})} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{2 \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}44}{2 \cdot 0{,}3} = 0{,}73 \text{ о.е.;}$$

$$I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} = \frac{I_{2\,\text{откл}(\text{н})}}{k_{\text{отс}}} = \frac{0{,}73}{2} = 0{,}37 \text{ о.е.}$$

Значения порогов срабатывания «**I2_бл**» и «**I2_откл**» в относительных единицах для обоих полукомплектов равны $I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})}$ и $I_{2\,\text{откл}(\text{н})}$ соответственно.

2.5.1.2. Выбор порога срабатывания ИО по разности токов фаз

2.5.1.2.1. Порог срабатывания блокирующего ИО по разности токов фаз отстраивается от максимального рабочего тока всех терминалов и для обоих полукомплектов равен:

$$I_{\text{л бл}} = \sqrt{3} \cdot k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{раб макс}} = \sqrt{3} \cdot 1{,}3 \cdot 0{,}19 = 0{,}43 \text{ кА}.$$

2.5.1.2.2. Порог срабатывания отключающего ИО по разности токов фаз для обоих полукомплектов равен:

$$I_{\text{л откл}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{л бл}} = 1{,}3 \cdot 0{,}43 = 0{,}56 \text{ кА}.$$

2.5.1.2.3. Чувствительность ИО по разности токов фазе для первого полукомплекта проверяется следующим образом:

$$k_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{1\,\text{мин}}}{I_{\text{л откл}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}76}{0{,}56} = 5{,}4\,;$$

для второго – следующим:

$$k_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{1\,\text{мин}}}{I_{\text{л откл}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}34}{0{,}56} = 4{,}1\,.$$

Коэффициент чувствительности для обоих полукомплектов удовлетворяет условию $k_{\text{ч}} \geq 2$.

Значения параметров «**Iса_бл**» и «**Iса_откл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равны $I_{\text{л бл}}$ и $I_{\text{л откл}}$ соответственно.

2.5.1.3. Выбор порога срабатывания ИО по току нулевой последовательности

При обеспечении измерительными органами по току обратной последовательности требуемой чувствительности вводить в работу ИО по току нулевой последовательности не рекомендуется. Здесь расчеты приведены в качестве примера.

2.5.1.3.1. При наличии в нормальном режиме несимметрии по нулевой последовательности, составляющей 3% от номинального напряжения, коэффициент $k_{0\,\text{нс}}$ будет равен 0,03 о.е. Коэффициент небаланса по току нулевой последовательности примем равным 0,05 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. В этом случае порог срабатывания блокирующего ИО по току нулевой последовательности:

$$3I_{0\,\text{бл}\,(\text{н})} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot \left(k_{0\,\text{нб}} + k_{0\,\text{нс}}\right) = \frac{1{,}4}{0{,}95} \cdot \left(0{,}05 + 0{,}03\right) = 0{,}12 \text{ о.е.}$$

2.5.1.3.2. Порог срабатывания отключающего ИО по току нулевой последовательности:

$$3I_{0\,\text{откл}(\text{н})} = 2 \cdot I_{0\,\text{бл}\,(\text{н})} = 2 \cdot 0{,}12 = 0{,}24 \text{ о.е.}$$

2.5.1.3.3. Чувствительность ИО по току нулевой последовательности для первого полукомплекта проверяется следующим образом:

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\,\text{мин}}}{3I_{0\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}95}{0{,}24 \cdot 0{,}3} = 13{,}2\,;$$

для второго – следующим:

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\,\text{мин}}}{3I_{0\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}72}{0{,}24 \cdot 0{,}3} = 10\,.$$

Коэффициент чувствительности для обоих полукомплектов удовлетворяет условию $k_{\text{ч}} \geq 2$. Значения параметров «**3I0_бл**» и «**3I0_откл**» в относительных единицах для обоих полукомплектов равны $I_{0\,\text{бл}\,(\text{н})}$ и $I_{0\,\text{откл}(\text{н})}$ соответственно.

2.5.1.4. Выбор порога срабатывания ИО по приращению тока обратной последовательности

При отсутствии на линии тяговой нагрузки вводить в работу ИО по приращению токов не рекомендуется. Здесь расчеты приведены в качестве примера.

2.5.1.4.1. Порог срабатывания отключающего органа по приращению тока прямой последовательности для первого полукомплекта вычисляется следующим образом:

$$\Delta I_{1\,\text{откл}} = \frac{I_{1\,\text{мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{ч}}} = \frac{1{,}76}{1{,}2 \cdot 1{,}5} = 0{,}98 \text{ кА};$$

для второго – следующим:

$$\Delta I_{1\,\text{откл}} = \frac{I_{1\,\text{мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{ч}}} = \frac{1{,}34}{1{,}2 \cdot 1{,}5} = 0{,}74 \text{ кА}.$$

Значение параметра «**dI1_откл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно наименьшему из полученных значений, т.е. 0,74 кА.

2.5.1.4.2. Порог срабатывания блокирующего органа отстраивается от установившегося значения приращения в режиме качаний или асинхронного хода:

$$\Delta I_{1\,\text{бл}} = k_{\text{отс}} \cdot \Delta I_{\text{кач уст}} = k_{\text{отс}} \cdot 2 \cdot I_{\text{кач макс}} \cdot \sin^2\left(\frac{\omega_s \cdot T}{4}\right) =$$

$$= 2 \cdot 2 \cdot 2{,}2 \cdot \sin^2\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 0{,}02}{4}\right) = 0{,}08 \text{ кА}.$$

Значение порога срабатывания «**dI1_бл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $\Delta I_{1\,\text{бл}}$.

2.5.1.5. Выбор порога срабатывания ИО по приращению тока прямой последовательности

При отсутствии на линии тяговой нагрузки вводить в работу ИО по приращению токов не рекомендуется. Здесь расчеты приведены в качестве примера.

2.5.1.5.1. Порог срабатывания отключающего ИО по приращению тока обратной последовательности для первого полукомплекта вычисляется следующим образом:

$$\Delta I_{2\,\text{откл}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{ч}}} = \frac{0{,}55}{1{,}2 \cdot 1{,}5} = 0{,}31 \text{ кА};$$

для второго – следующим:

$$\Delta I_{2\,\text{откл}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{ч}}} = \frac{0{,}44}{1{,}2 \cdot 1{,}5} = 0{,}24 \text{ кА}.$$

Значение параметра «**dI2_откл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно наименьшему из полученных значений, т.е. 0,24 кА.

2.5.1.5.2. Порог срабатывания блокирующего ИО по приращению тока обратной последовательности отстраиваем от максимального небаланса в режиме качаний или асинхронного хода. Коэффициент небаланса по току обратной последовательности примем равным 0,03 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. Тогда получим следующее значение:

$$\Delta I_{2\,\text{бл}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot k_{2\,\text{нб}} \cdot I_{\text{кач макс}} = \frac{1{,}4}{0{,}95} \cdot 0{,}03 \cdot 2{,}2 = 0{,}1 \text{ кА}.$$

Значение порога срабатывания «**dI2_бл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $\Delta I_{2\,\text{бл}}$.

2.5.1.6. Расчет характеристики срабатывания отключающего реле сопротивления

2.5.1.6.1. Угол максимальной чувствительности вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{\text{мч}} = \text{arctg}\frac{X_{1\,\text{уд}}}{R_{1\,\text{уд}}} = \text{arctg}\frac{0{,}41}{0{,}21} = 63^\circ .$$

Значение параметра «**фмч**» будет равно $\varphi_{\text{мч}}$.

2.5.1.6.2. Полное сопротивление срабатывания отстраивается от минимального сопротивления нагрузки линии, которое для обоих полукомплектов вычисляется следующим образом:

$$Z_{\text{раб мин}} = \frac{U_{\text{раб мин}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб макс}}} = \frac{0{,}95 \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб макс}}} = \frac{0{,}95 \cdot 220}{\sqrt{3} \cdot 0{,}19} = 635{,}09 \text{ Ом.}$$

Расчетное сопротивление срабатывания отключающего реле сопротивления для обоих полукомплектов будет равно:

$$Z_{\text{откл}} = \frac{Z_{\text{раб мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}} \cdot \cos(\varphi_{\text{мч}} - \varphi_{\text{нг}})} = \frac{635{,}09}{1{,}2 \cdot 1{,}05 \cdot \cos(63° - 40°)} = 547{,}57 \text{ Ом.}$$

Параметр срабатывания по реактивной составляющей для обоих полукомплектов вычисляется следующим образом:

$$X_{\text{откл}} = Z_{\text{откл}} \cdot \sin \varphi_{\text{мч}} = 547{,}57 \cdot \sin 63° = 487{,}89 \text{ Ом.}$$

Значение параметра «**Хоткл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $X_{\text{откл}}$.

2.5.1.6.3. Параметр срабатывания по активной составляющей для обоих полукомплектов равен:

$$R_{\text{откл}} = \frac{1}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot Z_{\text{раб мин}} \cdot \left(\cos\varphi_{\text{нг}} - \frac{\sin \varphi_{\text{нг}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{мч}}} \right) =$$

$$= \frac{1}{1{,}5 \cdot 1{,}05} \cdot 635{,}09 \cdot \left(\cos 40° - \frac{\sin 40°}{\operatorname{tg} 63°} \right) = 176{,}83 \text{ Ом.}$$

Значение параметра «**Rоткл**» в первичных величинах равно $R_{\text{откл}}$.

2.5.1.6.4. На линии без ответвлений чувствительность по реактивной составляющей сопротивления для обоих полукомплектов проверяется только по условию охвата характеристикой всей линии:

$$X_{\text{чувст}} = k_{\text{удл}} \cdot X_{1\,\text{уд}} \cdot L = 2 \cdot 0{,}41 \cdot 100 = 82 \text{ Ом.}$$

Для обоих полукомплектов сопротивление чувствительности будет равно 82 Ом, и для обоих же полукомплектов выполняется условие:

$$X_{\text{чувс}} \le X_{\text{откл}},$$

т.е. реле сопротивления проходят по чувствительности.

2.5.1.6.5. Угловые параметры характеристики срабатывания

Для обоих полукомплектов значение параметра «**ф4**» примем равными 5°.

2.5.1.6.6. Коэффициент смещения характеристики

Для обоих полукомплектов значение параметра «**Ксм**» примем равным $-0{,}1$ о.е.

2.5.1.7. Расчет параметров органа манипуляции

2.5.1.7.1. Расчет коэффициента манипуляции

При двухфазном КЗ на землю коэффициент манипуляции для полукомплекта со стороны подстанции А равен:

$$k_{\text{м}} = k_{\text{н}} \cdot \frac{I_{1\,\text{мин}}^{(1,1)} + I_{\text{раб макс}}}{I_{2\,\text{мин}}^{(1,1)}} = 1{,}5 \cdot \frac{1{,}17 + 0{,}22}{0{,}59} = 3{,}5 \text{ о.е.};$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равен:

$$k_{\text{м}} = k_{\text{н}} \cdot \frac{I_{1\,\text{мин}}^{(1,1)} + I_{\text{раб макс}}}{I_{2\,\text{мин}}^{(1,1)}} = 1{,}5 \cdot \frac{0{,}91 + 0{,}22}{0{,}44} = 3{,}8 \text{ о.е.}$$

При однофазном КЗ коэффициент манипуляции для полукомплекта со стороны подстанции А равен:

$$k_{\text{м}} = k_{\text{н}} \cdot \frac{I_{\text{раб макс}}}{I_{2\,\text{мин}}^{(1)}} = 1{,}5 \cdot \frac{0{,}22}{0{,}55} = 0{,}6 \text{ о.е.};$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равен:

$$k_{\text{м}} = k_{\text{н}} \cdot \frac{I_{\text{раб макс}}}{I_{2\,\text{мин}}^{(1)}} = 1{,}5 \cdot \frac{0{,}22}{0{,}49} = 0{,}7 \text{ о.е.}$$

Выбирается наибольшее из полученных значений.

Поскольку оно меньше 6, то для всех полукомплектов коэффициент манипуляции принимается равным:

$$k_{\text{м}} = 6 .$$

2.5.1.7.2. Чувствительность органа манипуляции

При двухфазном КЗ на землю коэффициент чувствительности для полукомплекта со стороны подстанции А равен:

$$k_{\text{ч}} = \frac{\left| I_{2\,\text{мин}}^{(1,1)} - \frac{I_{1\,\text{мин}}^{(1,1)}}{k_{\text{м}}} \right|}{I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{\left| 0{,}59 - \frac{1{,}17}{6} \right|}{0{,}37 \cdot 0{,}3} = 3{,}6 ;$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равен:

$$k_{\text{ч}} = \frac{\left| I_{2\,\text{мин}}^{(1,1)} - \frac{I_{1\,\text{мин}}^{(1,1)}}{\text{k}_{\text{м}}} \right|}{I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{\left| 0{,}44 - \frac{0{,}91}{6} \right|}{0{,}37 \cdot 0{,}3} = 2{,}6 .$$

При однофазном КЗ на землю коэффициент чувствительности для полукомплекта со стороны подстанции А равен:

$$k_{\text{ч}} = \frac{\left| I_{2\,\text{мин}}^{(1)} - \frac{I_{\text{раб}\,\text{макс}}}{k_{\text{м}}} \right|}{I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{\left| 0{,}55 - \frac{0{,}22}{6} \right|}{0{,}37 \cdot 0{,}3} = 4{,}6 ;$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равен:

$$k_{\text{ч}} = \frac{\left| I_{2\,\text{мин}}^{(1)} - \frac{I_{\text{раб}\,\text{макс}}}{k_{\text{м}}} \right|}{I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{\left| 0{,}49 - \frac{0{,}22}{6} \right|}{0{,}37 \cdot 0{,}3} = 4{,}1 .$$

При трехфазном КЗ коэффициент чувствительности для полукомплекта со стороны подстанции А равен:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{1\,\text{мин}}}{k_{\text{м}} \cdot I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{1{,}76}{6 \cdot 0{,}37 \cdot 0{,}3} = 2{,}6 ;$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равен:

$$k_{ч} = \frac{I_{1\,мин}}{k_{м} \cdot I_{2\,бл\,(н)} \cdot I_{1\,ном}} = \frac{1{,}34}{6 \cdot 0{,}37 \cdot 0{,}3} = 2\,.$$

Минимальный коэффициент чувствительности удовлетворяет условию $k_{ч} \geq 1{,}3$. Значение параметра «**Км**» для обоих полукомплектов равно $k_{м}$.

2.5.1.8. Выбор параметров органа сравнения фаз

Для обоих полукомплектов значение параметра «**ОСФ1**» примем равным 90°. Поскольку длина линии не превышает 150 км, то параметрам «**ОСФ2**» и «**ОСФ3**» присваиваем значение 60°.

2.5.2. Пример расчета параметров срабатывания ДФЗ для линии с двухсторонним питанием при наличии ответвления на линии

Для примера возьмем линию 220 кВ с двухсторонним питанием и с тупиковым ответвлением на ЛЭП (рисунок 2.5). На ответвлении установлен трансформатор ТДТН-25000/220 со схемой обмоток Y0/Y/Δ. Нагрузка сторон СН и НН одинаковая и равна 10 МВА с $\cos\varphi = 0{,}8$. Необходимые параметры сети приведены в таблице 2.12, а расчетные данные – в таблице 2.13.

