

Релейная защита  
распределительных сетей 6-10 кВ

Расчёт уставок  
Методические указания

Санкт-Петербург  
2017

## Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 года №184 ФЗ "О техническом регулировании», а правила применения стандартов организаций – ГОСТ Р 1.4-2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения".

В настоящем стандарте приведены методики и пример расчёта уставок защит распределительной сети 6-10 кВ.

Методика расчёта носит рекомендательный характер.

## Сведения о стандарте

1 **РАЗРАБОТАН** ООО "НТЦ "Механотроника"

### **Научно-технический руководитель работы:**

Заведующий кафедрой Релейной защиты и автоматики электрических станций, сетей и систем Петербургского Энергетического Института Повышения Квалификации к.т.н. СОЛОВЬЁВ А. Л.

### **Исполнители:**

Начальник отдела РЗА

ИВАНОВ И. В.

Ведущий инженер-системотехник

СЕЛЬКОВ Е. А.

2 **УТВЕРЖДЁН И ВВЕДЁН В ДЕЙСТВИЕ** Приказом Генерального директора № 112 от 23.03.2018

3 Код Общероссийского классификатора предприятий и организаций ОКПО - 23048570.

4 **ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ**

Настоящий стандарт является объектом охраны в соответствии с международным и российским законодательствами об авторском праве.

Любое несанкционированное использование стандарта, включая копирование, тиражирование и распространение, но не ограничиваясь этим, влечёт применение к виновному лицу гражданско-правовой ответственности, а также уголовной ответственности в соответствии со статьёй 146 УК РФ и административной ответственности в соответствии со статьёй 7.12 КоАП РФ.

## Содержание

1 Область применения .....	1
2 Обозначения и сокращения .....	2
3 Схемы подключения ТТ и ТН .....	3
3.1 Подключение защит от междупазных КЗ .....	3
3.2 Подключение защит от однофазных замыканий на землю .....	4
3.3 Пересчет уставок для ввода в блок .....	6
4 Токовые защиты распределительных сетей .....	7
4.1 Общие сведения .....	7
4.1.1 Область применения токовых защит .....	7
4.1.2 Времятоковые характеристики блоков БМРЗ .....	7
4.1.3 Времятоковые характеристики плавких вставок предохранителей .....	12
4.1.4 Времятоковые характеристики автоматических выключателей 0,4 кВ .....	14
4.1.5 Согласование по току .....	15
4.1.6 Согласование по времени .....	16
4.2 Токовые защиты кабельных и воздушных линий .....	21
4.2.1 Общие требования к защитах кабельных и воздушных линий .....	21
4.2.2 Расчет уставок ТО .....	21
4.2.3 Неселективная отсечка без выдержки времени .....	22
4.2.4 ТО с выдержкой времени .....	23
4.2.5 Выбор параметров срабатывания МТЗ .....	23
4.2.6 Примеры расчета уставок .....	27
4.3 Защита и автоматика трансформаторов 6(10)/0,4 кВ .....	32
4.3.1 Общие требования к защитах трансформаторов .....	32
4.3.2 Выбор параметров срабатывания ТО .....	33
4.3.3 Выбор параметров срабатывания МТЗ .....	34
4.3.4 Защита от перегрузки .....	39
4.3.5 Токовая защита нулевой последовательности .....	40
4.3.6 Примеры расчета уставок .....	43
4.4 Защита вводного и секционного выключателя .....	47
4.4.1 Общие требования к защитах вводного и секционного выключателей .....	47
4.4.2 Выбор параметров срабатывания ТО СВ .....	47
4.4.3 Выбор параметров срабатывания МТЗ СВ .....	47
4.4.4 Выбор параметров срабатывания ТО ВВ .....	48
4.4.5 Выбор параметров срабатывания МТЗ ВВ .....	48
4.5 Логическая защита шин .....	50
4.5.1 Общие сведения .....	50
4.5.2 Выбор параметров срабатывания ЛЗШ .....	53
5 Защита от ОЗЗ .....	54
5.1 Принципы действия защиты .....	54
5.1.1 Режимы заземления нейтрали .....	54
5.1.2 Сети с изолированной нейтралью .....	56
5.1.3 Сети с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор .....	56

5.1.4 Сети с нейтралью, заземленной через низкоомный резистор .....	56
5.1.5 Сети с компенсированной нейтралью .....	57
5.1.6 Сети с компенсированной нейтралью с включением высокоомного резистора.....	57
5.1.7 Сети с компенсированной нейтралью с включением низкоомного резистора .....	58
5.2 Расчет уставок защит .....	58
5.2.1 Расчет уставок ненаправленной защиты.....	58
5.2.2 Расчет уставок направленной защиты .....	60
5.2.3 Расчет уставок защиты, реагирующей на высшие гармонические составляющие тока в переходном процессе .	62
5.2.4 Расчет уставок защиты, реагирующей на высшие гармонические составляющие тока в установившемся режиме .....	62
5.2.5 Расчет уставок неселективной защиты по напряжению нулевой последовательности .....	63
5.3 Примеры расчета .....	63
5.3.1 Пример расчета защиты от ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью .....	63
Литература .....	67

---

**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ****Релейная защита  
распределительных сетей 6-10 кВ  
Расчёт уставок  
Методические указания**

---

**1 Область применения**

Настоящий стандарт соответствует требованиям и рекомендациям, изложенным в ПУЭ гл. 3.2 «Релейная защита» [1].

В стандарте учтены особенности построения и функционирования блоков БМРЗ, а также опыт их эксплуатации.

При разработке настоящего стандарта учитывалась практика решений, принятых в отечественной электроэнергетике.

В настоящем стандарте дан комплексный подход к расчёту уставок и даны рекомендации по выбору выдержек времени следующих защит распределительных сетей:

- токовых защит от междуфазных КЗ воздушных и кабельных линий, вводных и секционных выключателей 6-10 кВ;
- токовых защит трансформаторов 6(10)/0,4 кВ;
- защиты от однофазных замыканий на землю в сетях, работающих с изолированной, компенсированной и резистивно-заземленной нейтралью.

Расчёты в стандарте выполнены в первичных значениях величин. Для ввода расчетных значений уставок в блоки БМРЗ необходимо первичные значения величин пересчитать во вторичные.

Использование стандарта позволит проектным организациям и эксплуатирующим предприятиям наиболее полно реализовать все преимущества, которыми обладают блоки БМРЗ, выпускаемые ООО «НТЦ «Механотроника».

## 2 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте приняты следующие обозначения и сокращения:

АВР – автоматическое включение резерва;  
АПВ – автоматическое повторное включение;  
БМРЗ – блок микропроцессорный релейной защиты;  
БТН – бросок тока намагничивания;  
ВВ – вводной выключатель;  
ВЛ – высоковольтная линия;  
ВН – высшее напряжение;  
ДГР – дугогасящий реактор;  
КЗ – короткое замыкание;  
КЛ – кабельная линия;  
ЛЗШ – логическая защита шин;  
МТЗ – максимальная токовая защита;  
НН – низшее напряжение;  
ОЗЗ – однофазное замыкание на землю;  
ПБВ – устройство переключения ответвлений обмоток трансформатора без возбуждения;  
ПОН – пусковой орган по напряжению;  
ПС – подстанция;  
ПУЭ – правила устройства электроустановок;  
СВ – секционный выключатель;  
СШ – сборные шины;  
ТН – трансформатор напряжения;  
ТО – токовая отсечка;  
ТТ – трансформатор тока;  
ТТП – трансформатор тока нулевой последовательности;  
Ф – фидер.

### 3 Схемы подключения ТТ и ТН

#### 3.1 Подключение защит от междофазных КЗ

3.1.1 В распределительных сетях 6-10 кВ при применении блоков БМРЗ используют следующие схемы подключения:

- двухфазная трехрелейная схема (рисунок 3.1 а)). Аналоговый вход блока  $I_v$  включен в нулевой провод;
- двухфазная двухрелейная схема (рисунок 3.1 б)). Возможен программный расчет тока  $I_v$ , при этом схема подключения становится идентичной двухфазной трехрелейной схеме;
- трехфазная трехрелейная схема (рисунок 3.1 в)).

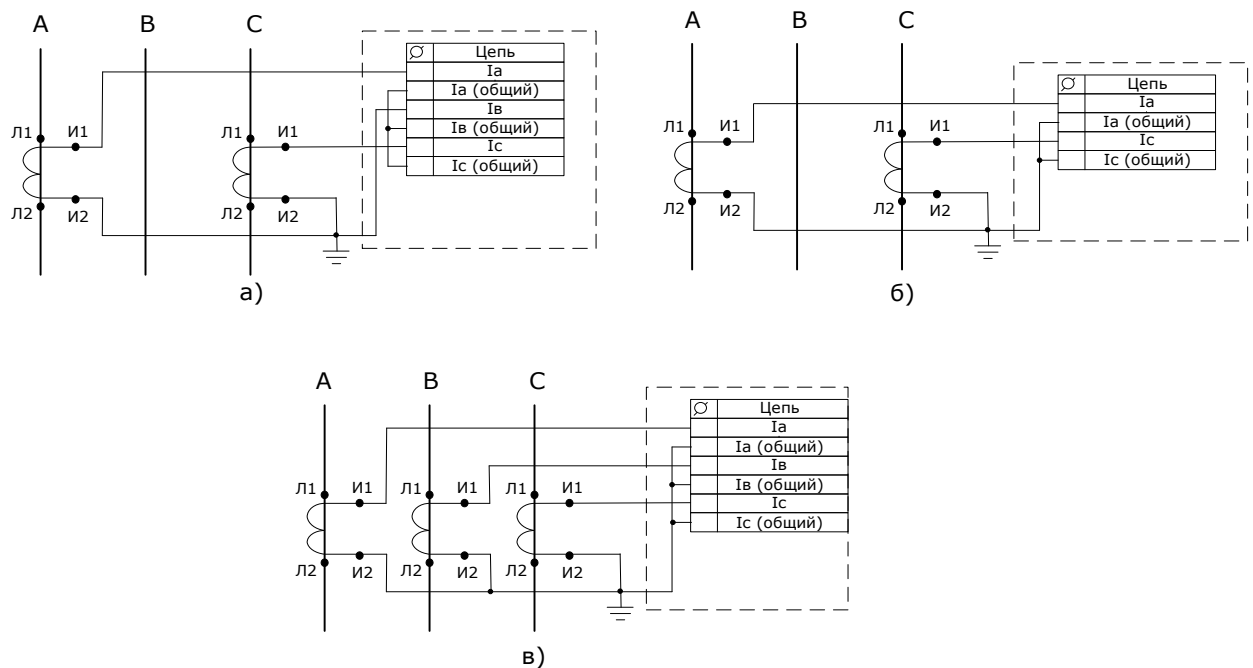


Рисунок 3.1 – Схемы подключения защит от междофазных КЗ

3.1.2 Для отходящих линий за положительное направление принято направление от шин в линию, для защиты вводного выключателя - от системы к шинам, для защиты секционного выключателя может быть выбрано произвольно. На рисунке 3.1 за положительное направление токов принято направление от Л1 к Л2.

3.1.3 Согласно ПУЭ [1] в сетях 6-10 кВ применяют двухфазные схемы (рисунок 3.1 а),б)). При этом ТТ необходимо включать в одни и те же фазы по всей сети данного напряжения для обеспечения отключения, в большинстве случаев двойных замыканий на землю, только одного места повреждения.

Двухфазные схемы применяют, если расстановка ТТ выполнена в одни и те же фазы по всей сети данного напряжения и защита от ОЗЗ действует на сигнализацию. При этом рекомендуется применение трехрелейной схемы, так как она обеспечивает повышение чувствительности при двухфазных КЗ за трансформаторами 6(10)/0,4 кВ

со схемами соединения  $\Delta/\Upsilon$  и при однофазных КЗ за трансформатором со схемой  $\Upsilon/\Upsilon$ .

3.1.4 Если защита от ОЗЗ действует на отключение, то применяется трехфазная трехрелейная схема.

Трехфазная трехрелейная схема применяется также, если требование по расстановке ТТ в одни и те же фазы по всей сети данного напряжения невыполнимо. Применение двухфазной схемы при ошибке в расстановке ТТ может привести к отказу защиты при двойных замыканиях на землю на тех фазах, в которых не установлены ТТ.

3.1.5 Трехфазная трехрелейная схема позволяет выполнять расчет тока нулевой последовательности из фазных токов.

## 3.2 Подключение защит от однофазных замыканий на землю

3.2.1 В распределительных сетях 6-10 кВ при применении блоков БМРЗ используют следующие схемы подключения защиты от ОЗЗ:

- подключение к ТТНП (рисунок 3.2 а));
- подключение в обратный провод сборки ТТ (рисунок 3.2 б));
- расчет тока нулевой последовательности из фазных токов (рисунок 3.2 в).

В этом случае блок должен быть включен по трехфазной трехрелейной схеме.

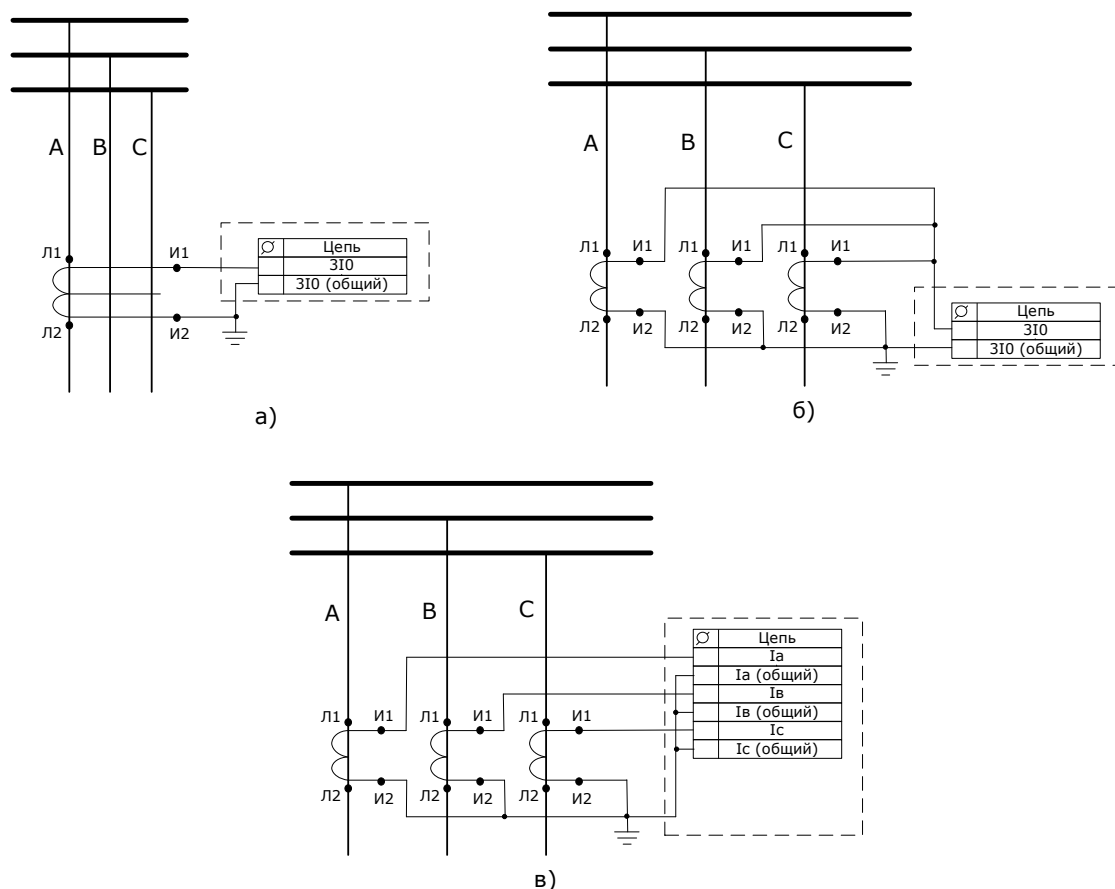


Рисунок 3.2 – Схемы подключения защиты от ОЗЗ

3.2.2 За положительное направление токов принято направление от Л1 к Л2, то есть от шин в присоединение.



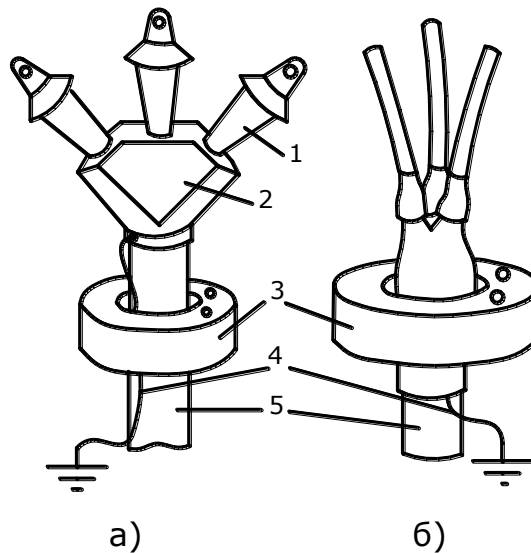
3.2.3 Рекомендуется подключение защиты к ТНП (рисунок 3.2 а)), при этом защита от ОЗЗ получается более чувствительной, так как ток небаланса ТНП много меньше, чем небаланс по расчетному значению тока  $3I_0$  (рисунок 3.2 в)) или при подключении в обратный провод сборки ТТ (рисунок 3.2 б)). Применение ТНП ограничено кабельными линиями, так как ТНП надеваются на кабельную муфту.

На воздушных линиях защиту от ОЗЗ выполняют по расчетному току нулевой последовательности или подключают в обратный провод сборки ТТ (рисунок 3.2 б)). В случае недостаточной чувствительности на воздушной линии необходима кабельная вставка, на которую подключается ТНП.

Для определения возможности применения выбранной схемы подключения необходимо выполнить расчет уставок защиты от ОЗЗ в соответствии с главой 5.

3.2.4 При монтаже ТНП необходимо придерживаться определенных правил заземления брони кабеля. При наличии у концевой муфты металлической воронки, соединенной с броней кабеля, необходимо воронку и броню изолировать от заземленных частей на участке от ТНП до воронки, а заземляющий проводник присоединить к воронке и пропустить через отверстие магнитопровода ТНП в обратном направлении, как показано на рисунке 3.3 а).

Современные концевые муфты выполняются из изоляционного материала, и если кабель с металлической броней не проходит через ТНП, то заземляющий проводник не следует пропускать через окно ТНП (рисунок 3.3 б)).



1 – проходной изолятор; 2 – корпус муфты; 3 – ТНП; 4 – провод заземления; 5 – кабель

Рисунок 3.3 – Монтаж заземления оболочки кабеля

3.2.5 Для получения напряжения нулевой последовательности аналоговый вход  $3U_0$  подключают к обмотке разомкнутого треугольника ТН. Схему разомкнутого треугольника собирают на дополнительных обмотках ТН. Коэффициент трансформации дополнительных обмоток равен  $\frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot 100}$ , где  $U_{ном}$  – номинальное напряжение сети, В. Таким образом,

при металлическом ОЗЗ между контактами Н и К (рисунок 3.4) создается напряжение 100 В.

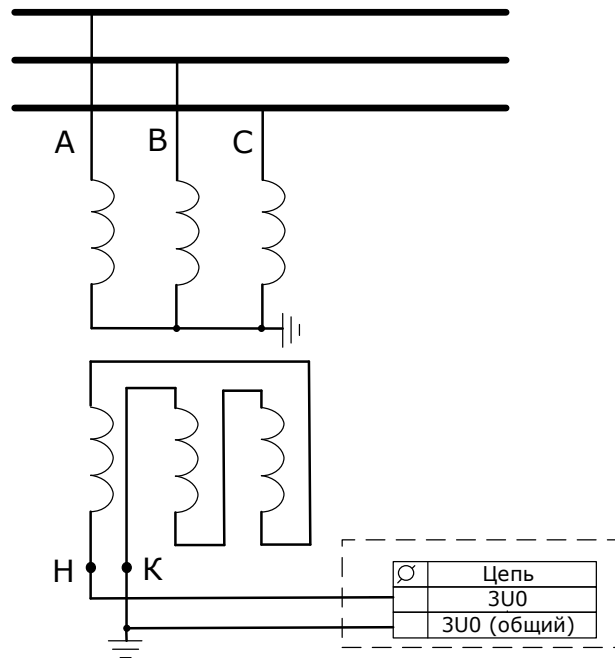


Рисунок 3.4 – Схема подключения аналогового входа напряжения нулевой последовательности  $3U_0$

### 3.3 Пересчет уставок для ввода в блок

3.3.1 Для работы блоков БМРЗ первичные значения, полученные при расчете уставок, необходимо пересчитать во вторичные значения.

3.3.2 Пересчет тока, выраженного в первичных значениях, во вторичные значения выполняют по формуле

$$I_{с.р.} = \frac{I_{с.з.}}{n_T}, \quad (3.1)$$

где  $I_{с.з.}$  – ток срабатывания защиты, выраженный в первичных значениях, А;

$n_T$  – коэффициент трансформации ТТ.

3.3.3 Пересчет напряжения, выраженного в первичных значениях, во вторичные значения выполняют по формуле

$$U_{с.р.} = \frac{U_{с.з.}}{n_H}, \quad (3.2)$$

где  $U_{с.з.}$  – напряжение срабатывания защиты, выраженное в первичных значениях, В;

$n_H$  – коэффициент трансформации ТН.

## 4 Токовые защиты распределительных сетей

### 4.1 Общие сведения

#### 4.1.1 Область применения токовых защит

4.1.1.1 Защита от КЗ элементов сети 6 и 10 кВ распределительных сетей осуществляется преимущественно с помощью токовых защит.

4.1.1.2 Токовые защиты подразделяются на ТО и МТЗ. ТО и МТЗ различаются между собой способом обеспечения селективности. Селективность МТЗ достигается с помощью выдержек времени, а ТО – выбором тока срабатывания.

4.1.1.3 Ток срабатывания ТО отстраивают от тока КЗ в конце зоны действия. Зона действия ТО без выдержки времени по условию обеспечения селективности не должна выходить за пределы защищаемого элемента. Зона действия ТО с выдержкой времени выходит за пределы защищаемого элемента и по условию селективности должна отстраиваться от конца зоны действия ТО смежного участка по току и по времени.

4.1.1.4 МТЗ отстраивают от максимального тока нагрузки присоединения. МТЗ должна быть согласована с токовыми защитами предыдущих присоединений по току и по времени.

Согласование по току заключается в том, что ток срабатывания должен быть больше тока срабатывания предыдущих присоединений с учетом тока нагрузки.

Согласование по времени заключается в том, что время срабатывания МТЗ должно быть больше времени срабатывания МТЗ предыдущих присоединений.

Согласование по току и по времени зависит от вида времятоковых характеристик. На практике возникает необходимость согласования токовых защит блока БМРЗ с аналогичными токовыми защитами, плавкими вставками предохранителей 6(10) кВ и 0,4 кВ и автоматическими выключателями 0,4 кВ. Далее рассмотрены времятоковые характеристики блоков БМРЗ, плавких вставок предохранителей и автоматических выключателей.

#### 4.1.2 Времятоковые характеристики блоков БМРЗ

4.1.2.1 Наибольшее распространение получила МТЗ с независимой времятоковой характеристикой (рисунок 4.1).

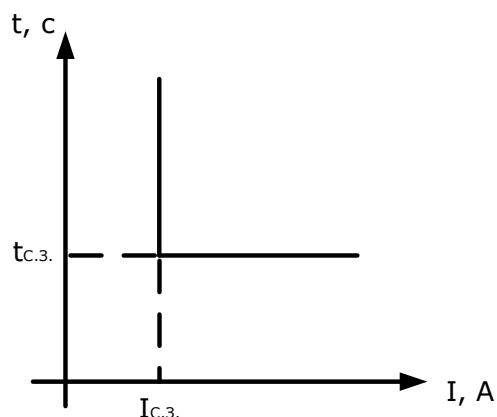


Рисунок 4.1 – Независимая времятоковая характеристика

4.1.2.2 Помимо МТЗ с независимой характеристикой применяются МТЗ с зависимой от тока характеристикой выдержки времени. На рисунке 4.2 приведено семейство зависимых времятоковых характеристик.

При расчете уставок рассчитывается ток срабатывания защиты  $I_{с.з.}$ . Регулировка выдержки времени достигается выбором одной из характеристик из семейства с одним и тем же током срабатывания.

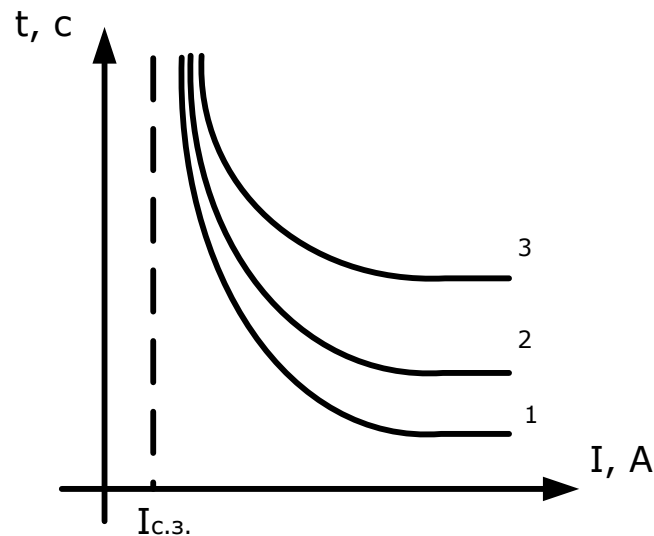
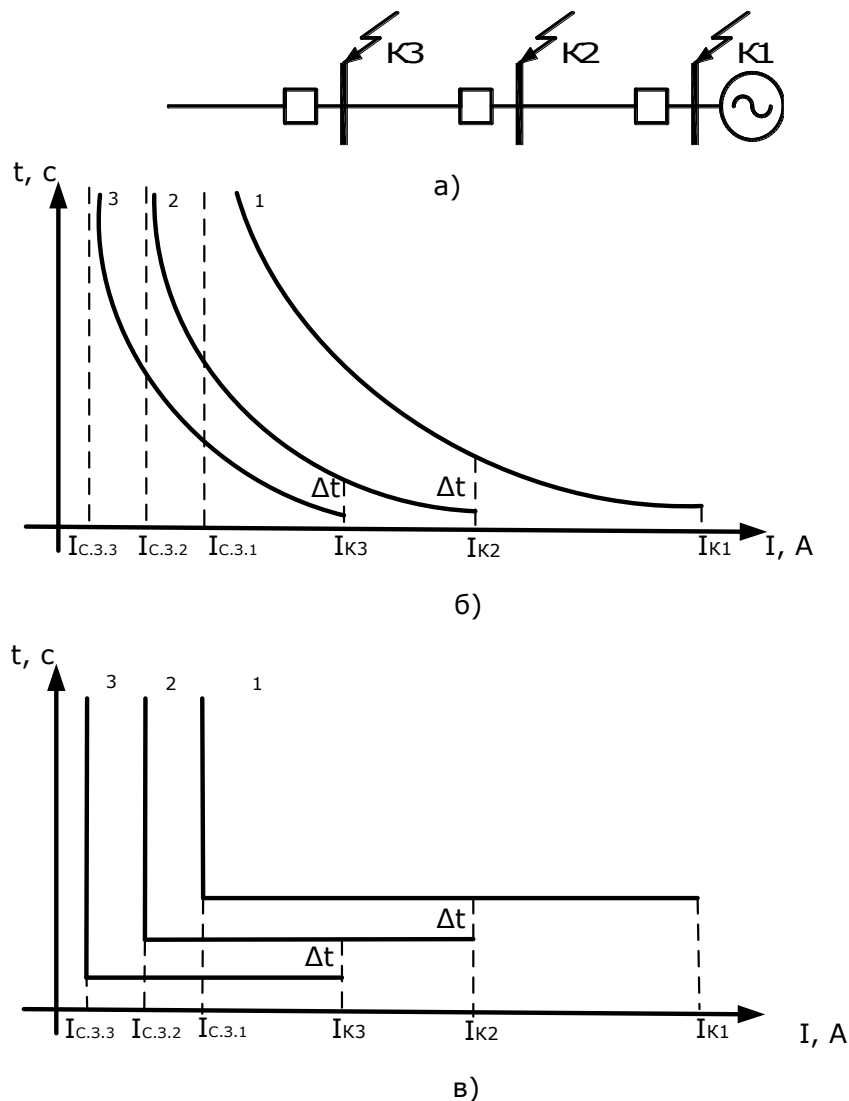


Рисунок 4.2 –Зависимые времятоковые характеристики

В случае применения зависимых времятоковых характеристик обеспечивается меньшее время срабатывания защиты, расположенной ближе к источнику, т.е. в точке с наибольшим уровнем тока КЗ.

На рисунке 4.3 приведен участок сети и времятоковые характеристики МТЗ. Из рисунка видно, что при применении МТЗ с зависимыми времятоковыми характеристиками отключение КЗ в точке К1 с наибольшим током КЗ происходит с меньшей выдержкой времени.

При согласовании по времени МТЗ с независимыми характеристиками самое близкое к источнику КЗ отключается с наибольшей выдержкой времени.



- а) первичная схема участка сети;  
 б) согласование МТЗ с зависимыми характеристиками;  
 в) согласование МТЗ с независимыми характеристиками

Рисунок 4.3 –Сравнение согласования МТЗ с зависимой и независимой времятоковой характеристикой на примере участка сети

4.1.2.3 В блоках БМРЗ возможен выбор одной из четырёх зависимых времятоковых характеристик. Типы и аналитические зависимости времятоковых характеристик соответствуют IEC 60255-3 [2] и приведены в таблице 4.1.

В общем виде зависимые характеристики описываются следующим уравнением:

$$t = \frac{k \cdot K}{\left(\frac{I}{I_{c.3.}}\right)^{\alpha} - 1}, \quad (4.1)$$

где  $k$ ,  $\alpha$  – постоянные величины, зависящие от типа характеристики;

$K$  – уставка коэффициента усиления;

$I$  – входной вторичный ток, измеряемый блоком, А;

$I_{c.3.}$  – ток срабатывания защиты, А.

Таблица 4.1 - Типы времятоковых характеристик блоков БМРЗ

№	Наименование характеристики	Значения постоянных	Аналитическая зависимость
1	Инверсная	$k = 0,14$ $\alpha = 0,02$	$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I}{I_{с.з.}}\right)^{0,02} - 1} \cdot K$
2	Сильно инверсная	$k = 13,5$ $\alpha = 1$	$t = \frac{13,5}{\frac{I}{I_{с.з.}} - 1} \cdot K$
3	Длительно инверсная	$k = 120$ $\alpha = 1$	$t = \frac{120}{\frac{I}{I_{с.з.}} - 1} \cdot K$
4	Чрезвычайно инверсная	$k = 80$ $\alpha = 2$	$t = \frac{80}{\left(\frac{I}{I_{с.з.}}\right)^2 - 1} \cdot K$
Обозначения: $K$ - коэффициент усиления (уставка $K$ ); $I$ - входной вторичный ток, измеряемый блоком, А; $I_{с.з.}$ - ток срабатывания защиты.			

4.1.2.4 На рисунке 4.4 приведены зависимые характеристики при коэффициенте усиления, равном 1.

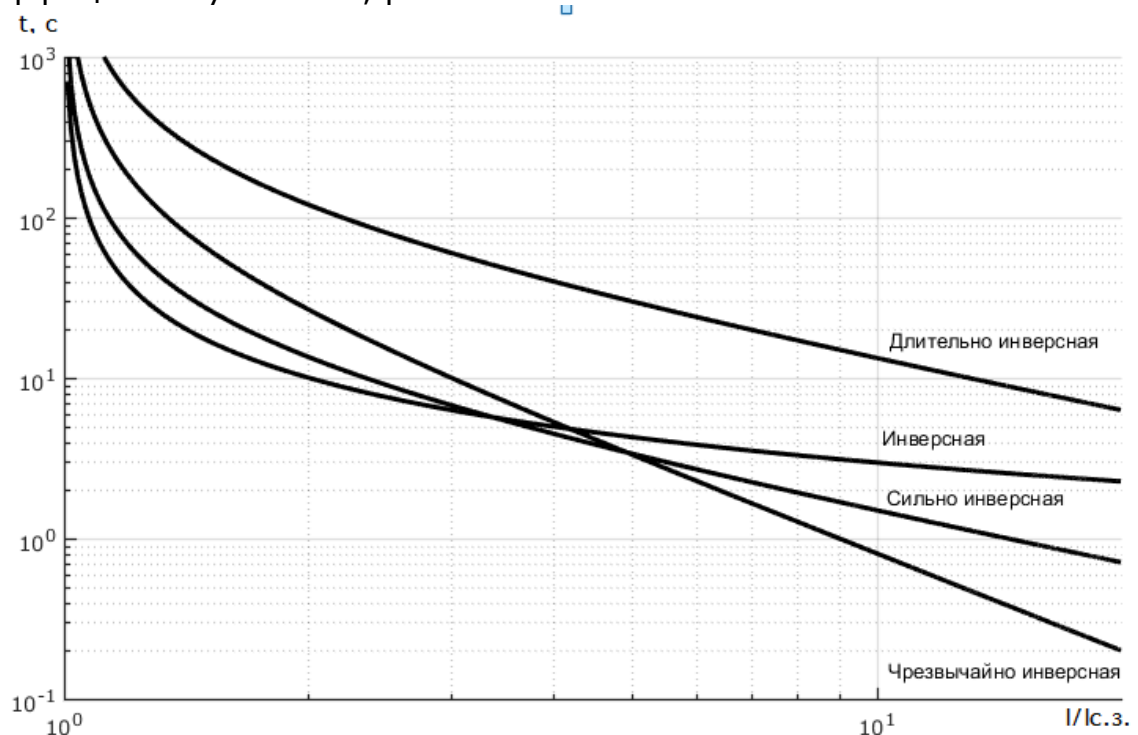


Рисунок 4.4 – Времятоковые характеристики блоков БМРЗ

Прямая, параллельная оси времени и проходящая через значение тока  $I_{с.з.}$ , является вертикальной асимптотой для всех зависимых времятоковых характеристик. Пуск ступени производится при токах, превышающих  $I_{с.з.}$ . Максимальное расчетное время срабатывания зависимых времятоковых характеристик составляет 180 минут.

Пределы допускаемой погрешности по времени срабатывания для ступеней с зависимыми времятоковыми характеристиками для  $1,2 \leq I/I_{с.з.} \leq 20$ : при  $t \leq 1$  с составляют не более  $\pm 30$  мс, при  $t > 1$  с составляют не более 5 %.

Рекомендуемый используемый диапазон зависимых времятоковых характеристик от 2 до  $20 I_{с.з.}$ .

4.1.2.5 Регулировка выдержки времени срабатывания осуществляется выбором коэффициента усиления  $K$ . На рисунке 4.5 приведено семейство зависимых времятоковых характеристик при различных значениях коэффициента  $K$ . Аналогичные семейства характеристик можно построить для других времятоковых характеристик.