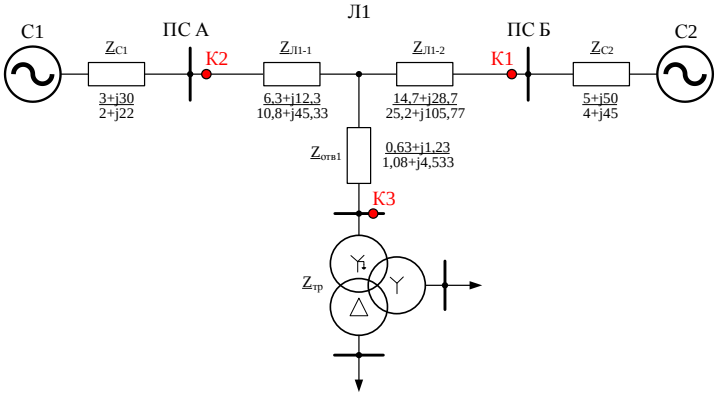

Рисунок 2.5 – Схема защищаемой линии

Таблица 2.12 – Параметры рассматриваемой сети

Параметры и данные линии		Значение
Обозначение	Описание	
$U_{ном}$	Номинальное напряжение сети, кВ	220
$I_{1ном}$	Номинальный первичный ток ТТ, А	300
L_1	Длина линии от подстанции А до ответвления, км	30
L_2	Длина линии от подстанции Б до ответвления, км	70
$L_{отв}$	Длина ответвления, км	3
$X_{1уд}$	Удельное реактивное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км	0,41
$R_{1уд}$	Удельное активное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км	0,21
$R_{0уд}$	Удельное активное сопротивление защищаемой линии нулевой последовательности, Ом/км	0,36
$X_{0уд}$	Удельное реактивное сопротивление защищаемой линии нулевой последовательности, Ом/км	1,151
$B_{1уд}$	Удельная емкостная проводимость линии прямой последовательности, См/км	$2{,}68 \cdot 10^{-6}$
$X_{1удотв}$	Удельное реактивное сопротивление ВЛ ответвления прямой последовательности, Ом/км	0,41
$X_{тр}$	Эквивалентное реактивное сопротивление трансформаторов ответвления, Ом	275

Таблица 2.13 – Расчетные данные для выбора параметров срабатывания

Расчетные величины		Для первого полукомплекта		Для второго полукомплекта	
Обозначение	Описание	Точка КЗ	Значение	Точка КЗ	Значение
$I_{рабмакс}$	Максимальный рабочий ток, кА	—	0,22	—	0,19
$I_{1мин}$	Минимальный ток в месте установки полукомплекта при трехфазном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1	1,77	К2	1,36
$I_{1мин}^{(1,1)}$	Минимальный ток прямой последовательности в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА;	К1	1,16	К2	0,88

Расчетные величины		Для первого полукомплекта		Для второго полукомплекта	
Обозначение	Описание	Точка КЗ	Значение	Точка КЗ	Значение
$I_{2\,мин}^{(1,1)}$	Минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА;	К1	0,59	К2	0,42
$I_{2\,мин}^{(1)}$	Минимальный ток обратной последовательности в месте установки полукомплекта при однофазном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1	0,55	К2	0,48
$3U_{0\,мин}$	Минимальное напряжение нулевой последовательности, кВ	К1/К3	21,12	К2/К3	32,81
$3I_{0\,мин}$	Минимальное значение утроенного тока нулевой последовательности в месте установки защиты при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кА.	К1/К3	0,91	К2/К3	0,73
$U_{ост\,отв}$	Остаточное напряжение при трехфазном КЗ на шинах ответвления, кВ	К3	43,28	К3	50,74
$I_{1отв}$	Ток прямой последовательности при трехфазном КЗ на шинах ответвления, кА	К3	2,98	К3	1,52

Пороги срабатывания всех измерительных органов ДФЗ, за исключением реле сопротивления, должны выбираться одинаковыми для обоих полукомплектов.

2.5.2.1. Выбор порога срабатывания ИО по току обратной последовательности

2.5.2.1.1. При наличии в нормальном режиме несимметрии по обратной последовательности, составляющей 3% от номинального напряжения, коэффициент $k_{2\,нс}$ будет равен 0,03 о.е. Коэффициент небаланса по току обратной последовательности примем равным 0,03 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. В этом случае порог

срабатывания ИО по току обратной последовательности равен:

$$I_{2\,\text{бл}\,(н)} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot \left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right) = \frac{1{,}4}{0{,}95} \cdot \left(0{,}03 + 0{,}03\right) = 0{,}09 \text{ о.е.}$$

2.5.2.1.2. Порог срабатывания отключающего ИО по току обратной последовательности:

$$I_{2\,\text{откл}(\text{н})} = k_{\text{отс}} \cdot I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} = 2 \cdot 0{,}09 = 0{,}18 \text{ о.е.}$$

2.5.2.1.3. Чувствительность отключающего ИО по току обратной последовательности для первого полукомплекта проверяется следующим образом:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}55}{0{,}18 \cdot 0{,}3} = 10{,}2\,;$$

а для второго – следующим:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{откл}(\text{н})} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}42}{0{,}18 \cdot 0{,}3} = 7{,}8\,.$$

Так как $k_{\text{ч}} > 2$, то на втором конце линии, где коэффициент чувствительности ниже, загрубляем его до $k_{\text{ч}} = 2$ и получаем новые значения порогов срабатывания:

$$I_{2\,\text{откл}(\text{н})} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{2 \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}42}{2 \cdot 0{,}3} = 0{,}7 \text{ о.е.;}$$

$$I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})} = \frac{I_{2\,\text{откл}(\text{н})}}{k_{\text{отс}}} = \frac{0{,}7}{2} = 0{,}35 \text{ о.е.}$$

Значения порогов срабатывания «**I2_бл**» и «**I2_откл**» в относительных единицах для обоих полукомплектов равны $I_{2\,\text{бл}\,(\text{н})}$ и $I_{2\,\text{откл}(\text{н})}$ соответственно.

2.5.2.2. Выбор порога срабатывания ИО по разности токов фаз

2.5.2.2.1. Порог срабатывания блокирующего ИО по разности токов фаз отстраивается от максимального рабочего тока всех терминалов и для обоих полукомплектов равен:

$$I_{\text{л бл}} = \sqrt{3} \cdot k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{раб макс}} = \sqrt{3} \cdot 1{,}3 \cdot 0{,}22 = 0{,}5 \text{ кА}.$$

2.5.2.2.2. Порог срабатывания отключающего ИО по разности токов фаз для обоих полукомплектов равен:

$$I_{\text{л откл}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{л бл}} = 1{,}3 \cdot 0{,}5 = 0{,}65 \text{ кА}.$$

2.5.2.2.3. Чувствительность ИО по разности токов фазе для первого полукомплекта проверяется следующим образом:

$$k_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{1\,\text{мин}}}{I_{\text{л откл}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}77}{0{,}65} = 4{,}7\ ;$$

для второго – следующим:

$$k_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{1\,\text{мин}}}{I_{\text{л откл}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}36}{0{,}65} = 3{,}6\ .$$

Коэффициент чувствительности для обоих полукомплектов удовлетворяет условию $k_{\text{ч}} \geq 2$.

Значения параметров «**Iса_бл**» и «**Iса_откл**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равны $I_{\text{л бл}}$ и $I_{\text{л откл}}$ соответственно.

2.5.2.3. Выбор порога срабатывания ИО по току нулевой последовательности

При обеспечении измерительными органами по току обратной последовательности требуемой чувствительности вводить в работу ИО по току нулевой последовательности не рекомендуется. Расчет данного ИО приведен в предыдущем примере.

2.5.2.4. Выбор порога срабатывания ИО по приращению тока обратной последовательности

При отсутствии на линии тяговой нагрузки вводить в работу ИО по приращению токов не рекомендуется. Расчет данного ИО приведен в предыдущем примере.

2.5.2.5. Выбор порога срабатывания ИО по приращению тока прямой последовательности

При отсутствии на линии тяговой нагрузки вводить в работу ИО по приращению токов не рекомендуется. Расчет данного ИО приведен в предыдущем примере.

2.5.2.6. Расчет характеристики срабатывания отключающего реле сопротивления

2.5.2.6.1. Угол максимальной чувствительности вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{\text{мч}} = \text{arctg}\frac{X_{1\,\text{уд}}}{R_{1\,\text{уд}}} = \text{arctg}\frac{0{,}41}{0{,}21} = 63^\circ .$$

Значение параметра «**фмч**» равно $\varphi_{\text{мч}}$.

2.5.2.6.2. Полное сопротивление срабатывания отстраивается от минимального сопротивления нагрузки линии, которое для полукомплекта со стороны подстанции А вычисляется следующим образом:

$$Z_{\text{раб мин}1} = \frac{U_{\text{раб мин}}}{\sqrt{3}\cdot I_{\text{раб макс}}} = \frac{0{,}95\cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\cdot I_{\text{раб макс}}} = \frac{0{,}95\cdot 220}{\sqrt{3}\cdot 0{,}22} = 548{,}48 \text{ Ом};$$

а стороны подстанции Б:

$$Z_{\text{раб мин}2} = \frac{U_{\text{раб мин}}}{\sqrt{3}\cdot I_{\text{раб макс}}} = \frac{0{,}95\cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\cdot I_{\text{раб макс}}} = \frac{0{,}95\cdot 220}{\sqrt{3}\cdot 0{,}19} = 635{,}09 \text{ Ом}.$$

Расчетное сопротивление срабатывания отключающего реле сопротивления для полукомплекта со стороны подстанции А равно:

$$Z_{\text{откл1}} = \frac{Z_{\text{раб мин1}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}} \cdot \cos(\varphi_{\text{мч}} - \varphi_{\text{нг}})} = \frac{548{,}48}{1{,}2 \cdot 1{,}05 \cdot \cos(63° - 40°)} = 472{,}89 \text{ Ом};$$

а со стороны подстанции Б равно:

$$Z_{\text{откл2}} = \frac{Z_{\text{раб мин 2}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}} \cdot \cos(\varphi_{\text{мч}} - \varphi_{\text{нг}})} = \frac{635{,}09}{1{,}2 \cdot 1{,}05 \cdot \cos(63° - 40°)} = 547{,}57 \text{ Ом}.$$

Для каждого полукомплекта получаем следующие значения параметра срабатывания по реактивной составляющей:

$$X_{\text{откл1}} = Z_{\text{откл1}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} = 472{,}89 \cdot \sin 63° = 421{,}35 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{откл2}} = Z_{\text{откл2}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} = 547{,}57 \cdot \sin 63° = 487{,}89 \text{ Ом}.$$

Значение параметра «**Хоткл**» в первичных величинах для первого полукомплекта будет равно $X_{\text{откл1}}$, а для второго – $X_{\text{откл 2}}$.

2.5.2.6.3. Параметр срабатывания по активной составляющей для полукомплекта со стороны подстанции А равен:

$$R_{\text{откл1}} = \frac{1}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot Z_{\text{раб мин1}} \cdot \left(\cos\varphi_{\text{нг}} - \frac{\sin\varphi_{\text{нг}}}{\operatorname{tg}\varphi_{\text{мч}}} \right) =$$

$$= \frac{1}{1{,}5 \cdot 1{,}05} \cdot 548{,}48 \cdot \left(\cos 40° - \frac{\sin 40°}{\operatorname{tg} 63°} \right) = 152{,}71 \text{ Ом};$$

а стороны подстанции Б равен:

$$R_{\text{откл2}} = \frac{1}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot Z_{\text{раб мин 2}} \cdot \left(\cos\varphi_{\text{нг}} - \frac{\sin\varphi_{\text{нг}}}{\operatorname{tg}\varphi_{\text{мч}}} \right) =$$

$$= \frac{1}{1{,}5 \cdot 1{,}05} \cdot 635{,}09 \cdot \left(\cos 40° - \frac{\sin 40°}{\operatorname{tg} 63°} \right) = 176{,}83 \text{ Ом}.$$

Значения параметра «**Rоткл**» в первичных величинах для первого полукомплекта равно $R_{\text{откл1}}$, а для второго – $R_{\text{откл 2}}$.

2.5.2.6.4. Чувствительность по реактивной составляющей

сопротивления для каждого полукомплекта проверяется по двум условиям:

1) обеспечение чувствительности при КЗ на шинах подстанции ответвления;
2) охват характеристикой всей линии.

По первому условию сопротивление чувствительности для полукомплекта со стороны подстанции А равно:

$$X_{\text{чувст}} = 1{,}5 \cdot Z_{\text{отвКЗ}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} = 1{,}5 \cdot \frac{U_{\text{остотв}}}{I_{1\text{отв}}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} =$$

$$= 1{,}5 \cdot \frac{43{,}28}{2{,}98} \cdot \sin 63° = 19{,}41 \text{ Ом.}$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равно:

$$X_{\text{чувст}} = 1{,}5 \cdot Z_{\text{отвКЗ}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} = 1{,}5 \cdot \frac{U_{\text{остотв}}}{I_{1\text{отв}}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} =$$

$$= 1{,}5 \cdot \frac{50{,}74}{1{,}52} \cdot \sin 63° = 44{,}61 \text{ Ом.}$$

По второму условию сопротивление чувствительности для обоих полукомплектов будет равно:

$$X_{\text{чувст}} = k_{\text{удл}} \cdot X_{1\text{уд}} \cdot L = 2 \cdot 0{,}41 \cdot 100 = 82 \text{ Ом.}$$

Для обоих полукомплектов сопротивление чувствительности будет равно 82 Ом, и для обоих же полукомплектов выполняется условие:

$$X_{\text{чувст}} \le X_{\text{откл}},$$

т.е. реле сопротивления проходят по чувствительности.

2.5.2.6.5. Угловые параметры характеристики срабатывания

Для обоих полукомплектов значение параметра «**ф4**» примем равными 5°.

2.5.2.6.6. Коэффициент смещения характеристики

Для обоих полукомплектов значение параметра «**Ксм**» примем равным $-0{,}1$ о.е.

2.5.2.7. Расчет параметров органа манипуляции

2.5.2.7.1. Расчет коэффициента манипуляции

При двухфазном КЗ на землю коэффициент манипуляции для полукомплекта со стороны подстанции А равен:

$$k_{\text{м}} = k_{\text{н}} \cdot \frac{I_{1\,\text{мин}}^{(1,1)} + I_{\text{раб макс}}}{I_{2\,\text{мин}}^{(1,1)}} = 1{,}5 \cdot \frac{1{,}16 + 0{,}22}{0{,}59} = 3{,}5 \text{ о.е.}$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равен:

$$k_{\text{м}} = k_{\text{н}} \cdot \frac{I_{1\,\text{мин}}^{(1,1)} + I_{\text{раб макс}}}{I_{2\,\text{мин}}^{(1,1)}} = 1{,}5 \cdot \frac{0{,}88 + 0{,}22}{0{,}42} = 3{,}9 \text{ о.е.}$$

При однофазном КЗ коэффициент манипуляции для полукомплекта со стороны подстанции А равен:

$$k_{\text{м}} = k_{\text{н}} \cdot \frac{I_{\text{раб макс}}}{I_{2\,\text{мин}}^{(1)}} = 1{,}5 \cdot \frac{0{,}22}{0{,}55} = 0{,}6 \text{ о.е.;}$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равен:

$$k_{\text{м}} = k_{\text{н}} \cdot \frac{I_{\text{раб макс}}}{I_{2\,\text{мин}}^{(1)}} = 1{,}5 \cdot \frac{0{,}22}{0{,}48} = 0{,}7 \text{ о.е.}$$

Выбирается наибольшее из полученных значений. Поскольку оно меньше 6, то для всех полукомплектов коэффициент манипуляции принимается равным:

$$k_{\text{м}} = 6\,.$$

2.5.2.7.2. Чувствительность органа манипуляции

При двухфазном КЗ на землю коэффициент чувствительности для полукомплекта со стороны подстанции А равен:

$$k_{ч} = \frac{\left| I_{2\,мин}^{(1,1)} - \frac{I_{1\,мин}^{(1,1)}}{k_{м}} \right|}{I_{2\,бл\,(н)} \cdot I_{1\,ном}} = \frac{\left| 0,59 - \frac{1,16}{6} \right|}{0,35 \cdot 0,3} = 3,8;$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равен:

$$k_{ч} = \frac{\left| I_{2\,мин}^{(1,1)} - \frac{I_{1\,мин}^{(1,1)}}{k_{м}} \right|}{I_{2\,бл\,(н)} \cdot I_{1\,ном}} = \frac{\left| 0,42 - \frac{0,88}{6} \right|}{0,35 \cdot 0,3} = 2,6.$$

При однофазном КЗ на землю коэффициент чувствительности для полукомплекта со стороны подстанции А равен:

$$k_{ч} = \frac{\left| I_{2\,мин}^{(1)} - \frac{I_{раб\,макс}}{k_{м}} \right|}{I_{2\,бл\,(н)} \cdot I_{1\,ном}} = \frac{\left| 0,55 - \frac{0,22}{6} \right|}{0,35 \cdot 0,3} = 4,9;$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равен:

$$k_{ч} = \frac{\left| I_{2\,мин}^{(1)} - \frac{I_{раб\,макс}}{k_{м}} \right|}{I_{2\,бл\,(н)} \cdot I_{1\,ном}} = \frac{\left| 0,48 - \frac{0,22}{6} \right|}{0,35 \cdot 0,3} = 4,2.$$

При трехфазном КЗ коэффициент чувствительности для полукомплекта со стороны подстанции А равен:

$$k_{ч} = \frac{I_{1\,мин}}{k_{м} \cdot I_{2\,бл\,(н)} \cdot I_{1\,ном}} = \frac{1,77}{6 \cdot 0,35 \cdot 0,3} = 2,8;$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равен:

$$k_{ч} = \frac{I_{1\,мин}}{k_{м} \cdot I_{2\,бл\,(н)} \cdot I_{1\,ном}} = \frac{1,36}{6 \cdot 0,35 \cdot 0,3} = 2,2.$$

Минимальный коэффициент чувствительности удовлетворяет условию $k_{ч} \geq 1,3$. Значение параметра «**Км**» для обоих полукомплектов равно $k_{м}$.

2.5.2.8. Выбор параметров органа сравнения фаз

Для обоих полукомплектов значение параметра «**ОСФ1**» примем равным 90°. Поскольку длина линии не превышает 150 км, то параметрам «**ОСФ2**» и «**ОСФ3**» присваиваем значение 60°.

2.6. Продольная дифференциальная защита линии

2.6.1. Выбор параметров срабатывания ДЗЛ

2.6.1.1. Выбор начального порога срабатывания защиты

Начальный порог срабатывания защиты отстраивается от минимального тока КЗ в месте установки защиты с учетом требуемого коэффициента чувствительности:

$$I_{\text{нач}} = \frac{I_{\text{кз мин}}}{k_{\text{ч}}},$$

где $I_{\text{кз мин}}$ – минимальный ток в месте установки защиты в минимальном расчетном режиме, кА;

$k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, принимаемый, согласно [1] (пункт 3.2.21), равным 2, о.е.

За минимальный режим принимается режим неуспешного опробования линии (включение под напряжение только с одного конца) при повреждении на противоположном (отключенном) конце.

Дополнительно для предотвращения излишнего срабатывания защиты при обрыве токовых цепей рекомендуется проверить отстройку начального порога срабатывания от максимального рабочего тока:

$$I_{\text{нач}} \geq k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{раб макс}},$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$I_{\text{раб макс}}$ – максимальный рабочий ток, кА.

Если данное условие не выполняется, то защита может излишне срабатывать при обрыве токовых цепей.

2.6.1.2. Определение границы первого участка тормозной характеристики

Границу первого участка тормозной характеристики выбирают равной минимальному из двух значений, определяемых, исходя из отстройки от максимального рабочего тока:

$$I_{т1} = I_{рабмакс};$$

и отстройки от минимального сквозного тока внешнего КЗ:

$$I_{т1} = I_{внешмин},$$

где $I_{внешмин}$ – минимальный сквозной ток при внешнем КЗ, кА.

При работе защиты по трехконцевой схеме для каждого полукомплекта рекомендуется брать свою величину $I_{внешмин}$.

2.6.1.3. Определение границы второго участка тормозной характеристики

Границу второго участка тормозной характеристики рекомендуется принимать равной максимальному сквозному току внешнего КЗ:

$$I_{т2} = I_{внешмакс},$$

где $I_{внешмакс}$ – максимальный сквозной ток при внешнем КЗ, кА.

При работе защиты по трехконцевой схеме для каждого полукомплекта рекомендуется брать свою величину $I_{внешмакс}$.

2.6.1.4. Коэффициент торможения первого наклонного участка

Коэффициент торможения первого наклонного участка рекомендуется рассчитывать по выражению:

$$k_{т1} = \frac{I_{расч} - I_{нач}}{I_{т2} - I_{т1}},$$

где $I_{расч}$ – максимальный расчетный дифференциальный ток при внешнем КЗ, кА.

Расчетный дифференциальный ток при внешнем КЗ определяется следующим образом:

$$I_{\text{расч}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб расч}} = k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{сх}} \cdot k_{\text{пер}} \cdot \varepsilon \cdot I_{\text{внеш макс}},$$

где $I_{\text{нб расч}}$ – расчетный ток небаланса в режиме внешнего КЗ;

$k_{\text{отс}} = 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{сх}}$ – коэффициент схемы, равный 1 при работе защиты по двухконцевой схеме и 2 – по трехконцевой, о.е.;

$k_{\text{пер}} = 2{,}5$ – коэффициент, учитывающий переходный режим, о.е.;

$\varepsilon = 0{,}1$ – относительное значение полной погрешности ТТ, о.е.

2.6.1.5. Коэффициент торможения второго наклонного участка

Коэффициент торможения второго наклонного участка $k_{\text{т}2}$ рекомендуется принимать равным коэффициенту торможения первого наклонного участка при $k_{\text{т}1} \geq 1$.

При $k_{\text{т}1} < 1$ коэффициент торможения второго наклонного участка принимается равным 1.

2.6.1.6. Эквивалентный коэффициент торможения

После выбора коэффициентов $k_{\text{т}1}$ и $k_{\text{т}2}$ необходимо рассчитать эквивалентный коэффициент торможения для рабочей точки характеристики, соответствующей режиму неуспешного опробования линии при замыкании в начале ЛЭП:

$$k_{\text{т экв}} = \frac{I^{\text{Т}}_{\text{устмакс}}}{I_{\text{торммакс}}},$$

где $I_{\text{торммакс}}$ – максимальный тормозной ток, равный максимальному току короткого замыкания в месте установки полукомплекта в рассматриваемом режиме, кА;

$I^{\text{Т}}_{\text{устмакс}}$ – порог срабатывания при максимальном токе торможения, кА.

В данном режиме дифференциальный и тормозной токи определяются током только одного полукомплекта защиты, а потому условия по чувствительности будут наихудшими.

Эквивалентный коэффициент торможения должен быть меньше 0,9. Выполнение данного условия будет гарантировать срабатывание ДЗЛ в рассматриваемом режиме.

2.6.1.7. Выбор угла блокировки

Угол блокировки рекомендуется брать равным 60°.

2.6.1.8. Выбор выдержек времени

Время срабатывания дифференциальных реле с торможением «**Тср_ДЗЛ**» рекомендуется отстраивать от максимального времени передачи данных по каналам связи защиты:

$$T_{\text{ср ДЗЛ}} = T_{\text{КС макс}} + T_{\text{зап}},$$

где $T_{\text{КС макс}}$ – максимальное время передачи данных по каналам связи, с;

$T_{\text{зап}}$ – время запаса, принимаемое равным 5, мс.

При этом для исключения излишнего срабатывания реле во время переходных процессов, значение выдержки времени не должно быть меньше 20 мс.

Конкретное значение выдержки времени должно уточняться в ходе пуско-наладочных работ.

2.6.2. Определение положения накладок и переключателей ДЗЛ

Накладки и переключатели, использующиеся в ДЗЛ, представлены в таблице 2.14.

Для полукомплектов ДЗЛ, установленных со стороны питающих концов ЛЭП, программный переключатель «**Контр_вкл_ф**» рекомендуется выставлять в положение «Ток фазы». В случае тупиковых подстанций рекомендуется контролировать сигнал блок-контактов выключателя, а конкретное положение программного переключателя должно определяться проектом защиты.

Программный переключатель «**Углов_блок**» в случае двухконцевой схемы защиты, а также для полукомплектов со

стороны тупиковых подстанций, рекомендуется выставлять в положение «Нет». В трехконцевой схеме для полукомплектов, запроектированных для работы в трехконцевом режиме, рекомендуется выбирать положение «Схема», а для полукомплектов, запроектированных для работы в двухконцевом режиме, – положение «Есть».

Таблица 2.14 – Список накладок и переключателей ДЗЛ

№	Назначение	Обозначение	Положение
Переключатели			
1	Дополнительный контроль включения фазы	Контр_вкл_ф	1 – Ток фазы 2 – РПВ 3 – Инверсный РПО
2	Дополнительный контроль угла между токами	Углов_блок	1 – Нет 2 – Есть 3 – Схема
Накладки			
3	Контроль соответствия положения БИ и переключателей	Контр_соотв	0 – Не контролировать 1 – Контролировать
4	Выбор схемы РУ	Схема_РУ	0 – 1В на присоединение 1 – 2В на присоединение
5	Контроль оперативного питания полукомплекта	Контр_пит	0 – Не контролировать 1 – Контролировать

Программная накладка «**Контр_соотв**» выставляется в положение «Контролировать» в том случае, когда токовые цепи, а также ряд дискретных сигналов с выключателя зависят от текущей схемы распределительного устройства подстанции и, как следствие, от определенного положения крышек испытательных блоков и оперативных переключателей шкафа защиты.

Состояние программной накладки «**Схема_РУ**» определяется количеством токовых присоединений, подведенных к устройству, что, в свою очередь, зависит от схемы подключения к ТТ.

Программную накладку «**Контр_пит**» рекомендуется вводить в том случае, когда протокол передачи данных в АСУ ТП

предполагает формирование признака достоверности входных дискретных сигналов.

2.7. Примеры расчета параметров срабатывания ДЗЛ

2.7.1. Пример расчета параметров срабатывания ДЗЛ на одиночной линии с двухсторонним питанием

Для примера рассмотрим линию электропередачи 220 кВ с двухсторонним питанием без ответвлений, представленную на рисунке 2.6. Примем, что опробование линии осуществляется со стороны подстанции А. Необходимые параметры сети приведены в таблице 2.15, а расчетные данные – в таблице 2.16.

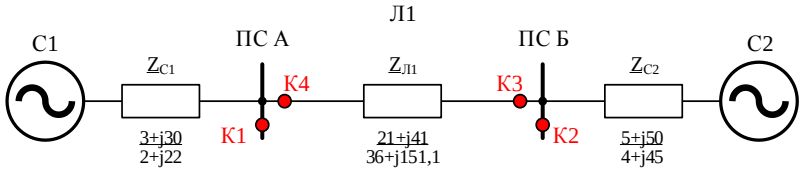

Рисунок 2.6 – Схема защищаемой линии

Таблица 2.15 – Параметры рассматриваемой сети

Параметры и данные линии		Значение
Обозначение	Описание	
$U_{ном}$	Номинальное напряжение сети, кВ	220
$I_{1ном}$	Номинальный первичный ток ТТ, А	300
L	Длина защищаемой линии, км	100
$B_{1уд}$	Удельная емкостная проводимость линии прямой последовательности, См/км	$2{,}68 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2.16 – Расчетные данные для выбора параметров срабатывания

Расчетные величины		Для первого полукомплекта		Для второго полукомплекта	
Обозначение	Описание	Точка КЗ	Значение	Точка КЗ	Значение
$I_{\text{раб макс}}$	Максимальный рабочий ток, кА	—	0,19	—	0,19
$I_{\text{внешмин}}$	Минимальный сквозной ток при внешнем КЗ, кА	К1	0,48	К1	0,48
$I_{\text{внешмакс}}$	Максимальный сквозной ток при внешнем КЗ, кА	К2	1,85	К2	1,85
$I_{\text{КЗ мин}}$	Минимальный ток КЗ в режиме неуспешного опробования линии, кА	К3	0,92	—	—
$I_{\text{КЗ макс}}$	Максимальный ток КЗ в режиме неуспешного опробования линии, кА	К4	4,41	—	—

2.7.1.1. Выбор начального порога срабатывания защиты

Начальный порог срабатывания отстраиваем от минимального тока КЗ в режиме опробования линии:

$$I_{\text{нач}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}}{k_{\text{ч}}} = \frac{0{,}92}{2} = 0{,}46 \text{ кА}.$$

Дополнительно проверяем отстройку от максимального рабочего тока:

$$k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{раб макс}} = 1{,}2 \cdot 0{,}19 = 0{,}23 \text{ кА}.$$

Поскольку полученное значение меньше начального порога срабатывания, защита не будет излишне срабатывать при обрыве токовых цепей.

Значение порога срабатывания «**Інач**» в первичных величинах для обоих полукомплектов берем равным $I_{\text{нач}}$.

2.7.1.2. Определение границы первого участка тормозной характеристики

Границу первого участка тормозной характеристики выбираем равной минимальному из двух значений:

$$I_{\text{т1}} = \min\left(I_{\text{раб макс}}; I_{\text{внешмин}}\right) = \min\left(0{,}19; 0{,}48\right) = 0{,}19 \text{ кА}.$$

Значение параметра «**Iт1**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $I_{т1}$.

2.7.1.3. Определение границы второго участка тормозной характеристики

Граница второго участка тормозной характеристики берется равной максимальному сквозному току внешнего КЗ:

$$I_{т2} = I_{внешмакс} = 1{,}85 \text{ кА}.$$

Значение параметра «**Iт2**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $I_{т2}$.

2.7.1.4. Коэффициент торможения первого наклонного участка

Расчетный дифференциальный ток при внешнем КЗ определяется следующим образом:

$$I_{расч} = k_{отс} \cdot I_{нб\,расч} = k_{отс} \cdot k_{сх} \cdot k_{пер} \cdot \varepsilon \cdot I_{внешмакс} =$$

$$= 1{,}5 \cdot 1 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}1 \cdot 1{,}85 = 0{,}70 \text{ кА}.$$

Тогда коэффициент торможения первого наклонного участка равен:

$$k_{т1} = \frac{I_{расч} - I_{нач}}{I_{т2} - I_{т1}} = \frac{0{,}70 - 0{,}46}{1{,}85 - 0{,}19} = 0{,}14.$$

Значение коэффициента торможения «**Кт1**» для обоих полукомплектов равно $k_{т1}$.

2.7.1.5. Коэффициент торможения второго наклонного участка

При $k_{т1} < 1$ коэффициент торможения второго наклонного участка принимается равным единице:

$$\mathrm{k}_{т2} = 1.$$

Значение коэффициента торможения «**Кт2**» для обоих полукомплектов равно $k_{т2}$.

2.7.1.6. Эквивалентный коэффициент торможения

Рассчитаем эквивалентный коэффициент торможения при максимальном тормозном токе, равном максимальному току короткого замыкания в начале линии при неуспешном опробовании. Рабочая точка расположена на втором наклонном участке тормозной характеристики ($I_{\text{КЗ макс}} > I_{\text{т2}}$), поэтому:

$$I^{\text{Т}}_{\text{уст расч}} = I_{\text{нач}} + k_{\text{т1}} \cdot \left(I_{\text{т2}} - I_{\text{т1}}\right) + k_{\text{т2}} \cdot \left(I_{\text{КЗ макс}} - I_{\text{т2}}\right) =$$

$$= 0{,}46 + 0{,}14 \cdot \left(1{,}85 - 0{,}19\right) + 1 \cdot \left(4{,}41 - 1{,}85\right) = 3{,}25 \text{ кА}.$$

Эквивалентный коэффициент торможения при этом равен:

$$k_{\text{т экв}} = \frac{I^{\text{Т}}_{\text{уст расч}}}{I_{\text{КЗ макс}}} = \frac{3{,}25}{4{,}41} = 0{,}74 .$$

Полученное значение не превышает 0,9, что гарантирует успешное срабатывание защиты в наихудшем по чувствительности режиме работы.

2.7.1.7. Выбор угла блокировки

Значение порога срабатывания «**фбл**» для обоих полукомплектов примем равным 60°.

2.7.2. Пример расчета параметров срабатывания ДЗЛ на линии с двухсторонним питанием при наличии ответвления на линии

Для примера возьмем линию 220 кВ с двухсторонним питанием и с тупиковым ответвлением на ЛЭП (рисунок 2.7). На ответвлении установлен трансформатор ТДТН-25000/220 со схемой обмоток Y0/Y/Δ. Нагрузка сторон СН и НН одинаковая и равна 10 МВА с $\cos\varphi = 0{,}8$. Примем, что опробование линии осуществляется со стороны подстанции А. Необходимые параметры сети приведены в таблице 2.17, а расчетные данные – в таблице 2.18.