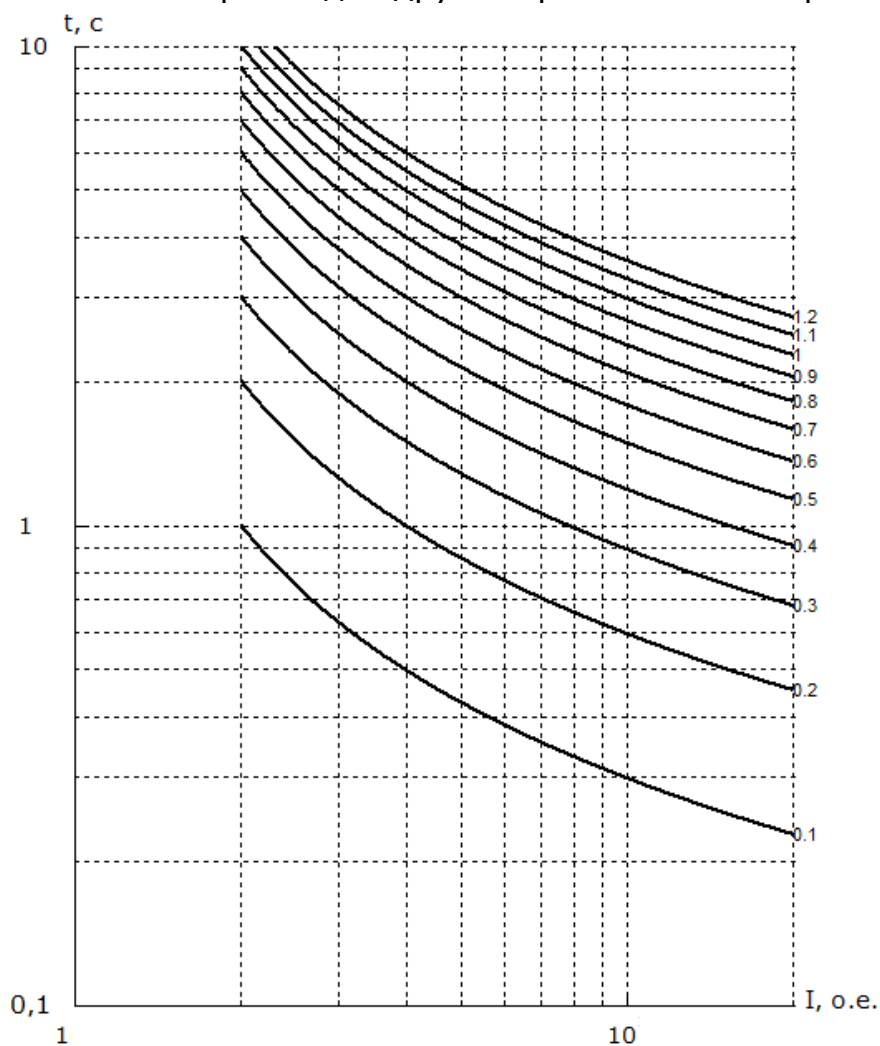


Рисунок 4.5 – Семейство инверсных характеристик

4.1.2.6 В большинстве случаев рекомендуется применение инверсной характеристики, так как данная характеристика наилучшим образом обеспечивает увеличение выдержки времени при удалении от источника. При близких КЗ должно обеспечиваться отключение КЗ с наименьшей выдержкой времени, при КЗ в начале зоны действия предыдущей защиты – при выдержке, определяемой условием согласования.

Сильно инверсная характеристика применяется при значительном снижении тока КЗ по мере удаления точки от источника питания, т.е. при значительном сопротивлении элемента сети по отношению к сопротивлению источника питания. Время срабатывания реле с сильно инверсной характеристикой обратно пропорционально поданному к реле току.

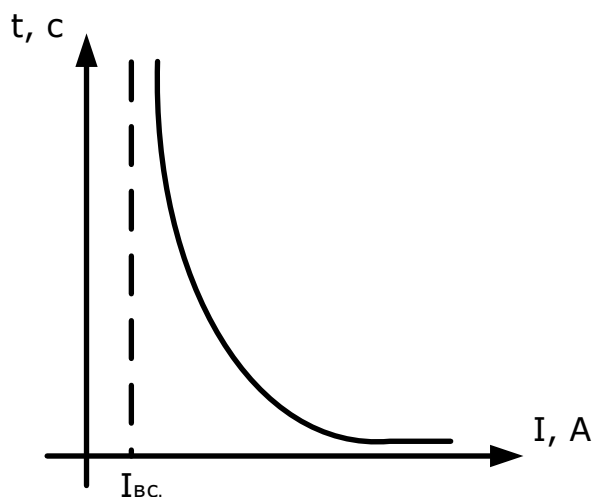
Время срабатывания реле с чрезвычайно инверсной характеристикой обратно пропорционально квадрату поданного к реле тока. Это позволяет применять данную характеристику на трансформаторах, при включении которых происходит бросок тока намагничивания. Также МТЗ с чрезвычайно инверсной характеристикой хорошо согласуется с предохранителями.

### 4.1.3 Времятоковые характеристики плавких вставок предохранителей

4.1.3.1 Предохранители применяют для защиты трансформаторов 6-10 кВ, подключенных к ответвлениям от линии. Также предохранители широко распространены для защиты присоединений 0,4 кВ.

4.1.3.2 Номинальным током плавкой вставки предохранителя  $I_{\text{вс}}$  называется ток, для продолжительной работы при котором она предназначена. Согласно ПУЭ [1] номинальный ток плавкой вставки должен выбираться минимально возможным по условию надежного пропускания максимального тока нагрузки.

4.1.3.3 Для согласования МТЗ с плавкими вставками необходима времятоковая характеристика полного времени отключения (суммы времени плавления вставки и времени горения дуги) от значения отключаемого тока. На рисунке 4.6 представлена времятоковая характеристика плавкой вставки предохранителя.



$I_{\text{вс}}$  - номинальный ток плавкой вставки предохранителя, А

Рисунок 4.6 – Времятоковая характеристика плавкой вставки предохранителя



Для согласования МТЗ с плавкими вставками необходима время-токовая характеристика отключения плавкой вставки – кривая зависимости эквивалентного времени отключения (наибольшего значения) от действующего значения периодической составляющей ожидаемого тока.

В большинстве случаев в документации приводится времятоковая характеристика плавления плавкой вставки – кривая зависимости эквивалентного преддугового времени от действующего значения периодической составляющей ожидаемого тока. В этом случае дополнительно необходимо учитывать время горения дуги. В [3] приведены данные по времени горения дуги в зависимости от тока. Время горения дуги при токах от 50 до 250 А составляет около 0,1 с.

4.1.3.4 Действительное время отключения плавкой вставки может значительно отличаться от средних каталожных значений. Опытным путем установлено, что отклонения действительного времени отключения от заводских данных плавких вставок до 1000 В может достигать до 50 % [3]. Такой разброс принимается в наиболее ответственных случаях. В наиболее распространенных случаях обычно принимается разброс 25 %.

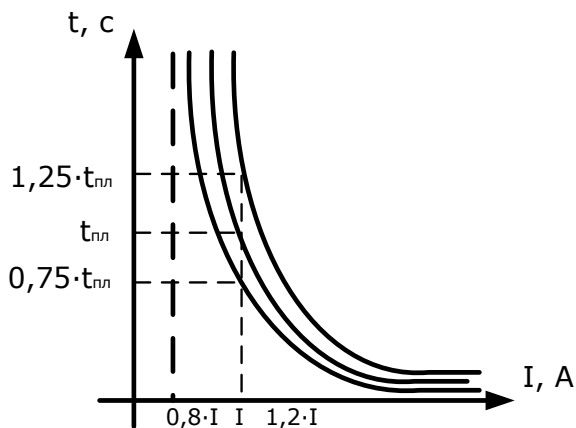


Рисунок 4.7 – Построение расчетных характеристик плавких вставок до 1000 В

4.1.3.5 Для плавких вставок выше 3 кВ, согласно [4], отклонения значения ожидаемого времени плавления при данном преддуговом времени от значения тока, полученного по времятоковой характеристике плавления, не должны превышать  $\pm 20\%$ .

Для согласования МТЗ с плавкими вставками рекомендуется выполнять построение характеристик плавких вставок с учетом возможных отклонений (рисунок 4.8).

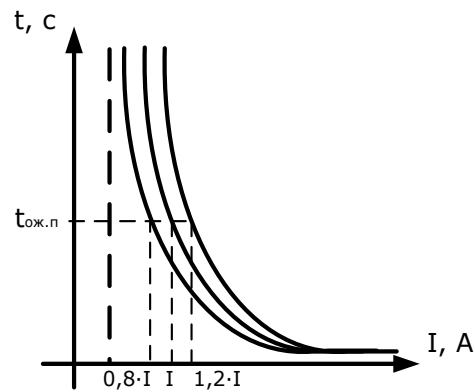
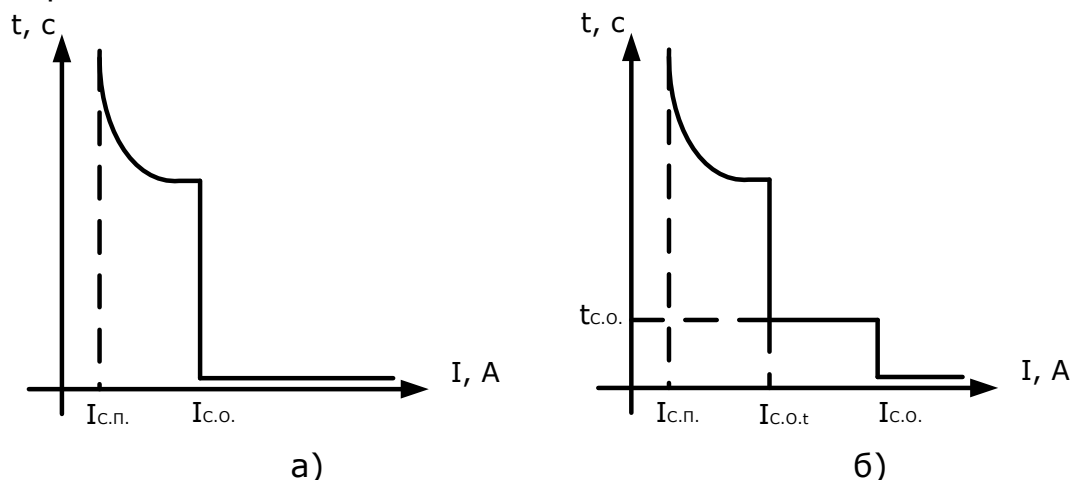


Рисунок 4.8 – Построение расчетных характеристик плавких вставок предохранителей выше 3 кВ

Согласно [4] значение одночасового тока плавления плавкой вставки заключается между значениями от  $1,3 \cdot I_{\text{вс}}$  до  $2,0 \cdot I_{\text{вс}}$ , что должно учитываться при согласовании по току.

#### 4.1.4 Времятоковые характеристики автоматических выключателей 0,4 кВ

4.1.4.1 Присоединения 0,4 кВ защищаются автоматическими выключателями. На рисунке 4.9 представлены типовые времятоковые характеристики автоматических выключателей.



- а) времятоковая характеристика автоматического выключателя с отсечкой без выдержки времени;  
 б) времятоковая характеристика автоматического выключателя с отсечкой с выдержкой времени

$I_{\text{с.п.}}$  - ток срабатывания защиты от перегрузки, А;

$I_{\text{с.о.т}}$  - ток срабатывания отсечки с выдержкой времени, А;

$I_{\text{с.о.}}$  - ток срабатывания отсечки без выдержки времени, А

Рисунок 4.9 – Времятоковые характеристики автоматических выключателей

4.1.4.2 Защитные характеристики автоматических выключателей имеют зависимую и независимую части.

Ток срабатывания защиты от перегрузки  $I_{с.п.}$  рассчитывают из условия возврата защиты после окончания самозапуска нагрузки. Защита от перегрузки отстраивается от самозапуска по времени.

Ток срабатывания отсечки  $I_{с.о.}$  отстраивают от максимального тока нагрузки с учетом самозапуска.

Дополнительно в автоматическом выключателе может быть реализована ТО с выдержкой времени (рисунок 4.9 б)). Токовая отсечка с выдержкой времени предназначена для согласования с токовыми отсечками предыдущих присоединений.

#### 4.1.5 Согласование по току

4.1.5.1 В тех случаях, когда возможно действие защиты последующего элемента Э1 (рисунок 4.10) из-за отказа защиты предыдущего элемента Э2 вследствие недостаточной чувствительности, чувствительность этих защит необходимо согласовать между собой. Согласование заключается в выборе таких токов срабатывания, при которых МТЗ элемента Э1 имела бы больший ток срабатывания, т.е. была менее чувствительна.

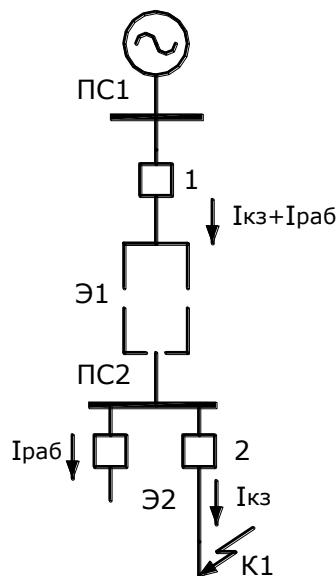


Рисунок 4.10 – Токораспределение при удаленном КЗ в сети с односторонним питанием

4.1.5.2 При согласовании чувствительности защит необходимо учитывать возможность существенного влияния токов нагрузки. Так при удаленных КЗ на элементе Э2 напряжение на шинах может сохраняться близким к нормальному, при этом через элемент Э1 будет проходить сумма тока КЗ поврежденного элемента и токов нагрузки неповрежденных элементов.

4.1.5.3 По условию согласования с защитами предыдущих элементов ток срабатывания защиты 1  $I_{с.з., А}$ , выбирают по формуле

$$I_{с.з.} = \frac{k_{отс}}{k_{ток}} \cdot (I_{с.з.макс} + \Sigma I_{раб.}), \quad (4.2)$$

где  $k_{отс}=1,2$  – коэффициент отстройки;

$k_{ток}$  – коэффициент токораспределения, который учитывается только при наличии нескольких источников питания, при одном источнике питания принимается равным 1;

$I_{с.з.макс}$  – наибольший из токов срабатывания защит одного из предыдущих присоединений, А;

$\Sigma I_{раб.}$  – суммарный ток нагрузки неповрежденных элементов (см. 4.1.5.2), А.

4.1.5.4 Если в качестве предыдущего защитного аппарата установлен предохранитель, то ток срабатывания  $I_{с.з.}$ , А, выбирают по формуле

$$I_{с.з.} = k_{отс} \cdot (k'_{отс} \cdot I_{вс.ном.макс} + \Sigma I_{раб.}), \quad (4.3)$$

где  $k_{отс}=1,3$  – коэффициент отстройки;

$k'_{отс}=2$  – коэффициент отстройки от номинального тока плавкой вставки предохранителя;

$I_{вс.макс}$  – наибольший из номинальных токов плавких вставок предохранителей, А;

$\Sigma I_{раб.}$  – суммарный ток нагрузки неповрежденных элементов (см. 4.1.5.2), А.

Зависимая характеристика выдержки времени позволяет выбирать меньший ток срабатывания по условию согласования с плавкими вставками предохранителей трансформаторов ответвлений.

4.1.5.5 Если в качестве предыдущего защитного аппарата установлен автоматический выключатель, то ток срабатывания  $I_{с.з.}$ , А, выбирают по формуле

$$I_{МТЗ с.з.} = k_{отс} \cdot (I_{с.о.} + \Sigma I_{раб.}), \quad (4.4)$$

где  $k_{отс}=1,3$  – коэффициент отстройки;

$I_{с.о.}$  – ток срабатывания отсечки автоматического выключателя, А;

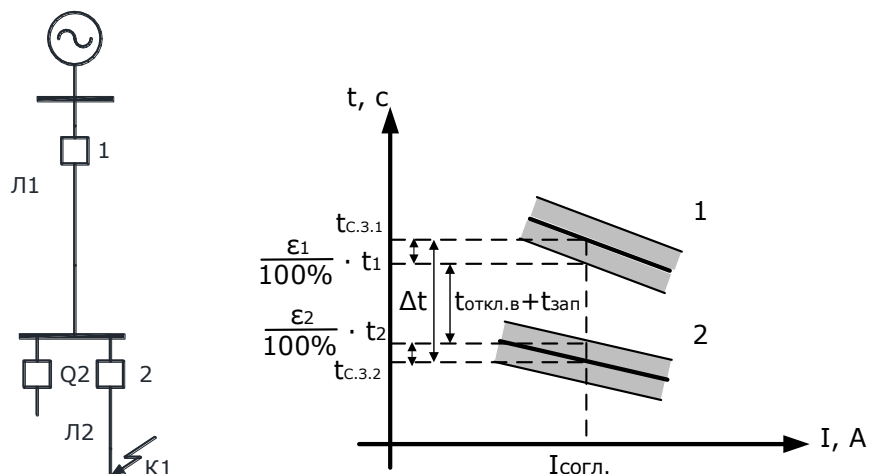
$\Sigma I_{раб.}$  – суммарный ток нагрузки, неповрежденных элементов (см. 4.1.5.2), А.

#### 4.1.6 Согласование по времени

4.1.6.1 Время срабатывания защиты выбирается из условия обеспечения селективности с защитами предыдущих и последующих элементов.

4.1.6.2 Разность между временем действия защит двух смежных элементов (защиты 1 и 2 на рисунке 4.11) называется ступенью селективности.

Выдержка времени защиты 1 должна быть на ступень селективности больше времени срабатывания защиты 2 для исключения неселективного срабатывания защиты 1 до отключения выключателя Q2 защитой 2.



а) первичная схема сети; б) времятоковые характеристики  
Рисунок 4.11 – Определение ступени селективности

Ступень селективности  $\Delta t, c$ , вычисляют по формуле

$$\Delta t = \frac{\varepsilon_1}{100} \cdot t_{c.з.1} + \frac{\varepsilon_2}{100} \cdot t_{c.з.2} + t_{откл.в} + t_{в1} + t_{зап}, \quad (4.5)$$

где  $\varepsilon_1$  - погрешность срабатывания по времени защиты 1 при токе согласования, %;

$t_{c.з.1}$  - выдержка времени защиты 1 при токе согласования, с;

$\varepsilon_2$  - погрешность срабатывания по времени защиты 2 при токе согласования, %;

$t_{c.з.2}$  - выдержка времени защиты 2 при токе согласования, с;

$t_{откл.в}$  - полное время отключения выключателя Q2 (интервал времени от момента подачи команды на отключение до момента погасания дуги во всех полюсах выключателя), с;

$t_{в1}$  - время возврата защиты 1, для блоков БМРЗ принимается равным 0,03 с;

$t_{зап}$  - необходимое время запаса, учитывающее в том числе время срабатывания промежуточных реле, с.