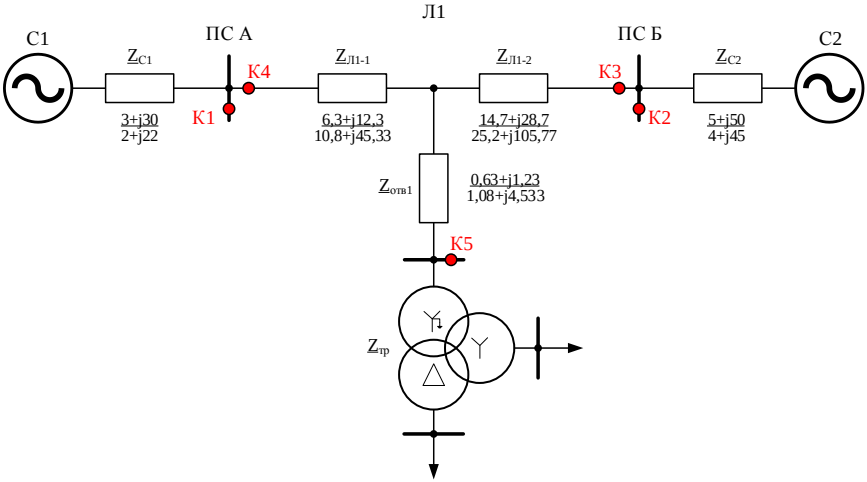

Рисунок 2.7 – Схема защищаемой линии

Таблица 2.17 – Параметры рассматриваемой сети

Параметры и данные линии		Значение
Обозначение	Описание	
$U_{ном}$	Номинальное напряжение сети, кВ	220
$I_{1ном}$	Номинальный первичный ток ТТ, А	300
L_1	Длина линии от подстанции А до ответвления, км	30
L_2	Длина линии от подстанции Б до ответвления, км	70
$L_{отв}$	Длина ответвления, км	3
$R_{1уд}$	Удельное активное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км	0,21
$X_{1уд}$	Удельное реактивное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км	0,41
$R_{0уд}$	Удельное активное сопротивление защищаемой линии нулевой последовательности, Ом/км	0,36
$X_{0уд}$	Удельное реактивное сопротивление защищаемой линии нулевой последовательности, Ом/км	1,151
$B_{1уд}$	Удельная емкостная проводимость линии прямой последовательности, См/км	$2{,}68 \cdot 10^{-6}$
$X_{1удотв}$	Удельное реактивное сопротивление ВЛ ответвления прямой последовательности, Ом/км	0,41
$X_{тр}$	Эквивалентное реактивное сопротивление трансформаторов ответвления, Ом	275

Таблица 2.18 – Расчетные данные для выбора параметров срабатывания

Расчетные величины		Для первого полукомплекта		Для второго полукомплекта	
Обозначение	Описание	Точка КЗ	Значение	Точка КЗ	Значение
$I_{раб\,макс}$	Максимальный рабочий ток, кА	—	0,22	—	0,19
$I_{нагр\,отв}$	Ток нагрузки ответвления, А	—	45	—	45
$I_{внеш\,мин}$	Минимальный сквозной ток при внешнем КЗ, кА	К1	0,48	К1	0,47
$I_{внеш\,макс}$	Максимальный сквозной ток при внешнем КЗ, кА	К2	1,85	К2	1,84
$I_{КЗ\,мин}$	Минимальный ток КЗ в режиме неуспешного опробования линии, кА	К3	0,92	—	—
$I_{КЗ\,макс}$	Максимальный ток КЗ в режиме неуспешного опробования линии, кА	К4	4,41	—	—
$3U_{0\,мин}$	Минимальное напряжение нулевой последовательности, кВ	К3/К5	21,12	К4/К5	32,81
$3I_{0\,мин}$	Минимальный ток нулевой последовательности, кА	К3/К5	0,91	К4/К5	0,73
$U_{ост\,отв}$	Остаточное напряжение при КЗ на шинах ответвления, кВ	К5	43,28	К5	50,74
$I_{1\,мин}^{(1,1)}$	Минимальный ток прямой последовательности в месте установки полукомплекта при двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии, кА;	К3/К5	1,16	К4/К5	0,88

2.7.2.1. Выбор начального порога срабатывания защиты

Начальный порог срабатывания отстраиваем от минимального тока КЗ в режиме опробования линии:

$$I_{нач} = \frac{I_{кз\,мин}}{k_ч} = \frac{0{,}92}{2} = 0{,}46 \text{ кА}.$$

Дополнительно проверяем отстройку от максимального рабочего тока (здесь и далее за $I_{раб\,макс}$ принимаем больший из двух соответствующих токов полукомплектов):

$$k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{раб макс}} = 1{,}2 \cdot 0{,}22 = 0{,}26 \text{ кА}.$$

Поскольку полученное значение меньше начального порога срабатывания, защита не будет излишне срабатывать при обрыве токовых цепей.

Значение порога срабатывания «**Інач**» в первичных величинах для обоих полукомплектов берем равным $I_{\text{нач}}$.

2.7.2.2. Определение границы первого участка тормозной характеристики

Границу первого участка тормозной характеристики выбираем равной минимальному из двух значений:

$$I_{\text{т}1} = \min\left(I_{\text{раб макс}}; I_{\text{внешмин}}\right).$$

В качестве $I_{\text{внешмин}}$ берем меньший из двух соответствующих токов полукомплектов, тогда:

$$I_{\text{т}1} = \min\left(0{,}22; 0{,}47\right) = 0{,}22 \text{ кА}.$$

Значение параметра «**Іт1**» в первичных величинах для обоих полукомплектов будет равно $I_{\text{т}1}$.

2.7.2.3. Определение границы второго участка тормозной характеристики

Граница второго участка тормозной характеристики берется равной максимальному сквозному току внешнего КЗ (здесь и далее за $I_{\text{внешмакс}}$ принимаем максимальный из двух соответствующих токов полукомплектов):

$$I_{\text{т}2} = I_{\text{внешмакс}} = 1{,}85 \text{ кА}.$$

Значение параметра «**Іт2**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $I_{\text{т}2}$.

2.7.2.4. Коэффициент торможения первого наклонного участка

Расчетный дифференциальный ток при внешнем КЗ определяется следующим образом:

$$I_{\text{расч}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб расч}} = k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{сх}} \cdot k_{\text{пер}} \cdot \varepsilon \cdot I_{\text{внешмакс}} =$$

$$= 1{,}5 \cdot 1 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}1 \cdot 1{,}85 = 0{,}70 \text{ кА}.$$

Тогда коэффициент торможения первого наклонного участка равен:

$$k_{\text{т}1} = \frac{I_{\text{расч}} - I_{\text{нач}}}{I_{\text{т}2} - I_{\text{т}1}} = \frac{0{,}70 - 0{,}46}{1{,}85 - 0{,}22} = 0{,}15 .$$

Значение коэффициента торможения «**Кт1**» для обоих полукомплектов равно $k_{\text{т}1}$.

2.7.2.5. Коэффициент торможения второго наклонного участка

При $k_{\text{т}1} < 1$ коэффициент торможения второго наклонного участка принимается равным:

$$k_{\text{т}2} = 1 .$$

Значение порога срабатывания «**Кт2**» в первичных величинах равно $k_{\text{т}2}$.

2.7.2.6. Эквивалентный коэффициент торможения

Рассчитаем эквивалентный коэффициент торможения при максимальном тормозном токе, равном максимальному току короткого замыкания в начале линии при неуспешном опробовании. Рабочая точка расположена на втором наклонном участке тормозной характеристики ($I_{\text{КЗ макс}} > I_{\text{т}2}$), поэтому:

$$I^{\text{Т}}_{\text{уст расч}} = I_{\text{нач}} + k_{\text{т}1} \cdot \left(I_{\text{т}2} - I_{\text{т}1}\right) + k_{\text{т}2} \cdot \left(I_{\text{КЗ макс}} - I_{\text{т}2}\right) =$$

$$= 0{,}46 + 0{,}15 \cdot \left(1{,}85 - 0{,}22\right) + 1 \cdot \left(4{,}41 - 1{,}85\right) = 3{,}26 \text{ кА}.$$

Эквивалентный коэффициент торможения при этом равен:

$$k_{\text{т экв}} = \frac{I^{\text{Т}}_{\text{уст расч}}}{I_{\text{КЗ макс}}} = \frac{3{,}26}{4{,}41} = 0{,}74 .$$

Полученное значение не превышает 0,9, что гарантирует успешное срабатывание защиты в наихудшем по чувствительности режиме работы.

2.7.2.7. Выбор угла блокировки

Значение порога срабатывания «**фбл**» для обоих полукомплектов примем равным 60°.

2.8. Контроль цепей тока

2.8.1. Выбор параметров срабатывания КЦТ

2.8.1.1. Выбор порога срабатывания дифференциального реле

Порог срабатывания дифференциальных реле, используемых для контроля исправности токовых цепей, отстраивается от максимально возможного небаланса в нормальном режиме, который для продольной дифференциальной защиты будет определяться следующим образом:

$$I_{\text{диф нб}} = k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{\text{нб}} \cdot I_{1\,\text{ном}} + I_{\text{сумнагр}} + I_C\right),$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}1$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, учитывающий погрешности ТТ и собственные погрешности измерения терминалами, о.е.;

$I_{1\,\text{ном}}$ – номинальный первичный ток ТТ, кА;

$I_{\text{суммнагр}}$ – суммарный ток нагрузки всех ответвлений, не охваченных полукомплектами ДЗЛ, кА.

$I_C = U_{\text{ф}} \cdot B_{1\,\text{уд}} \cdot L$ – расчетный емкостной ток линии, кА;

$U_{\text{ф}}$ – номинальное фазное напряжение сети, кВ;

$B_{1\,\text{уд}}$ – удельная емкостная проводимость линии прямой последовательности, См/км;

L – длина линии, км. Для многоконцевых линий в качестве длины указывается сумма длин всех участков.

2.8.1.2. Выбор выдержек времени

Выдержка времени «**Тср_КЦТ**» предназначена для отстройки от тока небаланса, обусловленного погрешностью трансформаторов тока при внешнем повреждении, и поэтому должна отстраиваться от максимально возможной длительности внешнего КЗ:

$$T_{\text{срКЦТ}} = T_{\text{внешмакс}} + T_{\text{зап}},$$

где $T_{\text{внешмакс}}$ – максимальное время протекания тока внешнего короткого замыкания, с;

$T_{\text{зап}}$ – время запаса, принимаемое равным 0,1, с.

При определении $T_{\text{внешмакс}}$ необходимо учитывать время работы защит смежных присоединений, шин, силовых трансформаторов, и время полного отключения соответствующих выключателей.

2.8.2. Определение положения накладок КЦТ

Программную накладку «**Вывод_КЦТ**» рекомендуется выставлять в положение «Выводить». Если при наладке орган контроля исправности токовых цепей мешает проводить комплексную проверку логики защиты, накладка на время испытаний может быть выставлена в нулевое положение (таблице 2.19).

Таблица 2.19 – Список накладок КЦТ

Назначение	Обозначение	Положение
Вывод основной защиты при обнаружении неисправности токовых цепей	Вывод_КЦТ	0 – Не выводить 1 – Выводить

2.8.3. Пример расчета параметров срабатывания КЦТ

Исходные данные для расчета параметров срабатывания логики КЦТ взяты из примера, приведенного в п. 2.7.2.

2.8.3.1.1. Выбор порога срабатывания дифференциального реле

Порог срабатывания ИО отстраиваем от максимально возможного небаланса в нормальном режиме, нагрузочного тока ответвления и емкостного тока линии:

$$I_{\text{диф нб}} = k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{\text{нб}} \cdot I_{1\,\text{ном}} + I_{\text{суммнагр}} + I_C\right) =$$

$$= k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{\text{нб}} \cdot I_{1\,\text{ном}} + I_{\text{суммнагр}} + \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \cdot B_{1\,\text{уд}} \cdot \left(L_1 + L_2 + L_{\text{отв}}\right) \right) =$$

$$= 1{,}1 \cdot \left(0{,}05 \cdot 0{,}3 + 0{,}045 + \frac{220}{\sqrt{3}} \cdot 2{,}68 \cdot 10^{-6} \cdot (30 + 70 + 3) \right) = 0{,}1 \text{ кА}.$$

Значение порога срабатывания «**Ідиф_нб**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $I_{\text{диф нб}}$.

2.8.3.1.2. Расчет выдержек времени

Считая, что замыкание на смежном участке в худшем случае может быть отключено третьей ступенью дистанционной защиты, имеющей выдержку времени на срабатывание 6 с, а полное время отключения выключателя составляет 0,05 с, получим следующее значение выдержки времени «**Тср_КЦТ**»:

$$T_{\text{ср КЦТ}} = T_{\text{внеш макс}} + T_{\text{зап}} = 6{,}05 + 0{,}1 = 6{,}15 \text{ с}.$$

2.9. Отстройка от замыкания за ответвлением

2.9.1. Выбор параметров срабатывания отстройки от замыкания за ответвлением

Параметры данного органа должны рассчитываться в том случае, если на линии есть тупиковые ответвительные подстанции, не охваченные полукомплектами защиты. При наличии подпитки со стороны ответвления, на ней должен обязательно устанавливаться дополнительный полукомплект защиты.

2.9.1.1. Расчет характеристики срабатывания реле сопротивления

Для каждого полукомплекта параметры реле сопротивления должны рассчитываться и проверятся по чувствительности отдельно.

2.9.1.1.1. Угол максимальной чувствительности $\varphi_{мч}$ рассчитывается по формуле:

$$\varphi_{мч} = \mathrm{arctg}\frac{X_{1уд}}{R_{1уд}},$$

где $R_{1уд}$ и $X_{1уд}$ – соответственно активное и реактивное удельные сопротивления линии прямой последовательности, Ом/км.

2.9.1.1.2. Параметр срабатывания реле по реактивной составляющей выбирается по условию отстройки от КЗ за трансформаторами ответвления:

$$X_{отв} = k_{н} \cdot X_{отстр},$$

где $k_{н} = 0{,}85$ – коэффициент надежности, о.е.;

$X_{отстр}$ – сопротивление в месте установки защиты при КЗ за трансформатором ответвления, Ом. Выбирается минимальным из возможных значений, рассчитанных для каждого i-го ответвления по формуле:

$$X_{отстр i} = X_{Л1 i} + \frac{\left(X_{Л3 i} + X_{тр i}\right)}{k_{ток}},$$

где $X_{Л1 i}$ – сопротивление ВЛ от ПС, где установлен полукомплект защиты, для которого выполняется расчет, до i-го ответвления, Ом;

$X_{Л3 i}$ – сопротивление ВЛ от i-го ответвления до трансформатора этого же ответвления, Ом;

$X_{тр i}$ – эквивалентное реактивное сопротивление трансформаторов i-го ответвления, Ом;

$k_{\text{ток}}$ – коэффициент токораспределения, о.е. Принимается равным 1, так как второй конец линии принимается отключенным.

2.9.1.1.3. Параметр срабатывания по активной составляющей $R_{\text{отв}}$ определяется исходя из отстройки от минимального сопротивления нагрузки линии:

$$R_{\text{отв}} = \frac{1}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot Z_{\text{раб мин}} \cdot \left(\cos\varphi_{\text{нг}} - \frac{\sin\varphi_{\text{нг}}}{tg\,\varphi_{\text{мч}}} \right),$$

где $Z_{\text{раб мин}} = \dfrac{U_{\text{раб мин}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб макс}}}$ – минимальное сопротивление в месте установки защиты в максимальном нагрузочном режиме, Ом;

$U_{\text{раб мин}} = (0{,}9 \div 0{,}95) \cdot U_{\text{ном}}$ – минимальное линейное напряжение в месте установки защиты в максимальном нагрузочном режиме, кВ;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети, кВ;

$k_{\text{отс}} = 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{в}} = 1{,}05$ – коэффициент возврата, о.е.;

$\varphi_{\text{нг}}$ – максимальное значение угла полного сопротивления нагрузки, которое, исходя из $\cos\varphi_{\text{нг}}$, обычно принимают равным 30÷45°.

2.9.1.1.4. Чувствительность по реактивной составляющей сопротивления $X_{\text{отв}}$ должна удовлетворять условию:

$$X_{\text{чувст}} \le X_{\text{отв}},$$

где $X_{\text{чувст}}$ – максимальное реактивное сопротивление, которое должна чувствовать защита, Ом.

$X_{\text{чувст}}$ выбирается максимальным из двух значений, полученных по следующим условиям:

1) обеспечение чувствительности при КЗ на шинах подстанции ответвления:

$$X_{\text{чувст}} = 1{,}5 \cdot Z_{\text{отв КЗ}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}},$$

где $Z_{\text{отв КЗ}}$ – максимальный замер сопротивления при трехфазном КЗ на шинах подстанции ответвления, Ом. Выбирается максимальным из возможных значений, рассчитанных для каждого i-го ответвления по формуле:

$$Z_{\text{отв КЗ}\,i} = \frac{U_{\text{ост отв}\,i}}{I_{1\,\text{отв}\,i}},$$

где $U_{\text{ост отв}\,i}$ – остаточное напряжение при трехфазном КЗ на шинах подстанции i-го ответвления, кВ;

$I_{1\,\text{отв}\,i}$ – ток прямой последовательности при трехфазном КЗ на шинах подстанции i-го ответвления, кА.

2) охват характеристикой всей линии:

$$X_{\text{чувст}} = k_{\text{удл}} \cdot X_{1\,\text{уд}} \cdot L,$$

где L – длина линии, км;

$k_{\text{удл}}$ – коэффициент удлинения, о.е. Берется равным 1,5, если $L \geq 150$, и 2, если $L < 150$.

Если для какого-либо ответвления чувствительность не обеспечивается, т.е. от замыканий за ним отстроиться не удается, на этом ответвлении должен устанавливаться дополнительный полукомплект защиты.

2.9.1.1.5. Угловые параметры характеристики срабатывания

Угол φ_2 рекомендуется брать равным 30°.

Угол φ_3 рекомендуется брать равным 120°.

Угол φ_4 рекомендуется брать равным 5°.

2.9.1.1.6. Коэффициент смещения характеристики срабатывания в третий квадрант рекомендуется брать равным $-0{,}1$ о.е.

2.9.1.2. ИО по току нулевой последовательности

2.9.1.2.1. Порог срабатывания ИО по току нулевой последовательности выбирают, исходя из отстройки от тока небаланса нулевой последовательности и несимметрии нагрузочного режима с учетом коэффициента отстройки:

$$3I_{0\,\text{уст(н)}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot \left(k_{0\,\text{нб}} + k_{0\,\text{нс}}\right),$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{в}} = 0{,}95$ – коэффициент возврата, о.е.;

$k_{0\,\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, о.е.;

$k_{0\,\text{нс}} = 0 \div 0{,}03$ – коэффициент несимметрии (при отсутствии источников несимметрии в сети принимается равным нулю), о.е.

2.9.1.2.2. Чувствительность ИО по току нулевой последовательности определяется коэффициентом чувствительности, который вычисляется по формуле:

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\,\text{мин}}}{3I_{0\,\text{уст(н)}} \cdot I_{1\,\text{ном}}},$$

где $3I_{0\,\text{мин}}$ – минимальное утроенное значение тока нулевой последовательности в месте установки полукомплекта при земляном КЗ в конце зоны действия защиты, кА.

Коэффициент чувствительности должен удовлетворять условию $k_{\text{ч}} \geq 2$.

2.9.1.3. Реле направления мощности нулевой последовательности

Реле направления мощности нулевой последовательности задается следующими параметрами:

- $I_{\text{М0(н)}}$ – ток срабатывания ИО по направлению мощности, о.е.;
- $\varphi_{\text{мч 0}}$ – угол максимальной чувствительности по нулевой последовательности, град.;
- $Z_{0\,\text{см}}$ – полное сопротивление смещения, Ом.

2.9.1.3.1. Параметр срабатывания по току равен параметру срабатывания ИО по току нулевой последовательности:

$$I_{\text{М0(н)}} = 3I_{0\,\text{уст(н)}}\,.$$

2.9.1.3.2. Угол максимальной чувствительности по нулевой последовательности вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{\text{мч 0}} = \text{arctg}\frac{X_{0\,\text{уд}}}{R_{0\,\text{уд}}} + 180^{o}\,,$$

где $R_{0\,\text{уд}}$ и $X_{0\,\text{уд}}$ – соответственно активное и реактивное удельные сопротивления линии нулевой последовательности, Ом/км.

2.9.1.3.3. Значение полного сопротивления смещения $Z_{0\,\text{см}}$

Значение напряжения, используемого РНМ, должно обеспечивать необходимую чувствительность и надежность срабатывания при замыкании в зоне действия.

Смещение вводится в том случае, если подводимое к РНМ напряжение не обеспечивает необходимую чувствительность и надежность срабатывания при замыканиях в зоне действия полукомплекта:

$$\frac{3U_{0\,\text{мин}}}{U_{\text{М0}}} < k_{ч}\,,$$

где $3U_{0\,\text{мин}}$ – минимальное утроенное напряжение нулевой последовательности в месте установки полукомплекта при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кВ;

$U_{М0} = 0{,}01 \cdot U_{ном}$ – минимальное напряжение, при котором действует реле направления мощности, кВ;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение сети, кВ;

$k_ч = 1{,}2$ – коэффициент чувствительности, о.е.

В этом случае полное сопротивление смещения определяется следующим образом:

$$Z_{0\,см} = \frac{U_{М0} \cdot k_ч - 3U_{0\,мин}}{3I_{0\,расч}},$$

где $3I_{0\,расч}$ – утроенный ток нулевой последовательности в месте установки полукомплекта при расчетном виде КЗ в конце защищаемой линии, кА. За расчетный вид КЗ принимается тот, при котором был произведен расчет $3U_{0\,мин}$.

Если подводимое к РНМ напряжение обеспечивает необходимую чувствительность, то смещение вводить не нужно:

$$Z_{0\,см} = 0.$$

Активное и индуктивное сопротивления смещения вычисляются следующим образом:

$$R_{0\,см} = -Z_{0\,см} \cdot \cos\varphi_{мч\,0};$$

$$X_{0\,см} = -Z_{0\,см} \cdot \sin\varphi_{мч\,0}.$$

2.9.2. Определение положения накладок отстройки от замыкания за ответвлением

Накладки, использующиеся в логике отстройки от замыкания за ответвлением, представлены в таблице 2.20.

Программная накладка «**ЛЭП_с_отв**» выставляется в положение «Есть», если на защищаемой линии электропередачи есть ответвления, от замыканий за которыми необходимо отстраиваться и которые при этом не охвачены полукомплектами ДЗЛ.

Если в ремонтном режиме, когда питание ответвлений осуществляется со стороны только одного конца ЛЭП, при земляных замыканиях «за спиной» возможно протекание через заземленные нейтрали силовых трансформаторов тока нулевой последовательности, программная накладка «**Контр_напр**» должна выставляться в положение «Контролировать».

Таблица 2.20 – Список накладок отстройки от замыкания за ответвлением

№	Назначение	Обозначение	Положение
1	Наличие ответвлений на ЛЭП	ЛЭП_с_отв	0 – Нет 1 – Есть
2	Необходимость контроля направленности при отстройке от замыканий за ответвлением	Контр_напр	0 – Не контролировать 1 – Контролировать
3	Выбор типа напряжения нулевой последовательности	Тип_3U0	0 – Расчетное 1 – Физическое
4	Выбор типа тока нулевой последовательности	Тип_3I0	0 – Расчетный 1 – Физический

Программными накладками «**Тип_3U0**» и «**Тип_3I0**» рекомендуется выбирать физические значения составляющих нулевой последовательности. Однако во избежание ошибочных действий защиты из-за неправильной фазировки при подключении к устройству соответствующих сигналов, рекомендуется до первого земляного замыкания на защищаемой линии использовать расчетные значения. Также при выборе положений необходимо руководствоваться схемой подключения аналоговых сигналов к устройству, т.к. в некоторых случаях физический ток нулевой последовательности не подключается.

2.9.3. Пример расчета параметров срабатывания отстройки от замыкания за ответвлением

Рассмотрим пример расчета данной логики на основе примера, представленного в пункте 2.5.2.

2.9.3.1. Расчет характеристики срабатывания реле сопротивления для отстройки от КЗ за ответвлениями

2.9.3.1.1. Угол максимальной чувствительности вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{мч} = \mathrm{arctg}\frac{X_{1\,уд}}{R_{1\,уд}} = \mathrm{arctg}\frac{0{,}41}{0{,}21} = 63^\circ .$$

Значение параметра «**фмч_отв**» будет равно $\varphi_{мч}$.

2.9.3.1.2. Параметр срабатывания реле по реактивной составляющей определяется по условию отстройки от КЗ за трансформатором ответвления. Для первого полукомплекта это сопротивления равно:

$$\mathrm{X}_{отстр1} = L_1 \cdot \mathrm{X}_{1\,уд} + \frac{\left(L_{отв} \cdot \mathrm{X}_{1\,удотв} + \mathrm{X}_{тр}\right)}{\mathrm{k}_т} =$$

$$= 30 \cdot 0{,}41 + \frac{\left(3 \cdot 0{,}41 + 275\right)}{1} = 288{,}53 \text{ Ом};$$

для второго:

$$\mathrm{X}_{отстр2} = L_2 \cdot \mathrm{X}_{1\,уд} + \frac{\left(L_{отв} \cdot \mathrm{X}_{1\,удотв} + \mathrm{X}_{тр}\right)}{\mathrm{k}_т} =$$

$$= 70 \cdot 0{,}41 + \frac{\left(3 \cdot 0{,}41 + 275\right)}{1} = 304{,}93 \text{ Ом}.$$

Параметр срабатывания по реактивной составляющей отстраиваем от сопротивления отстройки, и для каждого полукомплекта получаем следующие значения:

$$X_{отв1} = 0{,}85 \cdot X_{отстр1} = 0{,}85 \cdot 288{,}53 = 245{,}01 \text{ Ом};$$

$$X_{отв2} = 0{,}85 \cdot X_{отстр2} = 0{,}85 \cdot 304{,}93 = 259{,}19 \text{ Ом}.$$

Значение параметра «**Хотв**» в первичных величинах первого полукомплекта будет равно $X_{отв1}$, второго – $X_{отв2}$.

2.9.3.1.3. Порог срабатывания по активной составляющей рассчитывается аналогично параметру срабатывания по активной составляющей отключающего реле сопротивления и соответственно для первого и второго полукомплектов равны:

$$R_{\text{отв}1} = R_{\text{откл}1} = 152{,}71 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{отв}2} = R_{\text{откл}2} = 176{,}83 \text{ Ом}.$$

Значение параметра «**Rотв**» в первичных величинах для первого полукомплекта будет равно $R_{\text{отв}1}$, второго – $R_{\text{отв}2}$.

2.9.3.1.4. Чувствительность по реактивной составляющей сопротивления для каждого полукомплекта проверяется по двум условиям:

1) обеспечение чувствительности при КЗ на шинах подстанции ответвления;
2) охват характеристикой всей линии.

По первому условия сопротивление чувствительности для полукомплекта со стороны подстанции А равно:

$$X_{\text{чувст}} = 1{,}5 \cdot Z_{\text{отвКЗ}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} = 1{,}5 \cdot \frac{U_{\text{остотв}}}{I_{1\text{отв}}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} =$$

$$= 1{,}5 \cdot \frac{43{,}28}{2{,}98} \cdot \sin 63° = 19{,}41 \text{ Ом};$$

а для полукомплекта со стороны подстанции Б равно:

$$X_{\text{чувст}} = 1{,}5 \cdot Z_{\text{отвКЗ}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} = 1{,}5 \cdot \frac{U_{\text{остотв}}}{I_{1\text{отв}}} \cdot \sin\varphi_{\text{мч}} =$$

$$= 1{,}5 \cdot \frac{50{,}74}{1{,}52} \cdot \sin 63° = 44{,}61 \text{ Ом}.$$

По второму условию сопротивление чувствительности для обоих полукомплектов равно:

$$X_{\text{чувст}} = k_{\text{удл}} \cdot X_{1\text{уд}} \cdot L = 2 \cdot 0{,}41 \cdot 100 = 82 \text{ Ом}.$$

Для обоих полукомплектов сопротивление чувствительности будет равно 82 Ом, и для обоих же полукомплектов выполняется условие:

$$X_{чувст} \leq X_{отв},$$

т.е. реле сопротивления проходят по чувствительности.

2.9.3.1.5. Угловые параметры характеристики срабатывания

Для обоих полукомплектов значения параметров «**ф2_отв**», «**ф3_отв**» и «**ф4_отв**» примем равными 30°, 120° и 5° соответственно.

2.9.3.1.6. Коэффициент смещения характеристики

Для обоих полукомплектов значение параметра «**Ксм_отв**» примем равным $-0{,}1$ о.е.

2.9.3.2. Выбор порога срабатывания ИО по току нулевой последовательности

2.9.3.2.1. При наличии в нормальном режиме несимметрии по нулевой последовательности, составляющей 3% от номинального напряжения, коэффициент $k_{0\,нс}$ будет равен 0,03 о.е. Коэффициент небаланса по току нулевой последовательности примем равным 0,05 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. В этом случае порог срабатывания ИО по току нулевой последовательности равен:

$$3I_{0\,уст(н)} = \frac{k_{отс}}{k_{в}} \cdot \left(k_{0\,нб} + k_{0\,нс}\right) = \frac{1{,}4}{0{,}95} \cdot \left(0{,}05 + 0{,}03\right) = 0{,}12 \text{ о.е.}$$

2.9.3.2.2. Чувствительность ИО по току нулевой последовательности для первого полукомплекта проверяется следующим образом:

$$k_{ч} = \frac{3I_{0\,мин}}{3I_{0\,уст(н)} \cdot I_{1\,ном}} = \frac{0{,}91}{0{,}12 \cdot 0{,}3} = 25{,}3;$$

для второго – следующим:

$$k_{ч} = \frac{3I_{0\,мин}}{3I_{0\,уст(н)} \cdot I_{1\,ном}} = \frac{0,73}{0,12 \cdot 0,3} = 20,3 .$$

Коэффициент чувствительности для обоих полукомплектов удовлетворяет условию $k_{ч} \geq 2$. Значение порога срабатывания «**3I0**» в относительных единицах для обоих полукомплектов равно $3I_{0\,уст(н)}$.

2.9.3.3. Выбор параметров срабатывания реле направления мощности нулевой последовательности

2.9.3.3.1. Порог срабатывания реле направления мощности берется равным порогу срабатывания ИО по току нулевой последовательности:

$$I_{М0(н)} = 3I_{0\,уст(н)} = 0,12 \text{ о.е.}$$

Значение порога срабатывания «**РНМНП**» в относительных единицах равно $I_{М0(н)}$.

2.9.3.3.2. Угол максимальной чувствительности реле направления мощности нулевой последовательности вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{мч\,0} = \mathrm{arctg}\frac{X_{0\,Л}}{R_{0\,Л}} + 180° = \mathrm{arctg}\frac{1,151}{0,36} + 180° = 253° .$$

Значение порога срабатывания «**фмч0**» равно $\varphi_{мч\,0}$.

2.9.3.3.3. Определение сопротивления смещения

Чувствительность реле направления мощности по напряжению нулевой последовательности для первого полукомплекта проверяется следующим образом:

$$k_{ч} = \frac{3U_{0\,мин}}{U_{М0}} = \frac{3U_{0\,мин}}{0,01 \cdot U_{ном}} = \frac{21,12}{0,01 \cdot 220} = 9,6 ;$$

для второго – следующим:

$$k_{ч} = \frac{3U_{0\,мин}}{U_{М0}} = \frac{3U_{0\,мин}}{0{,}01 \cdot U_{ном}} = \frac{32{,}18}{0{,}01 \cdot 220} = 14{,}6\,,$$

Подводимое к РНМ напряжение обеспечивает необходимую чувствительность и надежность срабатывания ($k_{ч} \geq 1{,}2$) для обоих полукомплектов, поэтому смещение вводить не нужно:

$$Z_{0\,см} = 0\,.$$

Активное и индуктивное сопротивления смещения также равны нулю:

$$R_{0\,см} = -Z_{0\,см} \cdot \cos\varphi_{мч\,0} = 0\,;$$

$$X_{0\,см} = -Z_{0\,см} \cdot \sin\varphi_{мч\,0} = 0\,.$$

Значения параметров «**R0_см**» и «**X0_см**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равны $R_{0\,см}$ и $X_{0\,см}$ соответственно.

2.10. Определение тока точной работы реле сопротивления

2.10.1. Выбор параметра срабатывания логики определения тока точной работы реле сопротивления

Ток точной работы реле сопротивления отстраивается от тока небаланса и емкостного тока линии:

$$I_{тр\,РС} = k_{отс} \cdot \left(k_{нб} \cdot I_{1\,ном} + I_{C}\right),$$

где $k_{отс} = 2$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{нб} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, учитывающий погрешности ТТ и собственные погрешности измерения терминала, о.е.;

$I_{1\,ном}$ – номинальный первичный ток ТТ, кА;

$I_{C} = U_{ф} \cdot B_{1\,уд} \cdot L$ – расчетный емкостной ток линии, кА;

$U_{ф}$ – номинальное фазное напряжение сети, кВ;

$B_{1\,уд}$ – удельная емкостная проводимость линии прямой последовательности, См/км;

L – длина линии, км. Для многоконцевых линий в качестве длины указывается сумма длин всех участков.