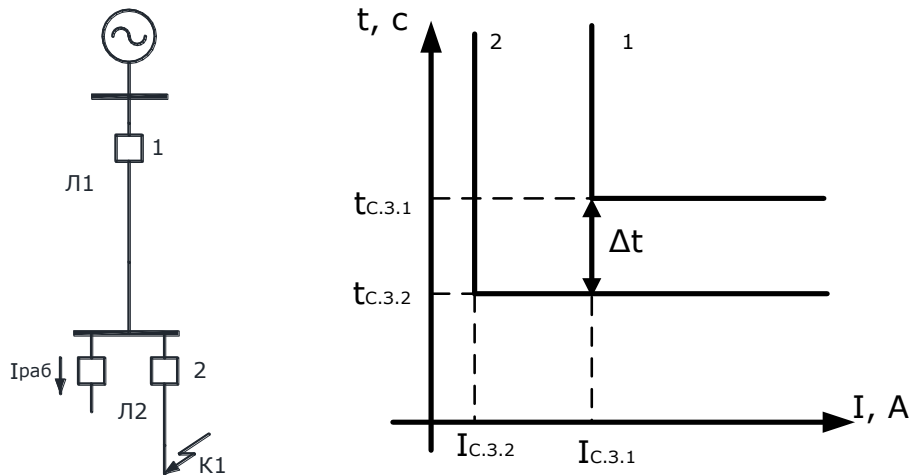
4.1.6.3 Для защит с независимыми характеристиками время срабатывания  $t_{c.з.1}, c$ , выбирают по формуле

$$t_{c.з.1} = t_{c.з.2} + \Delta t, \quad (4.6)$$

где  $t_{c.з.2}$  - время срабатывания предыдущей защиты, с;

$\Delta t$  - ступень селективности, рассчитывается по формуле (4.5), с.

Пример согласования защит с независимыми характеристиками представлен на рисунке 4.12.



а) первичная схема сети; б) времятоковые характеристики  
Рисунок 4.12 – Согласование характеристик защит

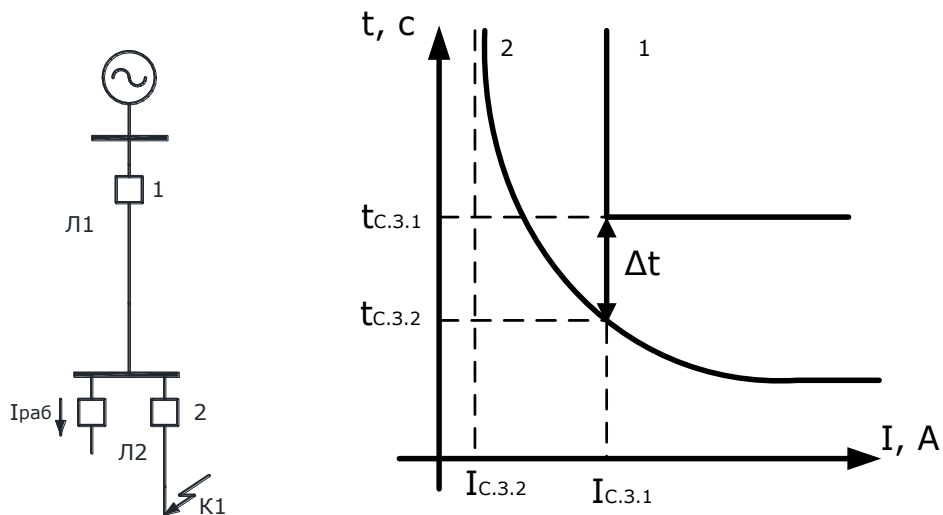
4.1.6.4 Выдержку времени защиты с независимой характеристикой по условию согласования с защитой с зависимой характеристикой выбирают следующим образом (рисунок 4.13):

- определяют время срабатывания защиты 2  $t_{с.з.2}, c$ , при токе срабатывания защиты 1  $I_{с.з.1}$ ;
- рассчитывают ступень селективности  $\Delta t$  по формуле (4.5);
- определяют время срабатывания защиты 1  $t_{с.з.1}, c$ , по формуле

$$t_{с.з.1} = t_{с.з.2} + \Delta t, \quad (4.7)$$

где  $t_{с.з.2}$  – время срабатывания защиты 2, с;

$\Delta t$  – ступень селективности, с.



а) первичная схема сети; б) времятоковые характеристики

Рисунок 4.13 – Согласование характеристик защит

4.1.6.5 При согласовании защит с зависимыми характеристиками (рисунок 4.14) уставку коэффициента усиления защиты с зависимой характеристикой выбирают следующим образом:

- определяют ток согласования  $I_{\text{согл}}$ . При использовании отсечки ток согласования принимают равным току срабатывания отсечки (рисунок 4.14 в)). Если отсечка не используется, то ток согласования принимают равным максимальному значению тока трехфазного КЗ в начале присоединения 2 (рисунок 4.14 б));

- рассчитывают время срабатывания защиты 2  $t_{\text{с.з.2}}$  при токе согласования  $I_{\text{согл}}$ ;

- рассчитывают ступень селективности  $\Delta t$  по формуле (4.5);

- определяют требуемое время срабатывания защиты 1  $t_{\text{с.з.1}}$ , с, по формуле

$$t_{\text{с.з.1}} = t_{\text{с.з.2}} + \Delta t, \quad (4.8)$$

где  $t_{\text{с.з.2}}$  – время срабатывания защиты 2, с;

$\Delta t$  – ступень селективности, с;

- задаются типом характеристики (см. 4.1.2.3);

- рассчитывают уставку коэффициента усиления защиты 1 по формуле

$$K = \frac{t_{\text{с.з.1}}}{k} \cdot \left( \left( \frac{I_{\text{согл}}}{I_{\text{с.з.1}}} \right)^\alpha - 1 \right), \quad (4.9)$$

где  $t_{\text{с.з.1}}$  – время срабатывания защиты 1, с;

$k, \alpha$  – постоянные величины, зависящие от типа характеристики;

$I_{\text{согл}}$  – ток согласования, А;

$I_{\text{с.з.1}}$  – ток срабатывания защиты 1, А.

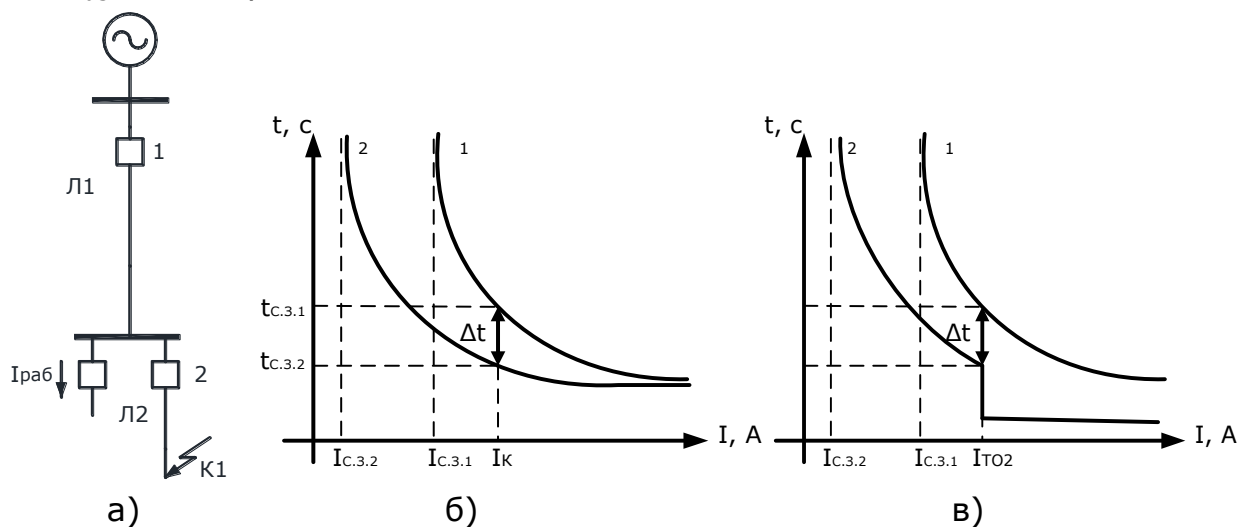


Рисунок 4.14 – Согласование времятоковых характеристик защит

Рекомендуется проводить проверку выполнения условия селективности согласуемых защит при токах, меньших тока согласования  $I_{\text{согл}}$ :

$$t_{\text{с.з.1}} > t_{\text{с.з.2}} + \Delta t, \quad (4.10)$$

где  $t_{с.з.2}$  – время срабатывания защиты 2, с;

$\Delta t$  – степень селективности, рассчитывается по формуле (4.5), с.

Необходимо отметить, что степень селективности защит с зависимыми выдержками времени зависит от расчетной выдержки времени согласуемых защит. При токах, меньших тока согласования  $I_{согл}$ , увеличиваются выдержки времени защит, соответственно увеличивается погрешность и необходимо увеличивать степень селективности.

4.1.6.6 Для наглядности рекомендуется выполнять совместное построение времятоковых характеристик согласуемых защит. Совместное построение времятоковых характеристик согласуемых защит называется картой селективности.

4.1.6.7 Согласование защиты с плавкими вставками предохранителей выполняют так же, как выполняют согласование с защитой с зависимой характеристикой выдержки времени (см. 4.1.6.5). При этом необходимо учитывать, что плавкие вставки предохранителей имеют бóльшую погрешность по сравнению с устройствами релейной защиты.

4.1.6.8 При согласовании защиты с автоматическими выключателями ток срабатывания защиты отстраивают от тока срабатывания отсечки  $I_{с.о.}$ . Согласование по времени выполняют по аналогии с вышеприведенными примерами (см. рисунок 4.15).

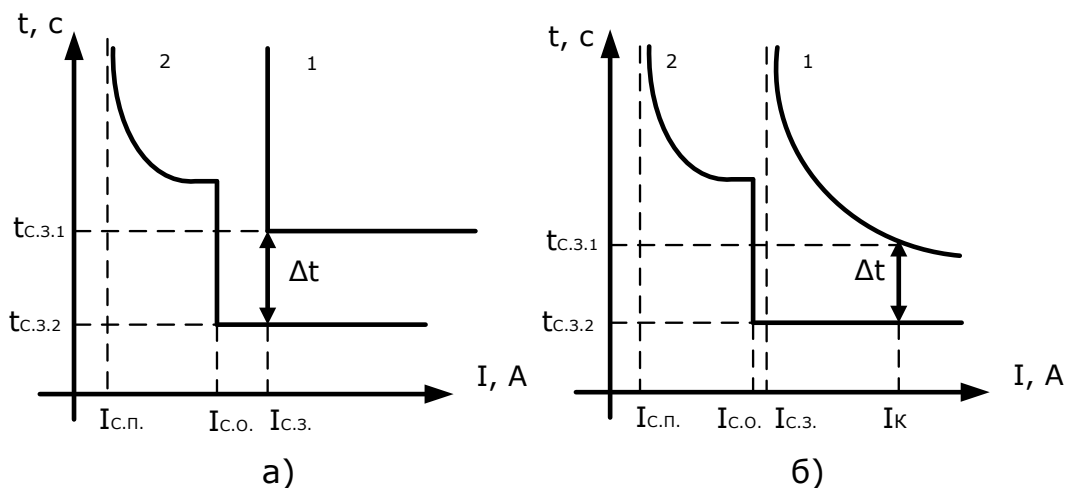
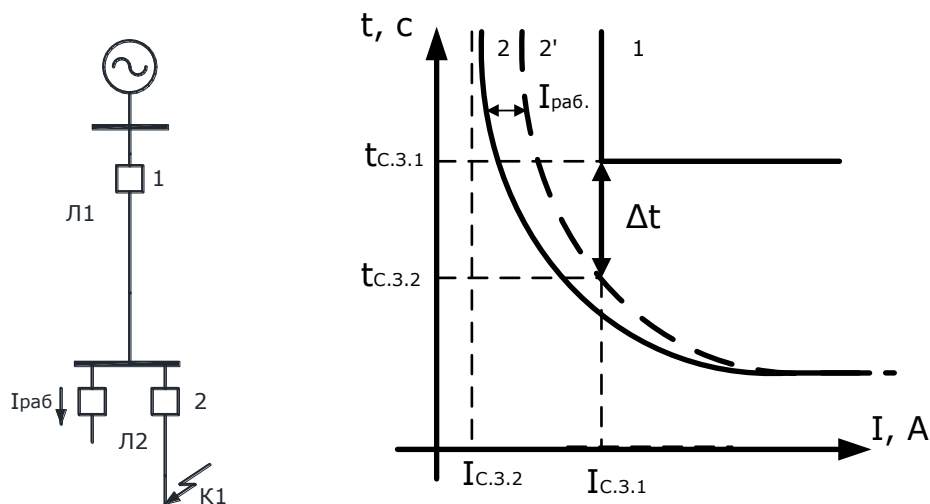


Рисунок 4.15 – Согласование характеристик защит с характеристиками автоматических выключателей

4.1.6.9 Для учета влияния токов нагрузки неповрежденных элементов характеристика срабатывания предыдущего элемента (характеристика 2, рисунок 4.16) должна быть сдвинута вправо на отрезок, равный значению суммарного тока нагрузки  $I_{раб}$ .





а) первичная схема сети; б) времятоковые характеристики

Рисунок 4.16 – Согласование характеристик с учетом тока нагрузки

## 4.2 Токовые защиты кабельных и воздушных линий

### 4.2.1 Общие требования к защитам кабельных и воздушных линий

4.2.1.1 Расчет уставок токовых защит кабельных и воздушных линий выполняют в соответствии с рекомендациями, приведенными в [5].

4.2.1.2 На линиях с односторонним питанием от многофазных КЗ предусматривают двухступенчатую токовую защиту. Первую ступень выполняют в виде ТО, вторую ступень в виде МТЗ.

На линиях с двусторонним питанием, на линиях, входящих в кольцевую сеть с одной точкой питания, применяют те же защиты, что и на линиях с односторонним питанием, при необходимости выполняя их направленными.

4.2.1.3 Для обеспечения термической стойкости кабельных линий по всей длине применяют ускорение МТЗ при включении выключателя после АПВ.

Ускорение МТЗ применяется также при опробовании линии (включении на холостой ход). Основным требованием к ускоряемой ступени является обеспечение чувствительности при всех КЗ на защищаемой линии.

В блоках БМРЗ функции ускорения МТЗ после АПВ и при опробовании объединены. Ускорение МТЗ осуществляется при любом включении выключателя.

### 4.2.2 Расчет уставок ТО

4.2.2.1 По условию отстройки от трехфазных КЗ в конце линии ток срабатывания ТО  $I_{ТО\ с.з.}, A$ , вычисляют по формуле

$$I_{ТО\ с.з.} = k_{отс} \cdot I_{КЗ\ макс}^{(3)}, \quad (4.11)$$

где  $k_{отс} = 1,3$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас;

$I_{КЗ\ макс}^{(3)}$  – максимальное значение тока трехфазного КЗ в максимальном режиме системы в конце линии, А.

4.2.2.2 При расчете ТО линии, по которой питается один трансформатор (блок линия-трансформатор), ТО отстраивают от тока КЗ за трансформатором.

При расчете ТО линии, по которой питается несколько трансформаторов, ТО должна отстраиваться от КЗ на выводах ближайшего трансформатора для обеспечения селективности между ТО и защитами трансформаторов.

4.2.2.3 На линии, по которой питается несколько трансформаторов, следует проверить надежность отстройки ТО линии от БТН всех трансформаторов, подключенных к защищаемой линии.

По условию отстройки от БТН силовых трансформаторов ток срабатывания ТО  $I_{ТО\ с.з.}$ , А, вычисляют по формуле

$$I_{ТО\ с.з.} = k_{бтн} \cdot \Sigma I_{ном.тр} , \quad (4.12)$$

где  $k_{бтн} = 7$  – коэффициент броска тока намагничивания;

$\Sigma I_{ном.тр}$  – сумма номинальных токов всех трансформаторов, питающихся по линии, А.

4.2.2.4 Применение ТО позволяет уменьшить время отключения близких КЗ, тем самым уменьшая нагрев кабельной линии при КЗ.

### 4.2.3 Неселективная отсечка без выдержки времени

4.2.3.1 На нереактивированных линиях с односторонним питанием, отходящих от шин электростанций с синхронными генераторами, а также от шин подстанций, питающих крупные синхронные двигатели, ТО должна выполняться без выдержки времени [1]. Зона их действия должна выбираться из условия быстрого отключения КЗ, вызывающих снижение напряжения на шинах ниже 0,5 – 0,6 номинального. Для обеспечения этого требования допускается выполнять ТО неселективной, т.е. разрешать ее срабатывание при КЗ не только на защищаемой линии, но и на других линиях и трансформаторах, питающихся по защищаемой линии. Неселективная отсечка должна применяться в сочетании с устройствами АПВ или АВР, исправляющими полностью или частично ее неселективное действие.

4.2.3.2 Ток срабатывания неселективной отсечки выбирают из условия надежного срабатывания в зоне, где трехфазные КЗ вызывают снижение напряжения в месте установки отсечки ниже допустимого значения. Выбор уставок неселективной отсечки приведен в [5].

#### 4.2.4 ТО с выдержкой времени

4.2.4.1 Дополнительно к ТО без выдержки времени возможно применение ТО с выдержкой времени, например, в схеме, приведенной на рисунке 4.17.

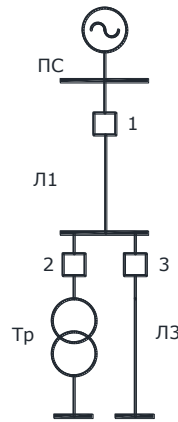


Рисунок 4.17 – Применение ТО с выдержкой времени

Наличие выдержки позволяет уменьшить ток срабатывания по следующим причинам:

- ТО выполняется с отстройкой от КЗ в конце зоны действия ТО защиты 3;
- $k_{отс}$  возможно принять 1,2, что связано с затуханием апериодической составляющей к моменту срабатывания ТО;
- не требуется отстройка от бросков тока намагничивания силовых трансформаторов.

#### 4.2.5 Выбор параметров срабатывания МТЗ

Уставки МТЗ должны обеспечивать:

- отсутствие срабатывания МТЗ при послеаварийных перегрузках;
- согласование действия по току и по времени с защитами предыдущих элементов;
- необходимую чувствительность при всех видах КЗ в основной зоне и в зоне резервирования.