Чувствительность ИО по току точной работы проверяется при минимальном токе КЗ в конце защищаемой линии:

$$k_{ч} = \frac{I_{КЗ\,мин}}{I_{тр\,РС}},$$

где $I_{КЗ\,мин}$ – минимальный ток замыкания в конце защищаемой линии при том виде КЗ, на которое должно реагировать реле сопротивления, кА.

Коэффициент чувствительности должен быть не менее 1,5.

2.10.2. Пример расчета параметра срабатывания логики определения тока точной работы реле сопротивления

Рассмотрим пример расчета данной логики на основе примера, представленного в пункте 2.5.2.

Ток точной работы реле сопротивления отстраивается от максимально возможного небаланса в нормальном режиме и емкостного тока линии:

$$I_{тр\,РС} = k_{отс} \cdot \left(k_{нб} \cdot I_{1\,ном} + I_{C}\right) = k_{отс} \cdot \left(k_{нб} \cdot I_{1\,ном} + \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \cdot B_{1\,уд} \cdot L\right) =$$

$$= 2 \cdot \left(0{,}05 \cdot 0{,}3 + \frac{220}{\sqrt{3}} \cdot 2{,}68 \cdot 10^{-6} \cdot 100\right) = 0{,}1 \text{ кА}.$$

Поскольку РС используется для подготовки цепи отключения при симметричных коротких замыканиях, то чувствительность ИО проверяем по отношению к току трехфазного КЗ в конце защищаемой линии. Для первого полукомплекта коэффициент чувствительности равен:

$$k_{ч} = \frac{I_{1\,мин}}{I_{тр\,РС}} = \frac{1{,}76}{0{,}1} = 17{,}6\ ;$$

а для второго:

$$k_{ч} = \frac{I_{1\,мин}}{I_{тр\,РС}} = \frac{1{,}34}{0{,}1} = 13{,}4\ .$$

Для обоих полукомплектов коэффициент чувствительности превышает 1,5. Значение параметра «**Iтр_фф**» в первичных величинах для обоих полукомплектов равно $I_{тр\,РС}$.

2.11. Устройство резервирования при отказе выключателя

2.11.1. Выбор параметров срабатывания УРОВ

2.11.1.1. ИО по минимальному уровню фазного тока

Порог срабатывания реле, контролирующих минимальный уровень фазного тока, отстраивается от тока небаланса и емкостного тока линии:

$$I_{мин} = k_{отс} \cdot \left(k_{нб} \cdot I_{1\,ном} + I_C\right),$$

где $k_{отс} = 1{,}2$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{нб} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, учитывающий погрешности ТТ и собственные погрешности измерения терминала, о.е.;

$I_{1\,ном}$ – номинальный первичный ток ТТ, кА;

$I_C = U_{ф} \cdot B_{1\,уд} \cdot L$ – расчетный емкостной ток линии, кА;

$U_{ф}$ – номинальное фазное напряжение сети, кВ;

$B_{1\,уд}$ – удельная емкостная проводимость линии прямой последовательности, См/км;

L – длина линии, км. Для многоконцевых линий в качестве длины указывается сумма длин всех участков.

Чувствительность УРОВ проверяется при минимальном токе КЗ в конце резервируемой зоны:

$$k_{ч} = \frac{I_{кз\,мин}}{I_{мин}},$$

где $I_{кз\,мин}$ – минимальный ток однофазного короткого замыкания в конце резервируемой зоны, кА.

Если зона резервирования охватывает только защищаемую линию, то коэффициент чувствительности должен быть не менее 1,5, при охвате смежной линии – не менее 1,2.

2.11.1.2. Выбор выдержек времени

Выдержку времени «**Тср_на_себя**» на формирование логикой УРОВ сигнала отключения своего же выключателя рекомендуется выбирать равной 30 мс.

Выдержка времени на срабатывание «**Тср_на_смеж**» выбирается из условий отстройки от времени отключения исправного выключателя:

$$T_{ср\,на\,смеж} = T_{откл\,макс} + T_{в\,ИО} + T_{зап},$$

где $T_{откл\,макс}$ – полное время отключения выключателя, с. При выборе этой уставки необходимо учитывать не только собственное время отключения выключателя, но и времена срабатывания промежуточного реле или контактора, если действие на электромагнит отключения выключателя производится только через него;

$T_{в\,ИО}$ – максимальное время возврата измерительных органов УРОВ, принимаемое равным 0,02, с;

$T_{зап}$ – время запаса, принимаемое равным 0,1, с.

2.11.2. Определение положения накладок УРОВ

Накладки, использующиеся в логике УРОВ, представлены в таблице 2.21.

Состояния программных накладок «**Ввод_УРОВ**» и «**УРОВ_на_себя**» определяются проектом, и положения «Введено» должны выбираться в том случае, когда функцию УРОВ предполагается выполнять через рассматриваемое устройство защиты. Дополнительным условием для выбора положения накладки «**УРОВ_на_себя**» является необходимость формирования сигнала на отключение выключателя защищаемой линии через отдельное выходное реле терминала.

Положение программной накладки «**Контр_выкл**» зависит от того, заводится ли в устройство сигнал «РПВ» или нет.

Таблица 2.21 – Список накладок УРОВ

№	Назначение	Обозначение	Положение
1	Ввод УРОВ	Ввод_УРОВ	0 – Выведено 1 – Введено
2	Ввод действия УРОВ на себя	УРОВ_на_себя	0 – Выведено 1 – Введено
3	Контроль контактов выключателя	Контр_выкл	0 – Не контролировать 1 – Контролировать

2.11.3. Пример расчета параметров срабатывания УРОВ

Исходные данные для расчета параметров срабатывания функции УРОВ взяты из примера, приведенного в пункте 2.5.2.

При реализации индивидуального УРОВ в рассматриваемых терминалах БРЕСЛЕР зоной резервирования будет являться сама защищаемая линия. Минимальный фазный ток, определенный при междуфазном замыкании в конце линии, составляет 1,51 кА. Для отключения линии применяется элегазовый выключатель 220 кВ с полным временем отключения 0,05 с.

2.11.3.1. Расчет порога срабатывания ИО по минимальному уровню фазного тока

Порог срабатывания реле, контролирующих минимальный уровень фазного тока, будет равен:

$$I_{\text{мин}} = k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{\text{нб}} \cdot I_{1\,\text{ном}} + I_C\right) = k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{\text{нб}} \cdot I_{1\,\text{ном}} + \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \cdot B_{1\,\text{уд}} \cdot L\right) =$$

$$= 1{,}1 \cdot \left(0{,}05 \cdot 0{,}3 + \frac{220}{\sqrt{3}} \cdot 2{,}68 \cdot 10^{-6} \cdot 100\right) = 0{,}05 \text{ кА}.$$

Коэффициент чувствительности при выбранной зоне резервирования должен превышать 1,5:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз мин}}}{I_{\text{мин}}} = \frac{1{,}51}{0{,}05} = 30\,.$$

Значение порога срабатывания «**Iф_мин**» в первичных величинах равно $I_{\text{мин}}$.

2.11.3.2. Расчет выдержек времени

Выдержку времени «**Тср_на_себя**» берем равной 0,03 с.

Выдержка времени на срабатывание «**Тср_на_смеж**» будет вычисляться следующим образом:

$$T_{\text{ср на смеж}} = T_{\text{откл макс}} + T_{\text{в ИО}} + T_{\text{зап}} = 0{,}05 + 0{,}02 + 0{,}1 = 0{,}17 \text{ с}.$$

2.12. Блокировка при неисправности цепей напряжения

2.12.1. Выбор параметров срабатывания БНН

2.12.1.1. ИО по напряжению прямой последовательности

Порог срабатывания по напряжению прямой последовательности отстраивают от минимального напряжения, возможного в нормальном режиме работы линии:

$$U_{1\,\text{БНН(н)}} = \frac{U_{\text{раб мин (н)}}}{\sqrt{3} \cdot k_{\text{н}}}\,,$$

где $k_{\text{н}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент надежности, о.е.;

$U_{\text{раб мин (н)}} = (0{,}9 \div 0{,}95)$ – минимальное линейное напряжение в нормальном режиме работы линии, приведенное к номинальному значению, о.е.

2.12.1.2. ИО по напряжению обратной последовательности

Порог срабатывания по напряжению обратной последовательности выбирают, исходя из отстройки от напряжения небаланса обратной последовательности и несимметрии нагрузочного режима с учетом коэффициента отстройки:

$$U_{2\,\text{БНН(н)}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot \left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right),$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е;

$k_{\text{в}} = 0{,}95$ – коэффициент возврата, о.е;

$k_{2\,\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, о.е;

$k_{2\,\text{нс}} = 0 \div 0{,}1$ – коэффициент несимметрии (при отсутствии источников несимметрии в сети принимается равным нулю), о.е.

2.12.1.3. ИО по напряжению нулевой последовательности

Порог срабатывания ИО по току нулевой последовательности выбирают, исходя из отстройки от напряжения небаланса нулевой последовательности и несимметрии нагрузочного режима с учетом коэффициента отстройки:

$$3U_{0\,\text{БНН(н)}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot \left(k_{0\,\text{нб}} + k_{0\,\text{нс}}\right),$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{в}} = 0{,}95$ – коэффициент возврата, о.е.;

$k_{0\,\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, о.е.;

$k_{0\,\text{нс}} = 0 \div 0{,}03$ – коэффициент несимметрии (при отсутствии источников несимметрии в сети принимается равным нулю), о.е.

2.12.1.4. ИО БНН по напряжению

Порог срабатывания измерительного органа БНН по напряжению берется равным порогу срабатывания измерительного органа БНН по напряжению нулевой последовательности:

$$U_{\text{БНН(н)}} = 3U_{0\,\text{БНН(н)}}.$$

2.12.1.5. ИО по отношению напряжения обратной последовательности к напряжению нулевой

Порог срабатывания ИО по отношению напряжения обратной последовательности к напряжению нулевой рекомендуется брать равным 0,1 о.е.

2.12.1.6. ИО по минимальному уровню тока прямой последовательности

Порог срабатывания реле, контролирующих минимальный уровень тока прямой последовательности, отстраивается от тока небаланса и емкостного тока линии:

$$I_{1\,\text{мин БНН}} = k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{\text{нб}} \cdot I_{1\,\text{ном}} + I_C\right),$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, учитывающий погрешности ТТ и собственные погрешности измерения терминала, о.е.;

$I_{1\,\text{ном}}$ – номинальный первичный ток ТТ, кА;

$I_C = U_{\text{ф}} \cdot B_{1\,\text{уд}} \cdot L$ – расчетный емкостной ток линии, кА;

$U_{\text{ф}}$ – номинальное фазное напряжение сети, кВ;

$B_{1\,\text{уд}}$ – удельная емкостная проводимость линии прямой последовательности, См/км;

L – длина линии, км. Для многоконцевых линий в качестве длины указывается сумма длин всех участков.

2.12.1.7. ИО по максимальному уровню тока прямой последовательности

Ток в линии, при котором возможно блокирование, не должен превышать максимальный рабочий ток линии:

$$I_{1\,\text{макс БНН}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{раб макс}},$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2$ – коэффициент отстройки, о.е.

2.12.1.8. ИО по току обратной последовательности

Порог срабатывания ИО по току обратной последовательности в относительных единицах $I_{2\,\text{БНН(н)}}$ рекомендуется брать равным порогу срабатывания измерительного органа БНН по напряжению обратной последовательности:

$$I_{2\,\text{БНН(н)}} = U_{2\,\text{БНН(н)}}.$$

Дополнительно необходимо проверить чувствительность при земляном КЗ в конце зоны действия защиты:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{БНН(н)}} \cdot I_{1\,\text{ном}}},$$

где $I_{2\,\text{мин}}$ – минимальный ток обратной последовательности при земляном КЗ в конце зоны действия защиты, кА;

$I_{1\,\text{ном}}$ – номинальный первичный ток ТТ, кА.

Если зона действия устройства ограничена защищаемой линией, то коэффициент чувствительности должен превышать 1,5, при охвате смежной линии – 1,2. В противном случае применять комбинированный принцип БНН нецелесообразно.

2.12.1.9. ИО по току нулевой последовательности

Порог срабатывания по току нулевой последовательности в относительных единицах $3I_{0\,\text{БНН(н)}}$ рекомендуется брать равным порогу срабатывания измерительного органа БНН по напряжению нулевой последовательности:

$$3I_{0\,\text{БНН(н)}} = 3U_{0\,\text{БНН(н)}}.$$

Дополнительно необходимо проверить чувствительность при земляном КЗ в конце зоны действия защиты:

$$k_{ч} = \frac{3I_{0\,\text{мин}}}{3I_{0\,\text{БНН(н)}} \cdot I_{1\,\text{ном}}},$$

где $3I_{0\,\text{мин}}$ – минимальный ток нулевой последовательности при земляном КЗ в конце зоны действия защиты, кА.

Если зона действия устройства ограничена защищаемой линией, то коэффициент чувствительности должен превышать 1,5, при охвате смежной линии – 1,2. В противном случае применять комбинированный принцип БНН нецелесообразно.

2.12.1.10. ИО по приращению напряжения прямой последовательности

Порог срабатывания ИО по приращению напряжения прямой последовательности рекомендуется отстраивать от измерительного органа по напряжению обратной последовательности:

$$\Delta U_{1\,\text{БНН(н)}} = k_{\text{отс}} \cdot U_{2\,\text{БНН(н)}},$$

где $k_{\text{отс}} = 0{,}7$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$U_{2\,\text{БНН(н)}}$ – порог срабатывания измерительного органа БНН по напряжению обратной последовательности, о.е.

2.12.1.11. ИО по приращению тока прямой последовательности

В зависимости от того, возможен ли на линии асинхронный режим или нет, порог срабатывания измерительного органа по приращению тока прямой последовательности определяется одним из ниже приведенных способов.

1) Порог срабатывания должен отстраиваться от установившегося значения приращения в режиме качаний или асинхронного хода:

$$\Delta I_{1\,\text{БНН}} = k_{\text{отс}} \cdot \Delta I_{\text{качуст}},$$

где $k_{\text{отс}} = 2 \div 4$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$\Delta I_{\text{качуст}}$ – максимальное установившееся приращение тока прямой последовательности при качаниях, кА.

Максимальное установившееся приращение тока при качаниях определяется следующим образом:

$$\Delta I_{\text{качуст}} = 2 \cdot I_{\text{качмакс}} \cdot \sin^2\left(\frac{\omega_s \cdot T}{4}\right),$$

где $I_{\text{кач макс}} = \dfrac{2E}{Z_{\Sigma}}$ – максимальный ток качаний, кА;

$E = 1{,}05 \cdot U_{1\text{ном}}$ – максимальные ЭДС систем по концам ЛЭП, кВ;

$U_{1\text{ном}}$ – номинальное напряжение первичной обмотки ТН, кВ;

$Z_{\Sigma} = \left|\underline{Z}_{\text{с}1} + \underline{Z}_{\text{л}} + \underline{Z}_{\text{с}2}\right|$ – минимальное суммарное сопротивление между системами, Ом;

$\underline{Z}_{\text{с}i}$ – минимальное полное сопротивление i-й системы, Ом;

$\underline{Z}_{\text{л}}$ – полное сопротивление защищаемой линии, Ом;

$\omega_{\text{s}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{s}}$ – угловая частота скольжения, рад/с;

f_{s} – частота скольжения, Гц;

T – период промышленной частоты, с.

Расчет рекомендуется проводить при частоте скольжения, равной 3 Гц.

2) В том случае, если асинхронный режим на линии не возможен, порог срабатывания органа по приращению рекомендуется отстраивать от минимального приращения тока прямой последовательности при трехфазном коротком замыкании с учетом требуемого коэффициента чувствительности. Для упрощения расчетов принимается, что в нагрузочном режиме ток отсутствовал и приращение определяется только током КЗ:

$$\Delta I_{1\,\text{БНН}} = \frac{I_{1\,\text{мин}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{ч}}},$$

где $I_{1\,\text{мин}}$ – минимальный ток прямой последовательности при трехфазном КЗ в конце зоны действия защиты, кА;

$k_{\text{отс}} = 4 \div 5$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, о.е.

Если зона действия устройства ограничена защищаемой линией, то коэффициент чувствительности следует брать равным 1,5, при охвате смежной линии – 1,2.

2.12.1.12. ИО по приращению тока нулевой последовательности

Порог срабатывания ИО по приращению тока нулевой последовательности рекомендуется отстраивать от максимального небаланса:

$$\Delta I_{0\,\text{БНН(н)}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot k_{0\,\text{нб}},$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерения и погрешности расчетов, о.е.;

$k_{\text{в}} = 0{,}95$ – коэффициент возврата, о.е.;

$k_{0\,\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, о.е.

2.12.1.13. Выбор выдержек времени

Выдержку времени «**Тср_БНН**», которая определяет задержку на формирование сигнала, действующего на сигнализацию, рекомендуется принимать равной 5 с.

2.12.2. Определение положения накладок и селекторов БНН

Накладки и селекторы, использующиеся в логике БНН, представлены в таблице 2.22.

Программную накладку «**БНН_зв**» рекомендуется выставлять в положение «Контролировать», если на линии имеются ответвительные подстанции, от замыканий за которыми необходимо отстраиваться.

Программную накладку «**БНН_тр**» рекомендуется выставлять в положение «Контролировать», если на линии имеются ответвительные подстанции, от замыканий за которыми необходимо отстраиваться, и используется физическое напряжение нулевой последовательности.

Положения программной накладки «**Направл_ТН**» и селектора «**Uособ_ТН**» зависят от трансформатора напряжения и потому должны уточняться во время наладки.

Положение программной накладки «**Изолир_нейтр**» должно выбираться в соответствии с режимом нейтрали сети, в которой устанавливается защита.

Таблица 2.22 – Список накладок и селекторов БНН

№	Назначение	Обозначение	Положение
Накладки			
1	Контроль исправности цепей «звезды»	БНН_зв	0 – Не контролировать 1 – Контролировать
2	Контроль исправности цепей «разомкнутого треугольника»	БНН_тр	0 – Не контролировать 1 – Контролировать
3	Направление векторов особой фазы звезды и разомкнутого треугольника ТН	Направл_ТН	0 – Совпадает 1 – Не совпадает
4	Режим нейтрали	Изолир_нейтр	0 – Заземленная 1 – Изолированная
Селекторы			
5	Uособ_ТН	Особая фаза схемы ТН	1 – Ua 2 – Ub 3 – Uc

2.12.3. Пример расчета параметров срабатывания БНН

Таблица 2.23 – Расчетные данные для выбора параметров БНН

Расчетные величины		Значение
Обозначение	Описание	
$I_{2\,мин}$	Минимальный ток обратной последовательности при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кА	0,56
$3I_{0\,мин}$	Минимальный утроенный ток нулевой последовательности при земляном КЗ в конце защищаемой линии, кА	0,95
$I_{кач\,макс}$	Максимальный ток качаний, кА	2,17

Исходные данные для расчета параметров срабатывания логики БНН взяты из примера, приведенного в п. 2.5.2. Дополнительные расчетные данные приведены в таблице 2.23.

2.12.3.1. ИО по напряжению прямой последовательности

Если принять допустимым снижение напряжения на 10% относительно номинального значения, а коэффициент надежности

равным 1,5, то порог срабатывания по напряжению прямой последовательности равен:

$$U_{1\,\text{БНН(н)}} = \frac{U_{\text{раб мин (н)}}}{\sqrt{3}\cdot k_{\text{н}}} = \frac{0{,}9}{\sqrt{3}\cdot 1{,}5} = 0{,}35 \text{ о.е.}$$

Значение порога срабатывания «**U1_БНН**» в относительных единицах равно $U_{1\,\text{БНН(н)}}$.

2.12.3.2. ИО по напряжению обратной последовательности

При наличии в нормальном режиме несимметрии по обратной последовательности, составляющей 3% от номинального напряжения, коэффициент $k_{2\,\text{нс}}$ будет равен 0,03 о.е. Коэффициент небаланса по напряжению обратной последовательности примем равным 0,03 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. В этом случае порог срабатывания ИО по напряжению обратной последовательности равен:

$$U_{2\,\text{БНН(н)}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}}\cdot\left(k_{2\,\text{нб}} + k_{2\,\text{нс}}\right) = \frac{1{,}4}{0{,}95}\cdot\left(0{,}03 + 0{,}03\right) = 0{,}09 \text{ о.е.}$$

Значение порога срабатывания «**U2_БНН**» в относительных единицах равно $U_{2\,\text{БНН(н)}}$.

2.12.3.3. ИО по напряжению нулевой последовательности

При наличии в нормальном режиме несимметрии по нулевой последовательности, составляющей 3% от номинального напряжения, коэффициент $k_{0\,\text{нс}}$ будет равен 0,03 о.е. Коэффициент небаланса по току нулевой последовательности примем равным 0,05 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. В этом случае порог срабатывания ИО по току нулевой последовательности равен:

$$3U_{0\,\text{БНН(н)}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}}\cdot\left(k_{0\,\text{нб}} + k_{0\,\text{нс}}\right) = \frac{1{,}4}{0{,}95}\cdot\left(0{,}05 + 0{,}03\right) = 0{,}12 \text{ о.е.}$$

Значение порога срабатывания «**3U0_БНН**» в относительных единицах равно $3U_{0\,\text{БНН(н)}}$.

2.12.3.4. ИО БНН по напряжению

Порог срабатывания измерительного органа БНН по напряжению берется равным порогу срабатывания измерительного органа БНН по напряжению нулевой последовательности:

$$U_{\text{БНН(н)}} = 3U_{0\,\text{БНН(н)}} = 0{,}12 \text{ о.е.}$$

Значение порога срабатывания «**БНН**» в относительных единицах равно $U_{\text{БНН(н)}}$.

2.12.3.5. ИО по отношению напряжения обратной последовательности к напряжению нулевой

Значение порога срабатывания «**U2/U1**» в относительных единицах берем равным 0,1 о.е.

2.12.3.6. ИО по минимальному уровню тока прямой последовательности

Порог срабатывания реле, контролирующих минимальный уровень тока прямой последовательности, будет равен:

$$I_{1\,\text{мин БНН}} = k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{\text{нб}} \cdot I_{1\,\text{ном}} + I_C\right) = k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{\text{нб}} \cdot I_{1\,\text{ном}} + \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \cdot B_{1\,\text{уд}} \cdot L\right) =$$

$$= 1{,}1 \cdot \left(0{,}05 \cdot 0{,}3 + \frac{220}{\sqrt{3}} \cdot 2{,}68 \cdot 10^{-6} \cdot 100\right) = 0{,}05 \text{ кА.}$$

Значение порога срабатывания «**I1_мин_БНН**» в первичных величинах берем равным $I_{1\,\text{мин БНН}}$.

2.12.3.7. ИО по максимальному уровню тока прямой последовательности

Порог срабатывания измерительного органа, контролирующего максимальный уровень тока, рассчитывается следующим образом:

$$I_{1\,\text{макс БНН}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{раб макс}} = 1{,}2 \cdot 0{,}19 = 0{,}23 \text{ кА.}$$

Значение порога срабатывания «**I1_макс_БНН**» в первичных величинах берем равным $I_{1\,\text{макс БНН}}$.

2.12.3.8. ИО по току обратной последовательности

Порог срабатывания ИО по току обратной последовательности в относительных единицах берем равным порогу срабатывания измерительного органа по напряжению обратной последовательности:

$$I_{2\,\text{БНН(н)}} = U_{2\,\text{БНН(н)}} = 0{,}09 \text{ о.е.}$$

Проверяем чувствительность при земляном КЗ в конце защищаемой линии:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{2\,\text{БНН(н)}} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}56}{0{,}09 \cdot 0{,}3} = 21.$$

Полученное значение превышает 1,5. Значение параметра «**I2_БНН**» в относительных единицах берем равным $I_{2\,\text{БНН(н)}}$.

2.12.3.9. ИО по току нулевой последовательности

Порог срабатывания по току нулевой последовательности в относительных единицах берем равным порогу срабатывания измерительного органа по напряжению нулевой последовательности:

$$3I_{0\,\text{БНН(н)}} = 3U_{0\,\text{БНН(н)}} = 0{,}12 \text{ о.е.}$$

Проверяем чувствительность при земляном КЗ в конце защищаемой линии:

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\,\text{мин}}}{3I_{0\,\text{БНН(н)}} \cdot I_{1\,\text{ном}}} = \frac{0{,}95}{0{,}12 \cdot 0{,}3} = 26.$$

Полученное значение превышает 1,5. Значение параметра «**3I0_БНН**» в относительных единицах берем равным $3I_{0\,\text{БНН(н)}}$.

2.12.3.10. ИО по приращению напряжения прямой последовательности

Порог срабатывания ИО по приращению напряжения прямой последовательности вычисляется следующим образом:

$$\Delta U_{1\,\text{БНН(н)}} = k_{\text{отс}} \cdot U_{2\,\text{БНН(н)}} = 0{,}7 \cdot 0{,}19 = 0{,}13 \text{ о.е.}$$

Значение параметра «**dU1_БНН**» в относительных единицах берем равным $\Delta U_{1\,\text{БНН(н)}}$.

2.12.3.11. ИО по приращению тока прямой последовательности

Порог срабатывания ИО по приращению тока прямой последовательности на линии с двухсторонним питанием отстраиваем от установившегося значения приращения в режиме качаний или асинхронного хода, беря коэффициент отстройки равным 2:

$$\Delta I_{1\,\text{БНН}} = k_{\text{отс}} \cdot \Delta I_{\text{кач уст}} = k_{\text{отс}} \cdot 2 \cdot I_{\text{кач макс}} \cdot \sin^2\left(\frac{\omega_s \cdot T}{4}\right) =$$

$$= 2 \cdot 2 \cdot 2{,}17 \cdot \sin^2\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 0{,}02}{4}\right) = 0{,}08 \text{ кА.}$$

Значение порога срабатывания «**dI1_БНН**» в первичных величинах будет равно $\Delta I_{1\,\text{БНН}}$.

2.12.3.12. ИО по приращению тока нулевой последовательности

Коэффициент небаланса по току обратной последовательности примем равным 0,05 о.е., а коэффициент отстройки – 1,4 о.е. В этом случае порог срабатывания ИО по приращению тока нулевой последовательности будет равен:

$$\Delta I_{0\,\text{БНН(н)}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot k_{0\,\text{нб}} = \frac{1{,}4}{0{,}95} \cdot 0{,}05 = 0{,}07 \text{ о.е.}$$

Значение порога срабатывания «**dI0_БНН**» в относительных единицах будет равно $\Delta I_{0\,\text{БНН(н)}}$.

2.12.3.13. Выбор выдержек времени

Выдержку времени «**Tср_БНН**» принимаем равной 5 с.

2.13. Блокировка при броске тока намагничивания

2.13.1. Выбор параметров срабатывания БТН высокочастотных защит

2.13.1.1. ИО по отношению второй и первой гармоник тока нулевой последовательности

Порог срабатывания ИО по отношению второй и первой гармоник тока нулевой последовательности рекомендуется брать равным 0,15 о.е.

2.13.1.2. ИО по максимальному уровню тока нулевой последовательности

Порог срабатывания измерительного органа по максимальному уровню тока нулевой последовательности вычисляется по формуле:

$$3I_{0\,\text{макс БТН(н)}} = k_{\text{отс}},$$

где $k_{\text{отс}} = 3 \div 5$ – коэффициент отстройки, о.е.

2.13.2. Определение положения накладок БТН высокочастотных защит

Таблица 2.24 – Список накладок функции «БТН» высокочастотных защит

Назначение	Обозначение	Положение
Ввод БТН	Ввод_БТН	0 – Выведена 1 – Введена

Программная накладка «**Ввод_БТН**» должна выставляться в положение «Введена» в том случае, если на защищаемой линии может наблюдаться бросок тока намагничивания (таблица 2.24).

2.13.3. Выбор параметров срабатывания БТН продольной дифференциальной защиты линии

2.13.3.1. ИО по отношению второй и первой гармоник фазного тока

Порог срабатывания ИО по отношению второй и первой гармоник фазного тока рекомендуется брать равным 0,15 о.е.

2.13.3.2. ИО по минимальному уровню фазного тока

Порог срабатывания реле, контролирующих минимальный уровень фазного тока, отстраивается от тока небаланса и емкостного тока линии:

$$I_{\text{мин БТН}} = k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{\text{нб}} \cdot I_{1\,\text{ном}} + I_C\right),$$

где $k_{\text{отс}} = 1{,}2$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$k_{\text{нб}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ – коэффициент небаланса, учитывающий погрешности ТТ и собственные погрешности измерения терминала, о.е.;

$I_{1\,\text{ном}}$ – номинальный первичный ток ТТ, кА;

$I_C = U_{\text{ф}} \cdot B_{1\,\text{уд}} \cdot L$ – расчетный емкостной ток линии, кА;

$U_{\text{ф}}$ – номинальное фазное напряжение сети, кВ;

$B_{1\,\text{уд}}$ – удельная емкостная проводимость линии прямой последовательности, См/км;

L – длина линии, км. Для многоконцевых линий в качестве длины указывается сумма длин всех участков.

2.13.3.3. ИО по максимальному уровню фазного тока

Порог срабатывания измерительных органов, контролирующих максимальный уровень фазных токов, должен отстраиваться от максимально возможного значения тока при рассматриваемом явлении. Величина броска тока вычисляется относительно номинального тока стороны ВН силового трансформатора:

$$I_{\text{макс БТН}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{ном ВН}},$$

где $k_{отс} = 5 \div 6$ – коэффициент отстройки, о.е.;

$I_{ном\,ВН}$ – максимальный из номинальных токов стороны ВН силовых трансформаторов, кА.

2.13.3.4. ИО по отношению второй и первой гармоник тока нулевой последовательности

Порог срабатывания ИО по отношению второй и первой гармоник тока нулевой последовательности рекомендуется брать равным 0,15 о.е.

2.13.3.5. ИО по максимальному уровню тока нулевой последовательности

Порог срабатывания измерительного органа по максимальному уровню тока нулевой последовательности вычисляется по формуле:

$$3I_{0\,макс\,БТН(н)} = k_{отс},$$

где $k_{отс} = 3 \div 5$ – коэффициент отстройки, о.е.

2.13.3.6. Выбор выдержек времени

Величину импульсного таймера «**Ти_перекр_БТН**», определяющего время ввода перекрестной блокировки, рекомендуется выбираться равной 3-8 периодам промышленной частоты. Конкретное значение должно уточняться непосредственно по режимам броска тока намагничивания.

2.13.4. Определение положения накладок БТН продольной дифференциальной защиты линии

Накладки, использующиеся в логике БТН продольной дифференциальной защиты, представлены в таблице 2.25.

Программная накладка «**Ввод_БТН**» должна выставляться в положение «Введена» в том случае, если на защищаемой линии может наблюдаться бросок тока намагничивания.

Программная накладка «**Перекр_БТН**» должна выставляться в положение «Введена» в тех случаях, когда при включении трансформатора бросок тока намагничивания возникает

в одной фазе, а в двух оставшихся уровня второй гармоники для блокирования защиты недостаточно.

Таблица 2.25 – Список накладок БТН продольной дифференциальной защиты

№	Назначение	Обозначение	Положение
1	Ввод БТН	Ввод_БТН	0 – Выведена 1 – Введена
2	Перекрестная блокировка при БТН	Перекр_БТН	0 – Выведена 1 – Введена

2.13.5. Пример расчета параметров срабатывания БТН высокочастотной защиты

Исходные данные для расчета параметров срабатывания логики БТН взяты из примера, приведенного в п. 2.5.2.

2.13.5.1. ИО по отношению второй и первой гармоник тока нулевой последовательности

Значение порога срабатывания «**I0_2h/1h**» в относительных единицах берем равным 0,15 о.е.

2.13.5.2. ИО по максимальному уровню тока нулевой последовательности

Считая, что при близких земляных замыканиях с уровнем тока нулевой последовательности, превышающем три номинала, возможны значительные погрешности ТТ и, следовательно, излишняя блокировка защиты, коэффициент отстройки берем равным 3. Тогда порог срабатывания измерительного органа по максимальному уровню тока нулевой последовательности будет вычисляться следующим образом:

$$3I_{0\,\text{макс БТН(н)}} = 3 \text{ о.е.}$$

Значение порога срабатывания «**3I0_макс_БТН**» в относительных единицах берем равным $3I_{0\,\text{макс БТН(н)}}$.

2.13.6. Пример расчета параметров срабатывания БТН продольной дифференциальной защиты

Исходные данные для расчета параметров срабатывания логики БТН взяты из примера, приведенного в п. 2.7.2.

2.13.6.1. ИО по отношению второй и первой гармоник фазного тока

Значение порога срабатывания «**Iф_2h/1h**» в относительных единицах берем равным 0,15 о.е.