##### 4.2.5.1 Отсутствие срабатывания МТЗ при послеаварийных перегрузках

4.2.5.1.1 Послеаварийные перегрузки могут возникать в различных режимах. Ниже рассмотрены основные причины возникновения послеаварийных перегрузок и способы отстройки от них.

4.2.5.1.2 Послеаварийные перегрузки могут возникать при отключении с выдержкой времени близких КЗ на предыдущих элементах.

При выборе тока срабатывания защиты 1 на рисунке 4.18 необходимо учитывать возможность аварийной перегрузки линии Л1 после отключения близкого КЗ в точке К1 линии 2.

При близких КЗ на предыдущих элементах (точка К1) происходит снижение напряжения на шинах ПС2. Вследствие снижения напряжения двигатели нагрузки ПС2 затормаживаются и после отключения поврежденного элемента защитой 2 происходит процесс самозапуска двигателей, сопровождающийся увеличением рабочего тока линии Л1.

Процесс самозапуска продолжается от 10 до 15 с, поэтому нецелесообразно от него отстраиваться путем увеличения выдержки времени.

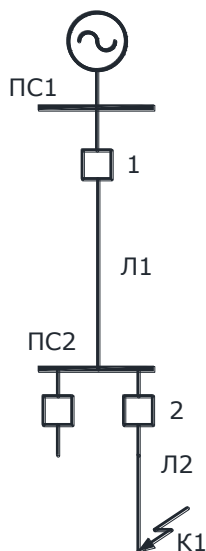


Рисунок 4.18 – Схема сети с односторонним питанием и одиночными линиями

По условию отстройки от самозапуска двигателей нагрузки после отключения близкого КЗ ток срабатывания защиты  $I_{\text{МТЗ с.з.}}, \text{А}$ , рассчитывают по формуле

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{раб.макс}} / k_{\text{в}}, \quad (4.13)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;

$k_{\text{сзп}}$  – коэффициент самозапуска;

$I_{\text{раб.макс}}$  – максимальный рабочий ток защищаемой линии, А;

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

4.2.5.1.3 Ток срабатывания МТЗ должен отстраиваться от тока самозапуска двигателей при восстановлении питания действием АПВ или АВР после бестоковой паузы.

При восстановлении напряжения после перерыва питания ПС1 (рисунок 4.18) по линии Л1 за счет самозапуска нагрузки может проходить ток, превышающий рабочий ток.

По условию отстройки от самозапуска двигателей нагрузки после восстановления питания действием автоматики ток срабатывания защиты  $I_{\text{МТЗ с.з.}}, \text{А}$ , рассчитывают по формуле

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{раб.макс}} / k_{\text{в}}, \quad (4.14)$$

где  $k_{отс}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;

$k_{сзп}$  – коэффициент самозапуска;

$I_{раб.макс}$  – максимальный рабочий ток защищаемой линии, А;

$k_B = 0,95$  – коэффициент возврата. Коэффициент возврата рекомендуется использовать для учета возможности кратковременного срабатывания защиты за счет апериодической составляющей тока самозапуска.

4.2.5.1.4 Аварийные перегрузки могут возникать при автоматическом включении дополнительной нагрузки при срабатывании устройства АВР.

При нормальной работе двух линий (рисунок 4.19), каждой со своей нагрузкой, и действии АВР после отключения одной из них по оставшемуся элементу будет проходить свой рабочий ток и ток самозапуска нагрузки отключившейся линии.

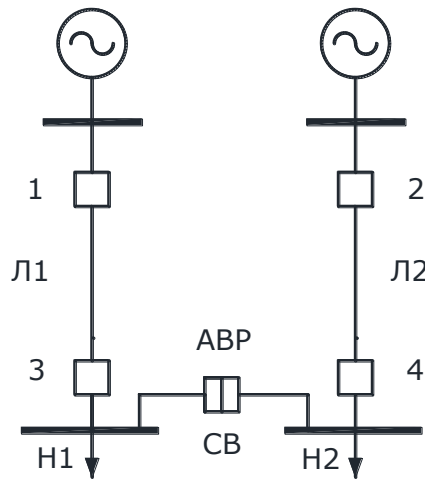


Рисунок 4.19 – Схема раздельной работы двух линий с устройством АВР на СВ

По условию отстройки тока перегрузки при действии АВР ток срабатывания МТЗ Л1  $I_{МТЗ с.з.}$ , А, выбирают по формуле

$$I_{МТЗ с.з.} = k_{отс}/k_B \cdot (k_{сзп} \cdot I_{раб.макс Л2} + k'_{отс} \cdot I_{раб.макс Л1}), \quad (4.15)$$

где  $k_{отс}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;

$k_B = 0,95$  – коэффициент возврата;

$k_{сзп}$  – коэффициент самозапуска нагрузки Н2;

$I_{раб.макс Л1}, I_{раб.макс Л2}$  – максимальный рабочий ток линий Л1 и Л2, А.

Выбирается с учетом максимально допустимой перегрузки оставшейся в работе линии. Для кабелей 6; 10 кВ допускается перегрузка 40 % от номинального тока линии;

$k'_{отс}$  – коэффициент, учитывающий увеличение тока нагрузки Н1 из-за снижения напряжения на шинах при подключении к ним после АВР заторможенных двигателей нагрузки Н2. Значение этого коэффициента для нагрузки, в основном состоящей из двигателей, участвующих в самозапуске, принимается равным от 1,5 до 2.

#### 4.2.5.2 Согласование по току

4.2.5.2.1 Согласование МТЗ по току с защитами предыдущих элементов выполняют в соответствии с рекомендациями, приведенными в 4.1.5.

#### 4.2.5.3 Проверка чувствительности

4.2.5.3.1 Чувствительность МТЗ линии по току определяется при металлическом КЗ в конце линии по формуле

$$k_{\text{chl}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}}{I_{\text{МТЗ с.з.}}}, \quad (4.16)$$

где  $I_{\text{КЗ мин}}$  – минимальное значение тока двухфазного КЗ в конце линии в минимальном режиме работы системы, А;

$I_{\text{МТЗ с.з.}}$  – ток срабатывания МТЗ, А.

МТЗ выполняет функции основной защиты линии, поэтому значение коэффициента чувствительности должно быть больше 1,5.

4.2.5.3.2 Если коэффициент чувствительности оказывается меньше указанного, то необходимо добиться повышения чувствительности, путем замены защиты на более совершенную (например, дистанционную), либо путем уменьшения основной зоны защиты (установка секционирующего выключателя с защитой).

#### 4.2.5.4 Расчет времени срабатывания МТЗ

4.2.5.4.1 Время срабатывания защиты выбирается из условия обеспечения селективности с защитами предыдущих элементов (см. 4.1.6).

4.2.5.4.2 После расчета уставок защиты от многофазных замыканий необходимо выполнять проверку кабельных линий на термическую стойкость.

Термическая стойкость кабелей по ПУЭ должна обеспечиваться [1]:

- для одиночных кабелей – при токе, равном току КЗ в начале кабеля;
- для одиночного кабеля с разными сечениями – при токе, равном току КЗ в начале каждого участка с изменением сечения;
- для пучка из двух и более кабелей – при токе КЗ в конце пучка кабелей.

В первых двух случаях ток КЗ больше тока срабатывания ТО, поэтому проверка проводится с учетом выдержки времени ТО.

Дополнительно необходимо проводить проверку при токе, при котором ТО находится на грани срабатывания. Для упрощения рекомендуется проводить при токе срабатывания ТО. В этом случае расчетное время протекания тока КЗ должно рассчитываться с учетом времени срабатывания МТЗ.

4.2.5.4.3 За время бестоковой паузы АПВ порядка нескольких секунд температура кабеля практически не изменится и при включении от

АПВ на устойчивое КЗ будет происходить еще больший нагрев кабеля. Поэтому для определения термической стойкости кабеля при наличии АПВ необходимо удваивать время протекания тока.

Для обеспечения термической стойкости кабельных линий по всей длине применяют ускорение МТЗ при включении выключателя.

4.2.5.4.4 Выдержку времени ускоренной МТЗ не согласуют с выдержками времени предыдущих присоединений, но её необходимо отстраивать от броска тока намагничивания силовых трансформаторов.

Для отстройки от броска тока намагничивания силового трансформатора используют блокировку МТЗ по второй гармонике тока. При использовании блокировки по второй гармонике выдержка времени МТЗ не отстраивается от длительности броска тока намагничивания.

## 4.2.6 Примеры расчета уставок

### 4.2.6.1 Линия с ответвлениями

4.2.6.1.1 Пример расчета уставок приведен для линии с ответвлениями. В конце каждого ответвления установлен трансформатор 10/0,4 кВ, защищенный предохранителями ПКТ. Первичная схема приведена на рисунке 4.20.

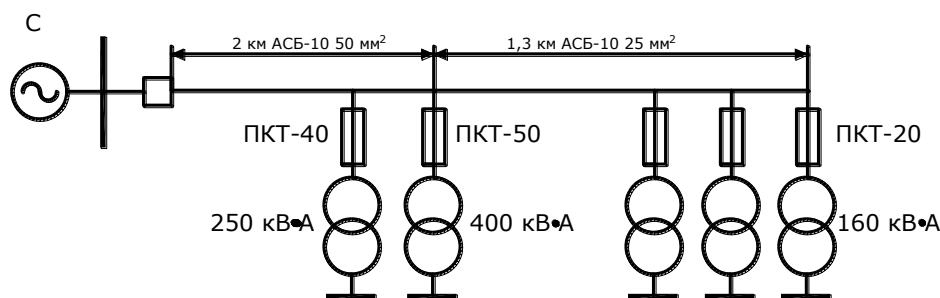


Рисунок 4.20 – Первичная схема линии с ответвлениями

Параметры питающей системы:

- $I_{к\text{ макс}} = 3 \text{ кА}$  – ток КЗ системы в максимальном режиме;
- $U_{с\text{ ном}} = 10,5 \text{ кВ}$  – среднее номинальное напряжение системы.

Характеристики трансформаторов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 Характеристика трансформаторов

Тип	Мощность, кВ·А	Номинальное напряжение, кВ	Напряжение короткого замыкания $u_{к\%}$	$I_{\text{раб. макс}}, \text{ А}$	$Z_{\text{тр}}, \text{ Ом}$
ТМГ-250/10	250	10,5/0,4	5,5	13,7	24,3
ТМГ-400/10	400			22	15,2
ТМГ-160/10	160			8,8	37,9

Параметры линий:

- КЛ-1: алюминий АСБ-10, 50 мм²

- $R_{1\text{ уд}} = 0,59$  Ом/км – удельное активное сопротивление прямой последовательности;
- $X_{1\text{ уд}} = 0,09$  Ом/км – удельное реактивное сопротивление прямой последовательности;
- $L_1 = 2$  км – длина линии;
- КЛ-2: алюминий АСБ-10, 25 мм<sup>2</sup>
- $R_{2\text{ уд}} = 1,17$  Ом/км – удельное активное сопротивление прямой последовательности;
- $X_{2\text{ уд}} = 0,1$  Ом/км – удельное реактивное сопротивление прямой последовательности;
- $L_2 = 1,3$  км – длина линии.

Блок релейной защиты БМРЗ-152-КЛ.

Трансформаторы тока ТОЛ-СЭЩ-10:

- $I_{\text{ТТ } 1\text{ ном}} = 100$  А – номинальный первичный ток ТТ;
- $I_{\text{ТТ } 2\text{ ном}} = 5$  А – номинальный вторичный ток ТТ;
- $n_{\text{Т}} = 20$  – номинальный коэффициент трансформации ТТ.

4.2.6.1.2 Сопротивление системы рассчитать по формуле<sup>1)</sup>

$$x_c = \frac{U_{\text{с ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к макс}}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 3} = 2,02 \text{ Ом}$$

4.2.6.1.3 Сопротивление линий рассчитать по формуле<sup>2)</sup>

$$Z_{\text{л1}} = (R_{1\text{ уд}} + j \cdot X_{1\text{ уд}}) \cdot L_1 = (0,59 + j \cdot 0,09) \cdot 2 = (1,18 + j \cdot 0,18) \text{ Ом}$$

$$Z_{\text{л2}} = (R_{2\text{ уд}} + j \cdot X_{2\text{ уд}}) \cdot L_2 = (1,17 + j \cdot 0,1) \cdot 1,3 = (1,52 + j \cdot 0,13) \text{ Ом}$$

4.2.6.1.4 Ток трехфазного КЗ в точке подключения трансформаторов, ближних к источнику питания рассчитать по формуле<sup>3)</sup>

$$I_{\text{КЗ макс}}^{(3)} = \frac{U_{\text{с ном}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_3^2 + x_3^2}} = \frac{10,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{1,18^2 + (2,02 + 0,18)^2}} = 2428 \text{ А}$$

4.2.6.1.5 По условию отстройки от трехфазных КЗ в конце линии ток срабатывания ТО  $I_{\text{ТО с.з.}}, \text{А}$ , вычислить по формуле (4.11)

$$I_{\text{ТО с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{КЗ макс}}^{(3)} = 1,3 \cdot 2428 = 3157 \text{ А}$$

По условию отстройки от БТН силовых трансформаторов ток срабатывания ТО  $I_{\text{ТО с.з.}}, \text{А}$ , вычислить по формуле (4.12)

$$I_{\text{ТО с.з.}} = k_{\text{бтн}} \cdot \Sigma I_{\text{ном.тр}} = 7 \cdot (13,7 + 22 + 8,8 \cdot 3) = 435 \text{ А}$$

В качестве тока срабатывания ТО выбрать наибольшее из полученных значений  $I_{\text{ТО с.з.}} = 3157 \text{ А}$ .

<sup>1)</sup> - см. формулу (3.4) [6]

<sup>2)</sup> - см. формулу (3.14) [6]

<sup>3)</sup> - см. формулу (3.28) [6]



4.2.6.1.6 По условию отстройки от самозапуска двигателей нагрузки после восстановления питания действием автоматики ток срабатывания МТЗ рассчитать по формуле (4.13)

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{раб.макс}}}{k_{\text{в}}} = \frac{1,2 \cdot 2 \cdot (13,7 + 22 + 8,8 \cdot 3)}{0,95} = 157 \text{ А}$$

По условию согласования с плавкими вставками предохранителей трансформаторов ток срабатывания МТЗ выбрать по формуле (4.3)

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot (k'_{\text{отс}} \cdot I_{\text{вс.ном.макс}} + \Sigma I_{\text{раб.макс}}) = 1,3 \cdot (2 \cdot 50 + (13,7 + 8,8 \cdot 3)) = 182 \text{ А}$$

В качестве тока срабатывания МТЗ выбрать наибольшее из полученных значений  $I_{\text{МТЗ с.з.}} = 182 \text{ А}$ .

4.2.6.1.7 Рассчитать выдержку времени МТЗ с независимой времятоковой характеристикой.

При токе  $I_{\text{МТЗ с.з.}}$  плавкая вставка плавится за 10 с (рисунок 4.21), поэтому необходимо увеличить ток срабатывания МТЗ для уменьшения выдержки времени. Для обеспечения времени срабатывания около 0,5 с принять ток срабатывания МТЗ  $I_{\text{МТЗ с.з.}} = 500 \text{ А}$ .

Выдержку времени МТЗ с независимой характеристикой выбрать по условию согласования с плавкой вставкой предохранителя ПКТ 50:

- определить время плавления плавкой вставки предохранителя при токе срабатывания МТЗ 500 А  $t_{\text{вс}} = 0,1 \text{ с}$ ;

- рассчитать степень селективности  $\Delta t, \text{с}$ , по формуле (4.5)

$$\Delta t = \frac{\varepsilon_1}{100} \cdot t_1 + \frac{\varepsilon_2}{100} \cdot t_2 + t_{\text{дуги}} + t_{\text{зап}} = 0,03 + 0,2 + 0,1 + 0,1 = 0,43 \text{ с}$$

Погрешность плавкой вставки предохранителя определена, как разность между кривой 1 и кривой 1' (рисунок 4.21) при токе срабатывания МТЗ  $I_{\text{МТЗ с.з.}} = 500 \text{ А}$ . Кривая 1' построена с учетом погрешности плавкой вставки предохранителя (см. 4.1.3.5) и с учетом влияния нагрузки (см. 4.1.6.9);

- определить время срабатывания МТЗ по формуле (4.7)

$$t_{\text{с.з.1}} = t_{\text{вс}} + \Delta t = 0,1 + 0,43 = 0,53 \text{ с}$$

4.2.6.1.8 При использовании МТЗ с зависимой времятоковой характеристикой коэффициент усиления МТЗ выбрать следующим образом:

- рассчитать время плавления плавкой вставки предохранителя ПКТ-50 наиболее мощного трансформатора при КЗ на вводах трансформатора  $I_{\text{КЗ макс}}^{(3)} = 1886 \text{ А}$ ,  $t_{\text{вс}} = 0,01 \text{ с}$ ;

- определить степень селективности по формуле (4.5)

$$\Delta t = \frac{\varepsilon_1}{100} \cdot t_1 + \frac{\varepsilon_2}{100} \cdot t_2 + t_{\text{дуги}} + t_{\text{зап}} = 0,03 + 0,01 + 0,1 + 0,1 = 0,24 \text{ с};$$

- определить требуемое время срабатывания МТЗ при токе, равном  $I_{\text{КЗ макс}}^{(3)}$ , по формуле (4.8)

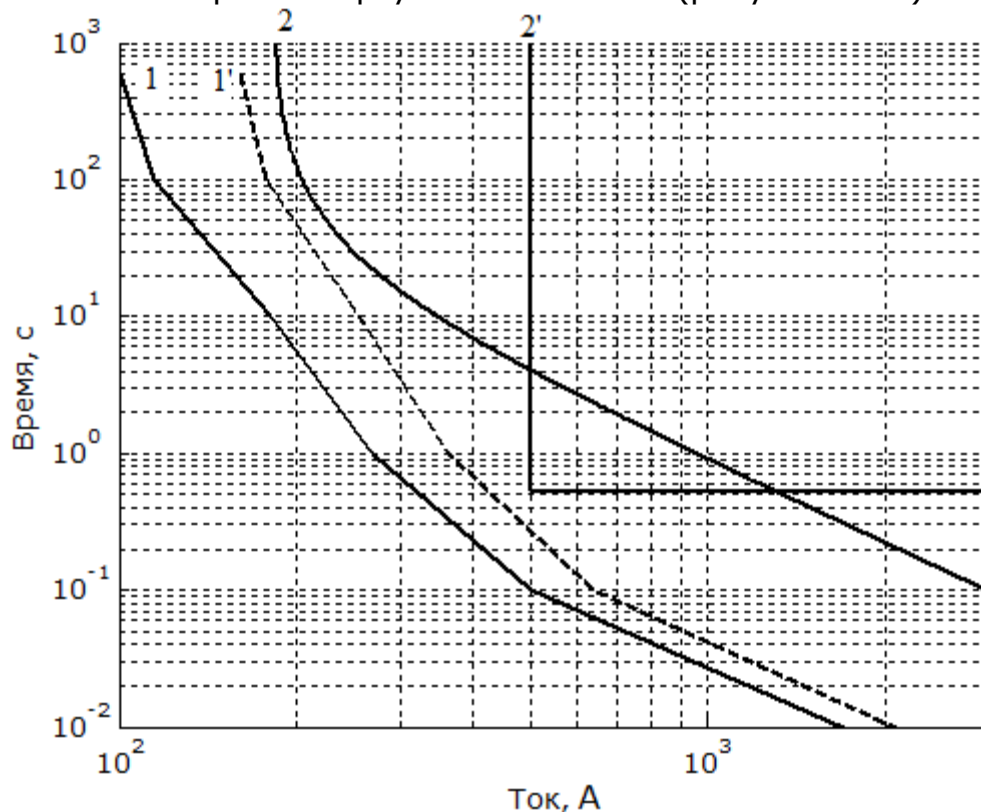
$$t_{\text{МТЗ с.з.}} = t_{\text{вс}} + \Delta t = 0,01 + 0,24 = 0,25 \text{ с};$$

- выбрать тип характеристики. Рекомендуется применение чрезвычайно инверсной характеристики;

- рассчитать уставку коэффициента усиления МТЗ по формуле (4.9)

$$K = \frac{t_{с.з.}}{k} \cdot \left( \left( \frac{I_{КЗ \text{ макс}}^{(3)}}{I_{МТЗ \text{ с.з.}}} \right)^\alpha - 1 \right) = \frac{0,25}{80} \cdot \left( \left( \frac{1886}{182} \right)^2 - 1 \right) = 0,33$$

4.2.6.1.9 Построить карту селективности (рисунок 4.21).



- 1 – времятоковая характеристика плавкой вставки предохранителя ПКТ-50;
- 1' – времятоковая характеристика плавкой вставки предохранителя ПКТ-50 с учетом влияния нагрузки и погрешности;
- 2 –зависимая времятоковая характеристика МТЗ;
- 2' – независимая времятоковая характеристика МТЗ

Рисунок 4.21– Карта селективности МТЗ и плавкой вставки предохранителя ПКТ-50

4.2.6.1.10 Пересчет тока, выраженного в первичных значениях, во вторичные значения выполнить по формуле (3.1)

$$I_{Т0 \text{ с.р.}} = \frac{I_{Т0 \text{ с.з.}}}{n_T} = \frac{3157}{20} = 158 \text{ А.}$$

Для МТЗ с независимой характеристикой

$$I_{МТЗ \text{ с.р.}} = \frac{I_{МТЗ \text{ с.з.}}}{n_T} = \frac{500}{20} = 25 \text{ А.}$$

Для МТЗ с чрезвычайно-инверсной характеристикой

$$I_{МТЗ \text{ с.р.}} = \frac{I_{МТЗ \text{ с.з.}}}{n_T} = \frac{182}{20} = 9,1 \text{ А.}$$

4.2.6.1.11 Уставки, вводимые в блок БМРЗ-152-КЛ-01, приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Уставки для ввода в блок БМРЗ-152-КЛ-01

Обозначение в блоке	Комментарий	Обозначение в расчете	Значение уставки
<b>ТО</b>			
S101	Ввод ТО	-	Введен
ТО РТ1	Ток срабатывания ТО без выдержки времени, А	$I_{ТО \text{ с.р.}}$	158
<b>МТЗ</b>			
S103	Ввод первой ступени МТЗ	-	Введен
МТЗ РТ1	Ток срабатывания первой ступени МТЗ, А	$I_{МТЗ \text{ с.р.}}$	25
МТЗ Т1-1	Выдержка времени первой ступени МТЗ с независимой выдержкой времени, с	$t_{МТЗ \text{ с.з.}}$	0,53
S109	Первая ступень МТЗ с зависимой выдержкой времени	-	Выведен – МТЗ с незав. хар.; Введен – МТЗ с зав. хар.
МТЗ зав.хар.	Выбор типа зависимой характеристики	-	4
МТЗ Т1-2	Дополнительная задержка срабатывания МТЗ с зависимой характеристикой, с	-	0
К	Коэффициент усиления МТЗ с зависимой характеристикой	$K$	0,33

### 4.3 Защита и автоматика трансформаторов 6(10)/0,4 кВ

#### 4.3.1 Общие требования к защита трансформаторов

4.3.1.1 Расчет уставок токовых защит трансформаторов 6(10)/0,4 кВ выполняют в соответствии с рекомендациями, приведенными в [7].

4.3.1.2 Согласно ПУЭ [1] для трансформаторов напряжением выше 3 кВ должны быть предусмотрены устройства релейной защиты, перечисленные в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Защиты трансформаторов 6(10)/0,4 кВ

Вид защиты		Номинальная полная мощность трансформатора	
		$S_{т.ном} < 1 \text{ МВт}$	$1 \text{ МВт} \leq S_{т.ном} < 6,3 \text{ МВт}$
1	Защита от многофазных замыканий в обмотках и на выводах	ТО	ТО; Дифференциальная защита, если: - ТО не удовлетворяет требованиям чувствительности, а МТЗ имеет выдержку времени более 0,5 с; - трансформатор установлен в районе, подверженном землетрясениям; - на параллельно работающих трансформаторах 4 МВ·А
2	Защита от однофазных замыканий на землю в обмотке и на выводах, присоединённых к сети с глухозаземленной нейтралью	Предусматривается на трансформаторах с соединением обмотки низшего напряжения в звезду с заземленной нейтралью: - МТЗ со стороны высшего напряжения; - специальная защита нулевой последовательности, устанавливаемая в нулевом проводе трансформатора, если МТЗ не удовлетворяет требованиям чувствительности	
3	Защита от витковых замыканий в обмотках	Не применяется	Рекомендуется применение газовой защиты
		Газовая защита для внутрицеховых трансформаторов мощностью больше 630 кВ·А	
4	Защита от токов в обмотках, обусловленных внешними КЗ	МТЗ	МТЗ; МТЗ с пуском по напряжению
5	Защита от токов в обмотках, обусловленных перегрузкой	На трансформаторах мощностью 0,4 МВ·А и более с действием на сигнал	

4.3.1.3 В случаях присоединения трансформаторов (кроме внутрицеховых) к линиям без выключателей (например, по схеме блока линия - трансформатор) для отключения повреждений в трансформаторе должна быть предусмотрена установка предохранителей на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора.

Повреждения на выводах высшего напряжения трансформаторов допускается ликвидировать защитой линии.

#### 4.3.2 Выбор параметров срабатывания ТО

4.3.2.1 ТО подключается к ТТ стороны ВН трансформатора (см. рисунок 4.22). В зону действия ТО входит только часть обмотки трансформатора со стороны ВН. ТО не должна приходить в действие при КЗ за трансформатором. Это условие обеспечивается тем, что ток срабатывания отсечки выбирается большим, чем максимальный ток КЗ на шинах НН в точке К1. Благодаря этому ТО трансформатора не срабатывает при КЗ на отходящих линиях (точка К2), следовательно, может быть выполнена без выдержки времени.

ТО не должна срабатывать при включении ненагруженного трансформатора от броска тока намагничивания. При выполнении отстройки от КЗ на стороне НН в точке К1 одновременно выполняется условие отстройки от БТН.

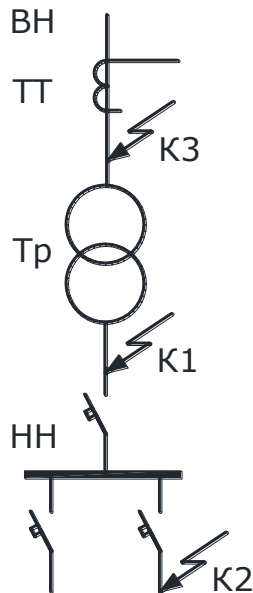


Рисунок 4.22 – Первичная схема, поясняющая работу ТО понижающего трансформатора

4.3.2.2 По условию отстройки ТО от трехфазных КЗ на шинах НН в точке К1 ток срабатывания ТО  $I_{\text{ТО с.з.}}$ , о.е., вычисляют по формуле

$$I_{\text{ТО с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{КЗ макс}}^{(3)}, \quad (4.17)$$

где  $k_{\text{отс}}$  = от 1,3 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас;

$I_{\text{КЗ макс}}^{(3)}$  – максимальное значение тока трехфазного КЗ на шинах НН, приведенное к стороне ВН, А. Значение тока определяется в максимальном режиме системы.

4.3.2.3 Чувствительность ТО проверяют по двухфазному металлическому замыканию на выводах трансформатора в точке КЗ в минимальном режиме системы по формуле

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}^{(2)}}{I_{\text{ТО с.з.}}}, \quad (4.18)$$

где  $I_{\text{КЗ мин}}^{(2)}$  - периодическая составляющая тока двухфазного КЗ при КЗ на выводах защищаемого трансформатора, А;

$I_{\text{ТО с.з.}}$  - ток срабатывания ТО, А.

В соответствии с ПУЭ [1] коэффициент чувствительности должен быть около 2.

Если ТО не удовлетворяет требованиям чувствительности, а МТЗ имеет выдержку времени более 0,5 с, на трансформаторах мощностью более 1 МВ·А должна устанавливаться дифференциальная защита.

### 4.3.3 Выбор параметров срабатывания МТЗ

#### 4.3.3.1 Особенности МТЗ

4.3.3.1.1 На трансформаторах мощностью менее 1 МВ·А МТЗ является основной защитой от токов, обусловленных КЗ в трансформаторе, поскольку на этих трансформаторах обычно не устанавливают дифференциальную и газовую защиты, а ТО защищает только часть трансформатора. МТЗ является также основной защитой шин НН и резервной защитой элементов сети НН.

4.3.3.1.2 На трансформаторах мощностью 1 МВ·А и более МТЗ предназначается для действия в качестве основной защиты при КЗ на шинах НН и в качестве резервной – при КЗ на отходящих элементах сети НН.

4.3.3.1.3 Ускорение МТЗ на трансформаторах не применяют, так как чувствительность к КЗ на выводах трансформатора обеспечивается ТО.

#### 4.3.3.2 Расчет тока срабатывания МТЗ

4.3.3.2.1 Уставки по току МТЗ должны обеспечить:

- несрабатывание защиты на отключение при послеаварийных перегрузках;
- согласование действия по току и по времени с защитами питающих и отходящих элементов;
- необходимую чувствительность при всех видах КЗ в основной зоне и в зоне резервирования.

Для отстройки защиты при послеаварийных перегрузках необходимо выбрать ее ток срабатывания большим, чем:

- ток самозапуска электродвигателей, питаемых от трансформатора;
- ток перегрузки при отключении параллельно работающего трансформатора или при действии АВР, в результате которого к работающему с нагрузкой трансформатору подключается дополнительная нагрузка.

4.3.3.2.2 По условию отстройки от самозапуска двигателей нагрузки ток срабатывания защиты  $I_{\text{МТЗ с.з.}}$ , А, рассчитывают по формуле

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{раб.макс}} / k_{\text{в}}, \quad (4.19)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;

$k_{\text{сзп}}$  – коэффициент самозапуска;

$I_{\text{раб.макс}}$  – максимальный рабочий ток защищаемого трансформатора, с учетом допустимой длительной перегрузки в аварийных условиях может быть равен  $1,4 I_{\text{ном.тр}}$  на подстанциях без АВР на стороне НН и  $0,7 I_{\text{ном.тр}}$  на подстанциях с АВР;

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

4.3.3.2.3 При действии АВР к трансформатору Тр1 подключается заторможенная нагрузка отключившегося трансформатора Тр2 (см. рисунок 4.23).

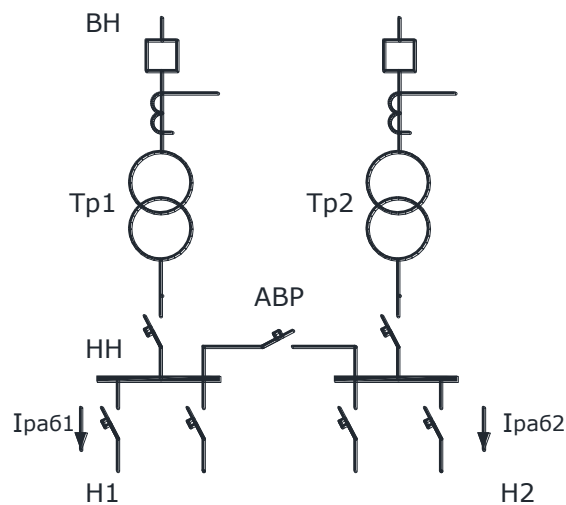


Рисунок 4.23 – Первичная схема двухтрансформаторной подстанции с АВР на стороне НН

По условию отстройки тока перегрузки при действии АВР трансформаторов ток срабатывания МТЗ  $I_{\text{МТЗ с.з.}}, \text{А}$ , выбирают по формуле

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = k_{\text{отс}} / k_{\text{в}} \cdot (k_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{раб2.макс}} + k'_{\text{отс}} \cdot I_{\text{раб1.макс}}), \quad (4.20)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;

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

$k_{\text{сзп}}$  – коэффициент самозапуска;

$I_{\text{раб2.макс}}$  – максимальный рабочий ток нагрузки Н2, приведенный к стороне ВН. В схемой с АВР принимается равной  $0,7 I_{\text{ном.тр2}}$ , чтобы не допустить опасной перегрузки трансформатора после АВР;

$k'_{\text{отс}}$  – коэффициент, учитывающий увеличение тока нагрузки Н1 из-за снижения напряжения на шинах НН при подключении к трансформатору Тр1 после АВР заторможенных двигателей нагрузки Н2. Значение этого коэффициента для нагрузки, в основном состоящей из двигателей, участвующих в самозапуске, принимается равным 1,5;

$I_{\text{раб1.макс}}$  – максимальный рабочий ток нагрузки Н1, приведенный к стороне ВН трансформатора. В схеме с АВР принимается равной  $0,7 I_{\text{ном.тр2}}$ , чтобы не допустить опасной перегрузки трансформатора после АВР.

4.3.3.2.4 Согласование МТЗ по току с защитами предыдущих элементов выполняют в соответствии с рекомендациями, приведенными в 4.1.5. При этом рекомендуется учитывать влияние токов нагрузки (рисунок 4.24).

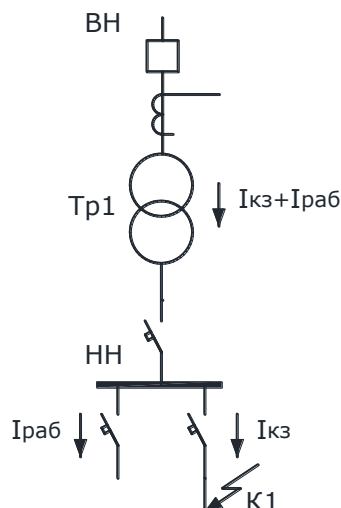


Рисунок 4.24 – Токораспределение при удаленном КЗ в сети НН

При применении в качестве защитных устройств автоматических выключателей МТЗ трансформатора согласуют с вводным автоматическим выключателем, а если согласование невозможно, то с секционным и автоматическими выключателями отходящих присоединений.

4.3.3.2.5 При выполнении защитой функций основной защиты трансформатора и/или шин НН чувствительность по току определяется при металлическом КЗ на шинах НН в точке К1 (рисунок 4.25) по формуле

$$k_{\text{чI}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}}{I_{\text{МТЗ с.з.}}}, \quad (4.21)$$

где  $I_{\text{КЗ мин}}$  – минимальное значение тока КЗ на шинах НН, приведенное к стороне ВН, А. Значение тока определяется в минимальном режиме системы. Для трансформаторов со схемой соединения  $\Delta/\text{Y}$  в качестве расчетного принимается двухфазное КЗ, для трансформаторов со схемой соединения  $\text{Y}/\text{Y}$  – однофазное КЗ на землю;

$I_{\text{МТЗ с.з.}}$  – ток срабатывания МТЗ, А.



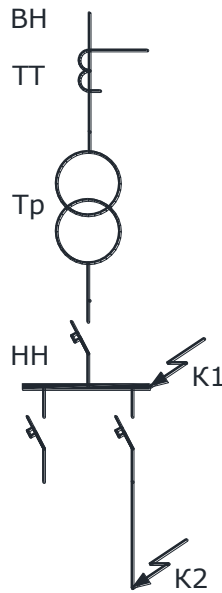


Рисунок 4.25 – Проверка чувствительности МТЗ

Значение коэффициента чувствительности должно быть больше 1,5.

Если коэффициент чувствительности оказывается меньше указанного для трансформаторов со схемой соединения  $\text{Y}/\text{Y}$ , то необходимо применение специальной защиты нулевой последовательности (см. 4.3.5). При применении специальной защиты нулевой последовательности чувствительность МТЗ по току проверяется для случая двухфазного КЗ.

Если коэффициент чувствительности оказывается меньше указанного, МТЗ выполняется с пуском по напряжению (см. 4.3.3.4).

4.3.3.2.6 При выполнении защитой функций резервной защиты отходящих линий НН чувствительность по току определяется при металлическом КЗ в точке К2 (рисунок 4.22) в конце линии с наибольшим сопротивлением. Ток  $I_{\text{КЗ мин}}$  рассчитывают в соответствии с указаниями 4.3.3.2.5 при КЗ в конце линии с наибольшим сопротивлением.

Значение коэффициента чувствительности должно быть больше 1,2.