2.13.6.2. ИО по минимальному уровню фазного тока

Порог срабатывания реле, контролирующих минимальный уровень тока прямой последовательности, будет равен:

$$I_{1\,\text{мин БТН}} = k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{\text{нб}} \cdot I_{1\,\text{ном}} + I_C\right) = k_{\text{отс}} \cdot \left(k_{\text{нб}} \cdot I_{1\,\text{ном}} + \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \cdot B_{1\,\text{уд}} \cdot L\right) =$$

$$= 1{,}1 \cdot \left(0{,}05 \cdot 0{,}3 + \frac{220}{\sqrt{3}} \cdot 2{,}68 \cdot 10^{-6} \cdot 100\right) = 0{,}05 \text{ кА}.$$

Значение порога срабатывания «**Iф_мин_БТН**» в первичных величинах берем равным $I_{\text{мин БТН}}$.

2.13.6.3. ИО по максимальному уровню фазного тока

Порог срабатывания измерительных органов, контролирующих максимальный уровень фазных токов, отстраиваем от максимально возможного значения броска тока намагничивания, считая, что он в пять раз превосходит номинальный ток стороны ВН трансформатора:

$$I_{\text{макс БТН}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{ном ВН}} = k_{\text{отс}} \cdot \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН ном}}} = 5 \cdot \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0{,}63 \text{ кА}.$$

Значение порога срабатывания «**Iф_макс_БТН**» в первичных величинах берем равным $I_{\text{макс БТН}}$.

2.13.6.4. ИО по отношению второй и первой гармоник тока нулевой последовательности

Значение порога срабатывания «**I0_2h/1h**» в относительных единицах берем равным 0,15 о.е.

2.13.6.5. ИО по максимальному уровню тока нулевой последовательности

Считая, что при близких земляных замыканиях с уровнем тока нулевой последовательности, превышающем три номинала, возможны значительные погрешности ТТ и, следовательно, излишняя блокировка защиты, коэффициент отстройки берем равным 3. Тогда порог срабатывания измерительного органа по максимальному уровню тока нулевой последовательности будет вычисляться следующим образом:

$$3I_{0\,\text{макс БТН(н)}} = 3 \text{ о.е.}$$

Значение порога срабатывания «**3I0_макс_БТН**» в относительных единицах берем равным $3I_{0\,\text{макс БТН(н)}}$.

2.13.6.6. Выбор выдержек времени

Выдержку времени «**Ти_перекр_БТН**» принимаем равной 0,06 с.

3. Задание параметров срабатывания в терминале

Задать или изменить параметры срабатывания и накладки в терминале можно следующими способами:

- непосредственно через меню терминала;
- скачать файл уставок с терминала, изменить его в программном комплексе TranSet и загрузить файл уставок обратно в терминал.

3.1. Программный комплекс «TranSet»

3.1.1. Назначение

Программный комплекс TranSet предназначен для просмотра и редактирования файлов уставок микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики производства ООО «НПП Бреслер». Более подробную информацию о программном комплексе можно узнать в руководстве пользователя «БРСН.000110.002 РП», которое поставляется вместе с программным комплексом, либо скачать с официального сайта производителя.

3.1.2. Описание файла уставок

Уставочные параметры терминалов «Бреслер-0107» хранятся в виде файла с расширением «.bin». TranSet сохраняет файлы уставок в том виде, в котором они воспринимаются терминалом, т.е. после создания/изменения файла уставок пользователь может сразу загрузить файл уставок непосредственно в терминал (способы загрузки описаны ниже). Файлы уставок не предназначены для редактирования в текстовых редакторах [15].

Файл уставок состоит из нескольких уставочных параметров. Уставочная группа объединяет в себе несколько идентичных по набору уставочных параметров файла уставок.

3.1.3. Изменение параметров срабатывания в файле уставок

Рассмотрим подробнее некоторые уставочные группы.

3.1.3.1. Уставочная группа «Измерительные органы»

Данная уставочная группа описывает программные измерительные органы (ИО) терминала. Программный ИО дискретно реагирует на изменение (увеличение или уменьшение) уровня своей входной величины в соответствии с заданным значением уставки.

Для изменения текущей уставки в столбце «Текущее значение» в нужной строчке необходимо выставить требуемое значение. При изменении параметров необходимо обращать внимание на то, в каких величинах (первичные, вторичные, относительные единицы) рассчитаны уставки, и записывать параметр срабатывания в необходимую строчку (рисунок 3.1). При изменении данного параметра в одних величинах автоматически пересчитываются значения параметра в двух других величинах. Все изменения выделяются красным.

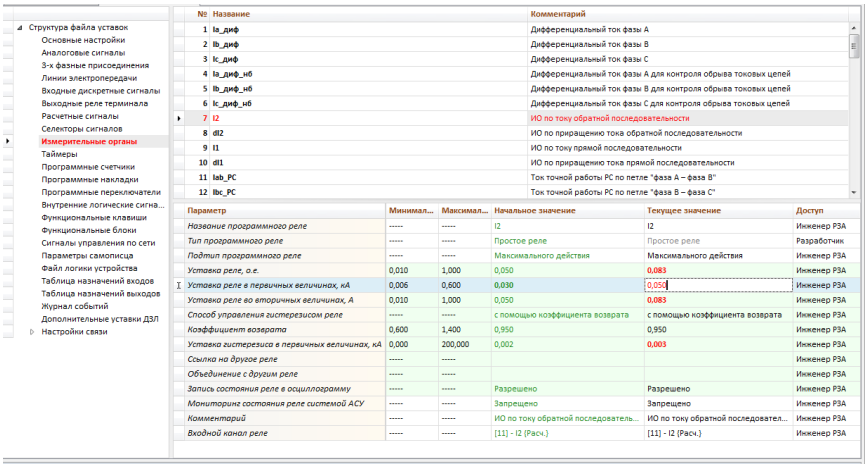

Рисунок 3.1 – Изменение порога срабатывания ИО в программе TranSet

3.1.3.2. Уставочная группа «Таймеры»

Данная уставочная группа описывает программные таймеры (выдержки времени) терминала. Выдержки времени на срабатывание (ВВС) задерживают входящий сигнал на заданную величину уставки таймера. Выдержки времени на возврат (ВВВ) продлевают входной сигнал на заданную величину уставки таймера.

Для изменения текущей уставки в столбце «Текущее значение» в строчке «уставка таймера» необходимо выставить необходимое значение (рисунок 3.2). Уставки таймера записываются в секундах.

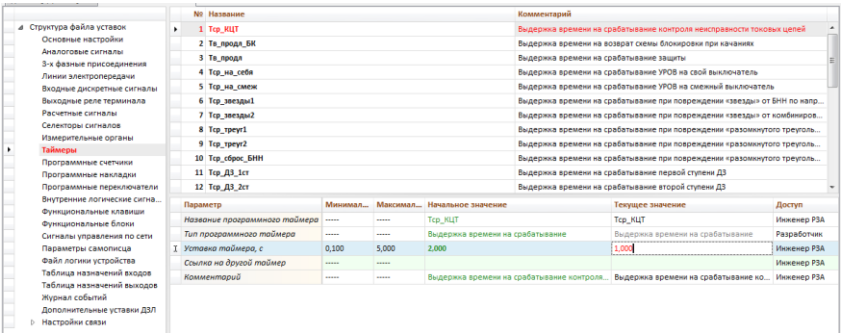

Рисунок 3.2 – Изменение выдержки времени в программе TranSet

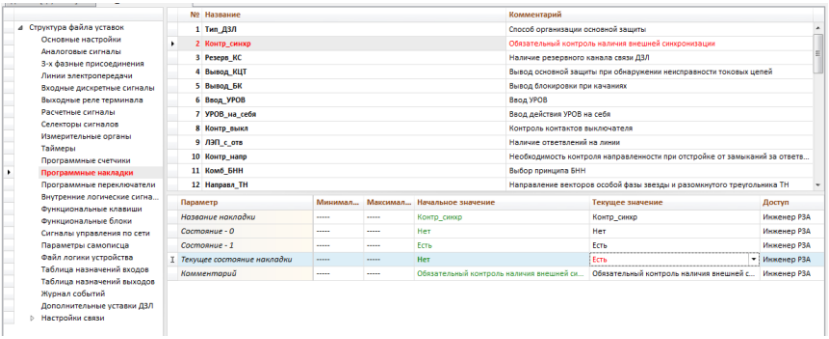

Рисунок 3.3 – Изменение положения накладки в программе TranSet

3.1.3.3. Уставочная группа «Программные накладки»

Программная накладка – это элемент внутреннего программного обеспечения терминала, работающий по подобию ключа (состояние 0 – цепочка в логической схеме разомкнута, состояние 1 – цепочка замкнута).

Для изменения текущего положения накладки необходимо в строке «текущее состояние накладки» в выпадающем списке из двух состояний выбрать требуемое положение накладки (рисунок 3.3).

3.1.3.4. Уставочная группа «Программные переключатели»

Программный переключатель – это элемент внутреннего программного обеспечения терминала, передающий на свой выход сигнал одного из своих входов, в зависимости от текущего состояния переключателя.

Для изменения текущего положения переключателя необходимо в строке «положение переключателя» в выпадающем списке из нескольких положений выбрать требуемое (рисунок 3.4).

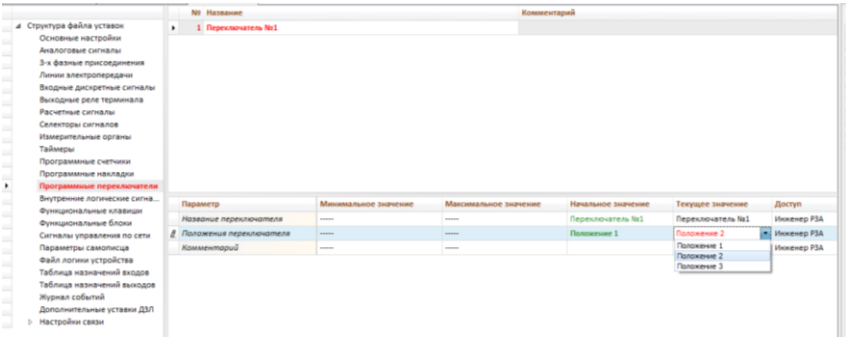

Рисунок 3.4 – Изменение положения программного переключателя

3.1.4. Загрузка файла уставок в терминал

Обновление файла уставок терминала можно осуществить следующими способами:

- с помощью внешнего USB-носителя;
- с помощью программного комплекса «BrsUSB»;
- по локальной сети.

Для обновления файла уставок терминала с внешнего USB-носителя необходимо воспользоваться пунктом «Прогр. уставок» меню «Терминал», нажав клавишу «Вперед», после чего появится запрос на подтверждение «Обновить уставки?». После подтверждения обновления на экране будет приведен список файлов уставок, найденных на носителе в папке «BRESLER» (файлы уставок, расположенные вне этой папки, не будут найдены). Выбор нужного файла уставок подтверждается длительным нажатием клавиши «Вперед». Если на момент обновления уставок не был введен пароль, то появится строка ввода пароля. После успешного ввода пароля уставки обновятся, и терминал перезагрузится.

Для обновления файла уставок терминала с помощью программного комплекса «BrsUSB» необходимо соединить терминал через порт «микроUSB» с компьютером, на котором установлена данная программа. После запуска программы появится список команд. Далее выполнить ряд действий:

- выбрать пункт «загрузка уставок»;
- ввести пароль;
- выбрать и загрузить необходимый файл уставок.

После успешного обновления уставок терминал перезагрузится.

Для того, чтобы скачать текущий файл уставок с терминала, необходимо выбрать пункт «скачать уставки», далее будет предложено открыть папку с местоположением скачанного файла.

3.2. Заполнение шаблона уставок в программе «Transet»

Для упрощения использования программы TranSet и исключения изменения параметров, которые лучше не трогать, в TranSet созданы специальные шаблоны уставок.

В шаблон уставок входят только те параметры (уставки ИО, ВВ, накладки и т.д.), которые изменяются в процессе расчета параметhbсеров срабатывания.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок. Издание 7.
2. Чернобровов, РЗА, 2008.
3. Шкаф направленной высокочастотной защиты линии 110-220 кВ БРЕСЛЕР-0117.500. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.
4. Терминал направленной высокочастотной защиты линии 110-220 кВ БРЕСЛЕР-0107.500. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.
5. Шкаф направленной высокочастотной защиты линии 110-220 кВ и ступенчатых защит присоединения БРЕСЛЕР-0117.502. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.
6. Терминал направленной высокочастотной защиты линии 110-220 кВ и ступенчатых защит присоединения БРЕСЛЕР-0107.502. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.
7. Шкаф дифференциально-фазной защиты линии 110-220 кВ БРЕСЛЕР-0117.520. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.
8. Терминал дифференциально-фазной защиты линии 110-220 кВ БРЕСЛЕР-0107.520. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.
9. Шкаф дифференциально-фазной защиты линии 110-220 кВ и ступенчатых защит присоединения БРЕСЛЕР-0117.522. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.
10. Терминал дифференциально-фазной защиты линии 110-220 кВ и ступенчатых защит присоединения БРЕСЛЕР-0107.522. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.
11. Шкаф продольной дифференциальной защиты линии 110-220 кВ. БРЕСЛЕР-0117.530. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.

12. Терминал продольной дифференциальной защиты линии 110-220 кВ. БРЕСЛЕР-0107.530. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.
13. Шкаф продольной дифференциальной защиты линии 110-220 кВ и ступенчатых защит присоединения БРЕСЛЕР-0117.532. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.
14. Терминал продольной дифференциальной защиты линии 110-220 кВ и ступенчатых защит присоединения БРЕСЛЕР-0107.532. Руководство по эксплуатации, Чебоксары, 2018.
15. Программный комплекс "TranSet" версия 3. Руководство пользоватеьлся "БРСН.000110.002 РП"., Чебоксары, 2014.

ПОВЫШЕНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ И ОБУЧЕНИЕ по РЗА
в единственном в России специализированном институте релейной защиты и автоматики:

ЧАСТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ
Лицензия №1236 от 01.02.2019

Наименование программы
1. Релейная защита в распределительных электрических сетях. Новые технологии
2. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем. Новые технологии.
3. Режимы нейтрали современных распределительных электрических сетей 6-35 кВ. Защита от перенапряжений
4. Управление режимами компенсации емкостных токов замыкания на землю
5. Определение места повреждения на линиях электропередачи. Аппаратные и программные методы
6. Дальнее и ближнее резервирование защит трансформаторов ответвительных подстанций
7. Резидентное и прикладное программное обеспечение микропроцессорных устройств производства «НПП Бреслер»
8. Программно-технический комплекс мониторинга и управления энергообъектом BresMon производства «НПП Бреслер»
9. Особенности проверки сложных устройств РЗ и А при помощи оборудования серии «РЕТОМ»
10. Проверка и настройка высокочастотной аппаратуры релейной защиты и автоматики с помощью испытательного комплекса РЕТОМ-ВЧ
11. Электроснабжение. Новые технологии
12. Способы выполнения автоматики управления дугогасящими реакторами производства «НПП Бреслер»
13. Оборудование, выпускаемое «НПП Бреслер». Применение в проектах и эксплуатация.
14. Применение испытательного оборудования серии «РЕТОМ» для диагностики устройств РЗА и первичного оборудования энергетики
15. Моделирование процессов в электроэнергетических системах
16. Расчеты релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем
17. Электрооборудование. Новые функциональные возможности

УЧРЕДИТЕЛЬ

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ БРЕСЛЕР

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР

Динамика научно-производственное предприятие

Контакты НОУ ДПО ИПК РЗА:
428034, г. Чебоксары, Ядринское шоссе, 4В
Тел/факс: (8352) 23-77-55, 36-73-33
web: www.ipk-rza.ru
e- mail: info@ipk-rza.ru ; bib@bresler.ru

Булычев Александр Витальевич
Бычков Юрий Владимирович
Ясина Зинаида Валентиновна

Основные защиты линий 110-220 кВ: рекомендации по выбору параметров срабатывания

Учебное пособие

Редактор И.Б. Булычева
Компьютерная верстка З.В. Ясина

Подписано к печати .
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Физ. печ. л. 8,75. Тираж 200 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Новое время».
428034, г. Чебоксары, ул. Мичмана Павлова, 50/1.
Тел.: (8352) 323-353, 412-789. E-mail: newtime1@mail.ru