#### 4.3.3.3 Расчет времени срабатывания МТЗ

4.3.3.3.1 Время срабатывания защиты выбирается из следующих условий:

- обеспечение нагревостойкости трансформатора;
- обеспечения селективности с защитами предыдущих элементов в соответствии с 4.1.6.

4.3.3.3.2 Согласно [8] наибольшая продолжительность КЗ  $t_{\text{к макс}}$  на выводах НН трансформаторов равна 4 с.

Для МТЗ с независимой характеристикой выдержка времени не должно превышать  $t_{\text{к макс}}$ .

Для МТЗ с зависимой характеристикой выдержка времени не должна превышать  $t_{\text{к макс}}$  при КЗ на выводах НН трансформатора.

4.3.3.3.3 При выдержке времени МТЗ менее 1 с возможно срабатывание МТЗ при включении трансформатора из-за броска тока

намагничивания. Для отстройки от броска тока намагничивания силового трансформатора используют следующие способы:

- блокировка МТЗ по второй гармонике тока. При использовании блокировки по второй гармонике выдержка времени МТЗ не отстраивается от длительности броска тока намагничивания. Уставку по второй гармонике принимают равной 0,15;

- блокировка МТЗ при включении выключателя на время, достаточное для затухания броска тока намагничивания. Рекомендуемое время блокировки  $t_{\text{МТЗ бл.}}$  от 0,5 до 1,0 с. Недостатком данного способа является замедление отключения при включении на КЗ.

#### 4.3.3.4 МТЗ с пуском по напряжению

4.3.3.4.1 МТЗ с пуском по напряжению применяют для защиты трансформаторов 6(10)/0,4, если коэффициент чувствительности МТЗ меньше требуемого.

Применение пускового органа напряжения позволяет не отстраивать ток срабатывания МТЗ от токов самозапуска и перегрузки, т.е. не учитывать коэффициент  $k_{\text{сзп}}$ .

Цепи напряжения защиты питаются от ТН 380/100 В, установленных на стороне 0,4 кВ трансформатора.

4.3.3.4.2 Ток срабатывания МТЗ с пуском по напряжению  $I_{\text{МТЗ с.з.}}$ , А, рассчитывают по формуле

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{раб.макс}} / k_{\text{в}}, \quad (4.22)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;

$I_{\text{раб.макс}}$  – максимальный рабочий ток защищаемого трансформатора, с учетом допустимой длительной перегрузки в аварийных условиях может быть равен  $1,4 I_{\text{ном.тр}}$  на подстанциях без АВР на стороне НН и  $0,7 I_{\text{ном.тр}}$  на подстанциях с АВР;

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

Ток срабатывания МТЗ с пуском по напряжению без специального расчета рекомендуется принимать равным  $1,5 I_{\text{ном.тр}}$ .

4.3.3.4.3 Уставку срабатывания защиты по линейному напряжению  $U_{\text{МТЗ с.з.}}$ , В, выбирают из условия отстройки от минимального напряжения при включении от АПВ или АВР заторможенных двигателей и рассчитывают по формуле

$$U_{\text{МТЗ с.з.}} = U_{\text{сзп}} / k_{\text{отс}}, \quad (4.23)$$

где  $U_{\text{сзп}}$  – междуфазное напряжение в месте установки ПОН в условиях самозапуска заторможенных двигателей при включении их от АПВ или АВР, В. В ориентировочных расчетах может быть принято равным примерно  $0,7 U_{\text{ном}}$ ;

$k_{\text{отс}} =$  от 1,1 до 1,2 – коэффициент отстройки.

4.3.3.4.4 Уставку срабатывания защиты по напряжению обратной последовательности  $U_{2 \text{ МТЗ с.з.}}$  принимают равной 12 В [9].

4.3.3.4.5 Чувствительность защиты при КЗ на шинах обеспечивается при всех видах КЗ, поэтому проверку чувствительности выполнять не требуется.

4.3.3.4.6 Коэффициент чувствительности пускового органа минимального напряжения при КЗ в конце зоны резервирования определяют по формуле

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{МТЗ с.з.}} \cdot k_{\text{в}}}{U_{\text{КЗ макс}}}, \quad (4.24)$$

где  $U_{\text{МТЗ с.з.}}$  – уставка срабатывания МТЗ по напряжению;

$k_{\text{в}} = 1,05$  – коэффициент возврата. Коэффициент возврата учитывают, так как в момент возникновения трехфазного КЗ кратковременно появляется напряжение обратной последовательности, поэтому срабатывает ПОН МТЗ. Для возврата ПОН после исчезновения несимметрии необходимо, чтобы все линейные напряжения превысили значение  $U_{\text{МТЗ с.з.}} \cdot k_{\text{в}}$ ;

$U_{\text{КЗ макс}}$  – значение междуфазного напряжения на шинах НН при металлическом трехфазном КЗ в конце линии с наибольшим сопротивлением, В. Значение напряжения определяется в минимальном режиме системы.

4.3.3.4.7 Коэффициент чувствительности пускового органа напряжения обратной последовательности при КЗ в конце зоны резервирования определяют по формуле

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2 \text{ КЗ макс}}}{U_{2 \text{ МТЗ с.з.}}}, \quad (4.25)$$

где  $U_{2 \text{ КЗ макс}}$  – значение напряжения обратной последовательности на шинах НН при металлическом двухфазном КЗ в конце линии с наибольшим сопротивлением, В. Значение напряжения определяется в минимальном режиме системы;

$U_{2 \text{ МТЗ с.з.}}$  – уставка срабатывания МТЗ по напряжению обратной последовательности, В.

4.3.3.4.8 При выполнении МТЗ функций резервирования защит отходящих линий НН минимальное значение коэффициента чувствительности по напряжению должно быть больше 1,2.

#### 4.3.4 Защита от перегрузки

4.3.4.1 Ток срабатывания защиты от перегрузки  $I_{\text{перепр.с.з.}}$ , А, выбирают из условия возврата защиты при номинальном токе трансформатора

$$I_{\text{перепр.с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{ном.тр}} / k_{\text{в}}, \quad (4.26)$$

где  $k_{\text{отс}} = 1,05$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;

$I_{\text{ном.тр}}$  – номинальный первичный ток стороны ВН трансформатора, А;

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

4.3.4.2 Защита от перегрузки может быть выполнена с действием на сигнал, на отключение части потребителей для разгрузки трансформатора, на отключение трансформатора.

4.3.4.3 На подстанциях с постоянным оперативным персоналом используют защиту от перегрузки, действующую на сигнал.

Выдержку времени ступени защиты, действующей на сигнал, выбирают из условия отстройки от времени самозапуска двигателей, питающихся от секций шин 6 - 10 кВ, она должна быть не менее 10 с.

4.3.4.4 На подстанциях без постоянного оперативного персонала используют защиту от перегрузки, действующую на отключение.

Выдержку времени ступени защиты, действующей на отключение части потребителей, выбирают по перегрузочной характеристике трансформатора. В случае, если разгрузка трансформатора оказалась неэффективной, защита действует на отключение трансформатора.

#### 4.3.5 Токовая защита нулевой последовательности

4.3.5.1 Токовая защита нулевой последовательности устанавливается в тех случаях, когда МТЗ на стороне ВН недостаточно чувствительна к однофазным КЗ на землю за трансформатором. Практически это имеет место на трансформаторах 6(10)/0,4 кВ со схемой соединения  $\Upsilon/\Upsilon$ , у которых ток однофазных КЗ много меньше тока трехфазного КЗ за трансформатором.

На трансформаторах со схемой соединения  $\Delta/\Upsilon$  ток однофазного КЗ равен току трехфазного КЗ, МТЗ на стороне ВН, как правило, имеет достаточную чувствительность к однофазным КЗ на выводах НН. Однако и в этих случаях целесообразно устанавливать токовую защиту нулевой последовательности в качестве резервной к МТЗ трансформатора и к защитным аппаратам сети НН.

4.3.5.2 Измерительным органом защиты является одно максимальное реле тока, включенное через трансформатор тока в заземленную нейтраль (рисунок 4.26).

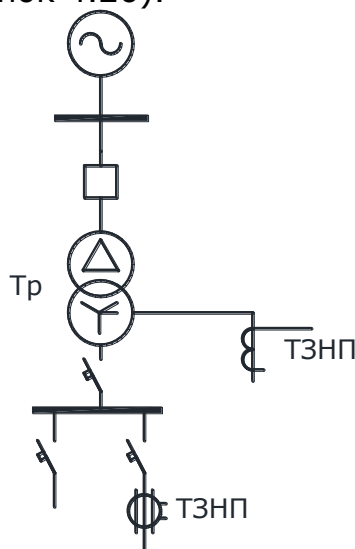


Рисунок 4.26 – Схема включения ТЗНП трансформаторов 6(10)/0,4 кВ

В нормальном режиме работы трансформатора с симметричной нагрузкой в заземленной нейтрали проходит ток небаланса, меньший, чем

рабочие токи в фазах. Рассматриваемая защита должна быть надежно отстроена от небаланса нормального режима. При КЗ на землю на шинах или в сети НН через заземленную нейтраль проходит ток однофазного КЗ, вызывающий срабатывание этой защиты.

Следует отметить, что ТЗНП трансформатора следует устанавливать, даже если вводной автомат имеет встроенную защиту нулевой последовательности. При наличии ТЗНП во вводном автомате ТЗНП трансформатора выполняет функцию защиты от однофазных КЗ между обмоткой НН и автоматом.

4.3.5.3 Ток срабатывания защиты выбирают по следующим условиям:

- отсройка от токов, которые могут проходить по заземленной нейтрали обмотки НН при несимметрии нагрузки в нормальном режиме;
- согласование по току и по времени с защитами элементов, отходящих от сборки НН;
- необходимые значения коэффициента чувствительности при однофазных КЗ в основной зоне действия (на сборке НН) и в зоне резервирования (на элементах сети НН при отказе их собственных защит).

4.3.5.4 В нормальном режиме максимально допустимый ток в заземленной нейтрали для трансформаторов со схемой соединения  $Y/Y$  равен  $0,25 I_{\text{ном.тр}}$ , для трансформаторов со схемой соединения  $\Delta/Y$  -  $0,75 I_{\text{ном.тр}}$  [8].

Для обеспечения несрабатывания защиты ток срабатывания выбирают в 1,5 - 2 раза выше.

4.3.5.5 Согласование по чувствительности с характеристиками автоматов и плавких вставок предохранителей мощных присоединений НН приводит к загроблению защиты трансформатора. Но отсутствие согласования по чувствительности может вызвать неселективное отключение трансформатора в тех случаях, когда защита отходящих элементов оказывается недостаточно чувствительной.

По условию согласования с автоматическими выключателями отходящих линий НН, на которых не установлена ТЗНП, ток срабатывания ТЗНП трансформатора  $I_{\text{ТЗНП с.з.}}, \text{А}$ , выбирают по формуле

$$I_{\text{ТЗНП с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{с.о.макс}}, \quad (4.27)$$

где  $k_{\text{отс}}=1,3$  – коэффициент отстройки;

$I_{\text{с.о.макс}}$  – наибольший из токов срабатывания отсечек отходящих линий НН, А.

По условию согласования с ТЗНП отходящих линий НН ток срабатывания ТЗНП  $I_{\text{ТЗНП с.з.}}, \text{А}$ , выбирают по формуле

$$I_{\text{ТЗНП с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{ТЗНП с.з.макс}}, \quad (4.28)$$

где  $k_{\text{отс}}=1,3$  – коэффициент отстройки;

$I_{\text{ТЗНП с.з.макс}}$  – наибольший из токов срабатывания ТЗНП отходящих линий НН, А.

4.3.5.6 При выполнении защитой функций основной защиты трансформатора и/или шин НН чувствительность по току определяется

при металлическом однофазном КЗ на шинах НН (рисунок 4.26) по формуле

$$k_{\text{чI}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}^{(1)}}{I_{\text{ТЗНП с.з.}}}, \quad (4.29)$$

где  $I_{\text{КЗ мин}}^{(1)}$  – минимальное значение тока однофазного КЗ на шинах НН, А;  
 $I_{\text{ТЗНП с.з.}}$  – ток срабатывания ТЗНП, А.

Значение коэффициента чувствительности должно быть больше 1,5.

4.3.5.7 При выполнении защиты функций резервной защиты отходящих линий НН чувствительность по току определяется при металлическом КЗ в конце линии с наибольшим сопротивлением по формуле 4.29. Ток  $I_{\text{КЗ мин}}^{(1)}$  рассчитывается в конце линии с наибольшим сопротивлением.

Значение коэффициента чувствительности должно быть больше 1,2.

4.3.5.8 Если коэффициент чувствительности оказывается меньше указанного, то необходимо рассмотреть возможность установки на наиболее мощных элементах сети 0,4 кВ дополнительной ТЗНП без выдержки времени, действующей на отключение.

Следует отметить, что согласование ТЗНП с защитами элементов, отходящих от шин НН согласно [1] не считается обязательным.

4.3.5.9 ТЗНП выполняют с независимой характеристикой выдержки времени. Выдержку времени ТЗНП выбирают по условию селективности с ТЗНП предыдущих присоединений по формуле

$$t_{\text{ТЗНП с.з.}} = t_{\text{с.з. пред}} + \Delta t, \quad (6.30)$$

где  $t_{\text{с.з. пред}}$  – время срабатывания отсечки или ТЗНП отходящих линий стороны НН, с;

$\Delta t$  – степень селективности.

4.3.5.10 Для проверки выбора уставок ТЗНП рекомендуется построение карты селективности, на которой должны быть построены характеристики срабатывания ТЗНП трансформатора и ТЗНП или МТЗ отходящих присоединений.

### 4.3.6 Примеры расчета уставок

#### 4.3.6.1 Трансформатор 1000 кВ·А 10/0,4 кВ

4.3.6.1.1 Схема электроснабжения представлена на рисунке 4.27.

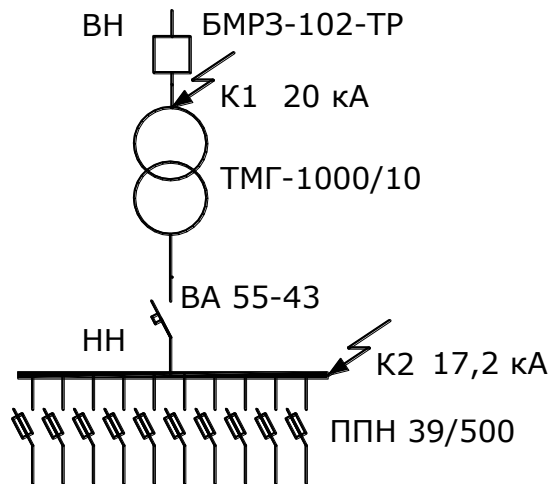


Рисунок 4.27 – Схема электроснабжения

Параметры питающей системы:

- $I_{к\text{ макс}} = 20 \text{ кА}$  – ток КЗ системы в максимальном режиме;
- $U_{с\text{ ном}} = 10,5 \text{ кВ}$  – среднее номинальное напряжение системы.

Характеристики трансформатора:

- тип - ТМГ-1000/10-У1;
- схема и группа соединения обмоток -  $\Delta/\text{Y}$ ;
- $S_{\text{ном тр}} = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$  – номинальная мощность;
- $U_{\text{ном тр}}^{\text{ВН}} = 10,5 \text{ кВ}$  – номинальное напряжение стороны ВН;
- $U_{\text{ном тр}}^{\text{НН}} = 0,4 \text{ кВ}$  – номинальное напряжение стороны НН;
- $u_{\text{к}} = 5,5 \%$  – напряжение короткого замыкания трансформатора;
- $I_{\text{ном тр}}^{\text{ВН}} = 55 \text{ А}$  – номинальный ток стороны ВН;
- $I_{\text{ном тр}}^{\text{НН}} = 1443,4 \text{ А}$  – номинальный ток стороны НН.

Система регулирования напряжения:

- ПБВ;
- $n=2$  – количество ступеней регулирования;
- $\Delta U = 2,5 \%$  – шаг регулирования напряжения.

Автоматический выключатель ВА 55-43:

- $I_{\text{ном.р.}} = 2000 \text{ А}$  – номинальный ток расцепителя;
- $I/I_{\text{ном.р.}} = 1,25$  в зоне перегрузки, время срабатывания при токе  $6 \cdot I_{\text{ном.р.}}$  – 4 с;

- $I_{\text{с.о.}}/I_{\text{ном.р.}} = 2$  в зоне КЗ, время срабатывания – 0,1 с;

Встроенная защита от КЗ на землю, с током срабатывания, равным  $I_{\text{ном.р.}}$ .

Предохранители ППН 39/630:

- $I_{\text{вс}} = 500 \text{ А}$  - номинальный ток плавкой вставки предохранителя;
- $I_{\text{л.расч}} = 187 \text{ А}$  - расчетный ток линии.

Трансформаторы тока на стороне ВН ТОЛ-СЭЩ-10:

- $I_{1\text{ном}} = 100 \text{ А}$  - номинальный первичный ток ТТ;
- $I_{2\text{ном}} = 5 \text{ А}$  - номинальный вторичный ток ТТ;
- $n_{\text{T}} = 20$  - номинальный коэффициент трансформации ТТ.

Блок релейной защиты БМРЗ-102-ТР.

В качестве базисной ступени трансформации принять сторону НН, для удобства согласования с времятоковыми характеристиками автоматического выключателя.

4.3.6.1.2 Сопротивление системы, приведенное к стороне 10,5 кВ, рассчитывать по формуле<sup>1)</sup>

$$x_{\text{с макс}} = \frac{U_{\text{с ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к макс}}} = \frac{10,5 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot (20 \text{ кА})} = 0,3 \text{ Ом}$$

4.3.6.1.3 Приведение сопротивления к стороне НН выполнить по формуле<sup>2)</sup>

$$x_{\text{с макс прив}} = x_{\text{с макс}} \cdot \left( \frac{U_{\text{НН ном тр}}}{U_{\text{ВН ном тр}}} \right)^2 = 0,3 \cdot \left( \frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,44 \text{ мОм}$$

4.3.6.1.4 Сопротивление двухобмоточного трансформатора определить по формуле<sup>3)</sup>

$$x_{\text{тр}} = u_{\text{к}} \cdot \frac{(U_{\text{НН ном тр}})^2}{S_{\text{ном тр}}} = 0,055 \cdot \frac{0,4^2}{1} = 8,8 \text{ мОм}$$

4.3.6.1.5 Ток трехфазного КЗ на шинах НН рассчитать по формуле<sup>4)</sup>

$$I_{\text{КЗ макс}}^{(3)} = \frac{U_{\text{НН ном тр}}}{\sqrt{3} \cdot (x_{\text{с макс прив}} + x_{\text{тр}})} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot (0,44 + 8,8) \cdot 10^{-3}} = 25 \text{ кА}$$

4.3.6.1.6 Ток срабатывания ТО  $I_{\text{ТО с.з.}}$ , А, рассчитать по условию отстройки от трехфазных КЗ на шинах НН по формуле (4.17)

$$I_{\text{ТО с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{КЗ макс}}^{(3)} = 1,3 \cdot (25 \text{ кА}) = 32,5 \text{ кА}$$

4.3.6.1.7 Ток срабатывания МТЗ рассчитать по условию отстройки от самозапуска двигателей нагрузки по формуле (4.19)

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{сзп}} \cdot \frac{I_{\text{НН ном тр}}}{k_{\text{в}}} = 1,2 \cdot 2 \cdot \frac{1,4 \cdot 1443}{0,95} = 5100 \text{ А}$$

По условию согласования с вводным автоматом ток срабатывания МТЗ выбрать по формуле (4.4)

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{с.о.}} = 1,3 \cdot 4000 = 5200 \text{ А}$$

В качестве тока срабатывания МТЗ выбрать наибольшее из получившихся значений  $I_{\text{МТЗ с.з.}} = 5200 \text{ А}$ .

1) - см. формулу (3.4) [6]

2) - см. формулу (3.1) [6]

3) - см. формулу (3.17) [6]

4) - см. формулу (3.29) [6]



4.3.6.1.8 Определить степень селективности при токе  $I_{\text{МТЗ с.з.}}$  по формуле (4.5)

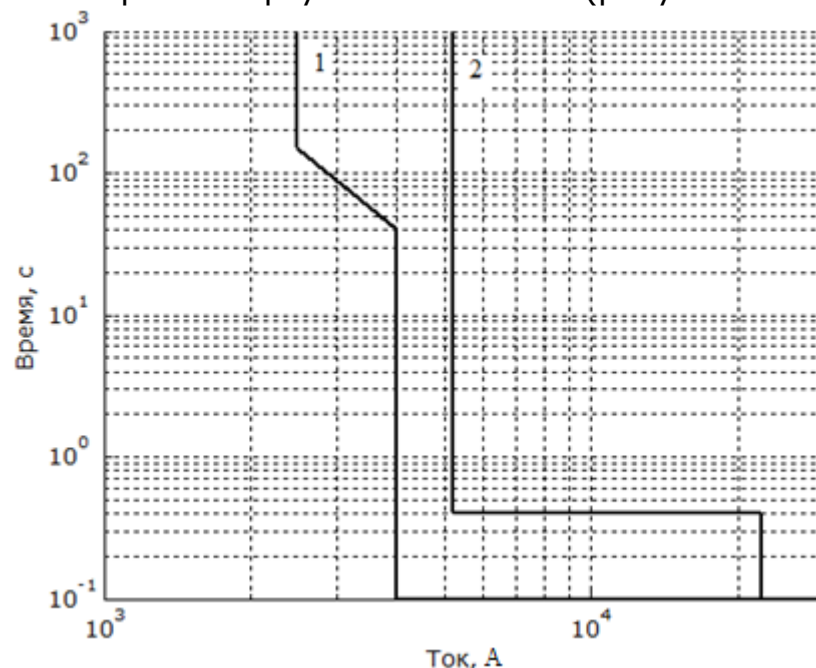
$$\Delta t = \frac{\varepsilon_1}{100} \cdot t_1 + \frac{\varepsilon_2}{100} \cdot t_2 + t_{\text{зап}} = 0,02 + 0,025 + 0,1 = 0,15 \text{ с}$$

Выдержку времени МТЗ с независимой характеристикой выбрать по условию согласования с автоматическими выключателями 0,4 кВ по формуле (4.6)

$$t_{\text{МТЗ с.з.}} = 0,1 + 0,15 = 0,25 \text{ с}$$

При выдержке времени менее 0,5 с возможно срабатывание МТЗ при включении трансформатора из-за броска тока намагничивания. Для предотвращения отключения МТЗ выполнить с блокировкой МТЗ при включении на  $t_{\text{МТЗ бл.}} = 0,5 \text{ с}$ .

4.3.6.1.9 Построить карту селективности (рисунок 4.28).



1 - времятоковая характеристика автоматического выключателя;

2 - времятоковая характеристика МТЗ трансформатора

Рисунок 4.28 – Карта селективности защиты трансформатора

4.3.6.1.10 Ток срабатывания защиты от перегрузки выбрать из условия возврата защиты при номинальном токе трансформатора по формуле (4.26)

$$I_{\text{перегр.с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot \frac{I_{\text{НОМ тр}}^{\text{НН}}}{k_{\text{в}}} = 1,05 \cdot \frac{1443,4}{0,95} = 1595 \text{ А}$$

Выдержку времени защиты от перегрузки выбрать из условия отстройки от времени самозапуска двигателей, питающихся от секций шин 6 - 10 кВ  $t_{\text{перегр.с.з.}} = 10 \text{ с}$ .

4.3.6.1.11 Пересчет тока, выраженного в первичных значениях, во вторичные значения выполнить по формуле (3.1) с учетом приведения к стороне ВН по формуле<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> - см. формулу (3.1) [6]

$$I_{\text{ТО с.р.}} = \frac{I_{\text{ТО с.з.}}}{n_{\text{T}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ тр}}^{\text{HH}}}{U_{\text{НОМ тр}}^{\text{BH}}} = \frac{32500}{20} \cdot \frac{0,4}{10,5} = 61,9 \text{ А,}$$

$$I_{\text{МТЗ с.р.}} = \frac{I_{\text{МТЗ с.з.}}}{n_{\text{T}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ тр}}^{\text{HH}}}{U_{\text{НОМ тр}}^{\text{BH}}} = \frac{5200}{20} \cdot \frac{0,4}{10,5} = 9,9 \text{ А,}$$

$$I_{\text{перегр.с.р.}} = \frac{I_{\text{перегр.с.з.}}}{n_{\text{T}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ тр}}^{\text{HH}}}{U_{\text{НОМ тр}}^{\text{BH}}} = \frac{1595}{20} \cdot \frac{0,4}{10,5} = 3,04 \text{ А.}$$

4.3.6.1.12 Уставки, вводимые в блок БМРЗ-102-ТР-01, приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Уставки для ввода в блок БМРЗ-102-ТР-01

Обозначение в блоке	Комментарий	Обозначение в расчете	Значение уставки
<b>ТО</b>			
S101	Ввод ТО	-	Введен
ТО РТ1	Ток срабатывания ТО без выдержки времени, А	$I_{\text{ТО с.р.}}$	61,9
<b>МТЗ</b>			
S103	Ввод первой ступени МТЗ	-	Введен
МТЗ РТ1	Ток срабатывания первой ступени МТЗ, А	$I_{\text{МТЗ с.р.}}$	9,9
МТЗ Т1-1	Выдержка времени первой ступени МТЗ с независимой выдержкой времени, с	$t_{\text{МТЗ с.з.}}$	0,25
МТЗ Тбл.	Выдержка времени блокировки первой ступени МТЗ при включении выключателя, с	$t_{\text{МТЗ бл.}}$	0,5
<b>Защита от перегрузки</b>			
S104	Ввод второй ступени МТЗ	-	Введен
МТЗ РТ2	Ток срабатывания второй ступени МТЗ, А	$I_{\text{перегр.с.р.}}$	3,04
МТЗ Т2	Выдержка времени второй ступени МТЗ с независимой выдержкой времени, с	$t_{\text{перегр.с.з.}}$	10

#### 4.4 Защита вводного и секционного выключателя

##### 4.4.1 Общие требования к защита вводного и секционного выключателей

4.4.1.1 В распределительных сетях часто применяют одну секционированную систему сборных шин. Каждая секция при этом питается от разных источников через вводные выключатели ВВ1 и ВВ2 (рисунок 4.29). В нормальном положении СВ отключен. При пропадании питания от одного источника происходит переключение обесточенной секции на соседнюю посредством АВР.

На ВВ и СВ применяют следующие токовые защиты:

- МТЗ;
- ТО с выдержкой времени.

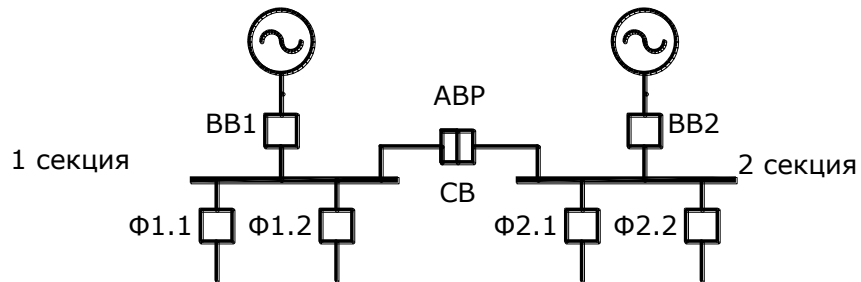


Рисунок 4.29 – Первичная схема подстанции с секционированной системой сборных шин

##### 4.4.2 Выбор параметров срабатывания ТО СВ

4.4.2.1 Ток срабатывания и выдержку времени ТО СВ выбирают по условию согласования с ТО без выдержки времени присоединений первой и второй секции шин, согласно 4.1.5 и 4.1.6. При этом должны быть рассмотрены два случая:

- питание 2 секции через СВ при отключенном ВВ2;
- питание 1 секции через СВ при отключенном ВВ1.

##### 4.4.3 Выбор параметров срабатывания МТЗ СВ

4.4.3.1 При включении СВ действием АВР через него протекает ток подключенной секции, который превышает рабочий ток.

По условию отстройки от самозапуска двигателей нагрузки после восстановления питания действием АВР ток срабатывания МТЗ СВ  $I_{\text{МТЗ с.з.}}, \text{А}$ , рассчитывают по формуле

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{раб.макс}} / k_{\text{в}}, \quad (4.31)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;

$k_{\text{сзп}}$  – коэффициент самозапуска;

$I_{\text{раб.макс}}$  – максимальный рабочий ток подключенной секции с учетом допустимой длительной перегрузки в аварийных условиях, А;

$k_{\text{в}}$  – коэффициент возврата.

4.4.3.2 Согласование МТЗ по току с защитами предыдущих элементов выполняют в соответствии с рекомендациями, приведенными в 4.1.6.

4.4.3.3 При выполнении защитой функций основной защиты шин чувствительность по току определяется при металлическом КЗ на шинах по формуле

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}}{I_{\text{МТЗ с.з.}}}, \quad (4.32)$$

где  $I_{\text{КЗ мин}}$  – минимальное значение тока КЗ на шинах НН, А;

$I_{\text{МТЗ с.з.}}$  – ток срабатывания МТЗ СВ, А.

4.4.3.4 При выполнении защитой функций резервной защиты отходящих линий чувствительность по току определяется при металлическом КЗ в конце линии с наибольшим сопротивлением. Ток  $I_{\text{КЗ мин}}$  рассчитывают в конце линии с наибольшим сопротивлением.

4.4.3.5 Время срабатывания МТЗ СВ выбирается из условия обеспечения селективности с защитами присоединений первой и второй секции шин (см. 4.1.6).

#### 4.4.4 Выбор параметров срабатывания ТО ВВ

4.4.4.1 Ток срабатывания и выдержку времени ТО ВВ1 и ТО ВВ2 выбирают по условию согласования с ТО СВ согласно 4.1.5 и 4.1.6.

#### 4.4.5 Выбор параметров срабатывания МТЗ ВВ

4.4.5.1 По условию отстройки тока перегрузки при действии АВР ток срабатывания МТЗ  $I_{\text{МТЗ с.з.}}$ , А, выбирают по формуле

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = k_{\text{отс}}/k_{\text{в}} \cdot (k_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{раб2.макс}} + k'_{\text{отс}} \cdot I_{\text{раб1.макс}}), \quad (4.33)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;

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

$k_{\text{сзп}}$  – коэффициент самозапуска;

$I_{\text{раб2.макс}}$  – максимальный рабочий ток нагрузки секции, подключенной при АВР;

$k'_{\text{отс}}$  – коэффициент, учитывающий увеличение тока нагрузки из-за снижения напряжения на шинах при подключении к ним после АВР заторможенных двигателей нагрузки соседней секции. Значение этого коэффициента для нагрузки, в основном состоящей из двигателей, участвующих в самозапуске, принимается равным 1,5;

$I_{\text{раб1.макс}}$  – максимальный рабочий ток нагрузки.

4.4.5.2 Согласование МТЗ ВВ по току с МТЗ СВ выполняют в соответствии с рекомендациями, приведенными в 4.1.5.

4.4.5.3 При выполнении защитой функций основной защиты шин чувствительность по току определяется при металлическом КЗ на шинах по формуле

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}}{I_{\text{МТЗ с.з.}}}, \quad (4.34)$$

где  $I_{\text{КЗ мин}}$  – минимальное значение тока КЗ на шинах, А. Значение тока определяется в минимальном режиме системы;

$I_{\text{МТЗ с.з.}}$  – ток срабатывания МТЗ, А.

Значение коэффициента чувствительности должно быть больше 1,5.

4.4.5.4 При выполнении защитой функций резервной защиты отходящих линий чувствительность по току определяется при металлическом КЗ в конце линии с наибольшим сопротивлением по формуле (4.16). Ток  $I_{\text{КЗ мин}}$  рассчитывают в конце линии с наибольшим сопротивлением.

Значение коэффициента чувствительности должно быть больше 1,2.

4.4.5.5 Время срабатывания МТЗ ВВ выбирается из условия обеспечения селективности с МТЗ СВ (см. 4.1.6).

## 4.5 Логическая защита шин

### 4.5.1 Общие сведения

4.5.1.1 Для быстрого отключения КЗ на шинах 6-10 кВ применяется логическая защита шин. Работа ЛЗШ основана на ускорении МТЗ вводного выключателя при отсутствии пуска МТЗ любого из присоединений, отходящих от шин, в том числе МТЗ секционного выключателя.

Ускорение МТЗ секционного выключателя выполняют при отсутствии пуска МТЗ любого из присоединений, отходящих от первой или второй секции сборных шин.

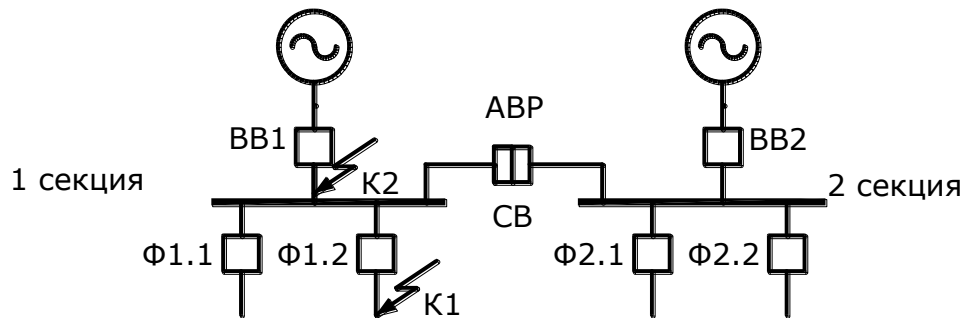


Рисунок 4.30– Первичная схема подстанции с секционированной системой сборных шин

4.5.1.2 В блоках БМРЗ возможны последовательная и параллельная схемы ЛЗШ. Название определяется исходя из схемы соединения датчиков ЛЗШ (ЛЗШд), в качестве которых используются сигналы пуска МТЗ присоединений, отходящих от шин.

4.5.1.3 Схемы ЛЗШ ВВ и СВ при последовательном соединении датчиков приведены на рисунках 4.31 и 4.32.

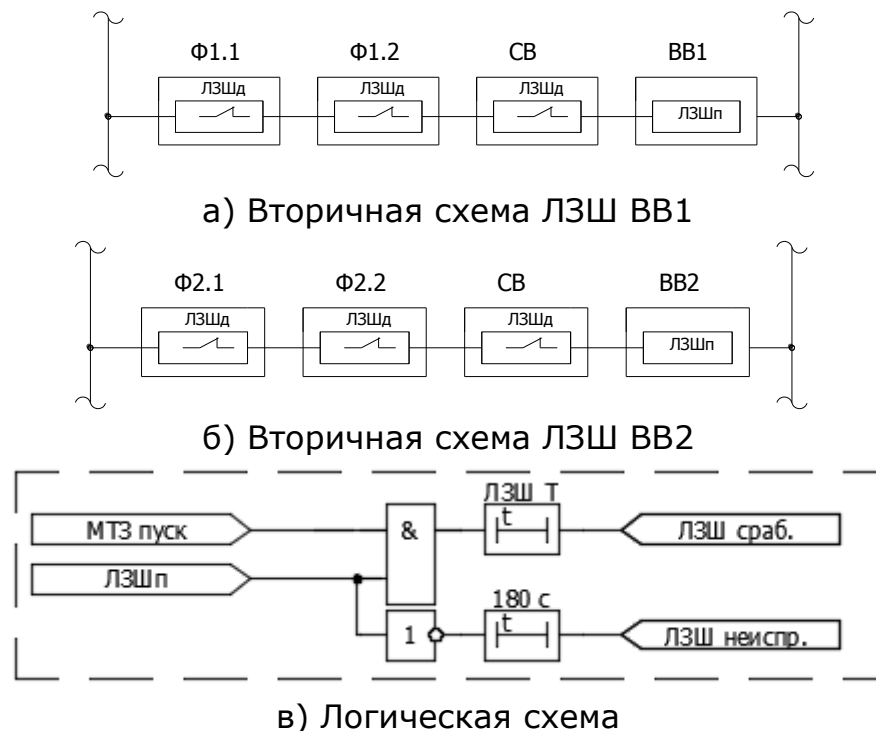
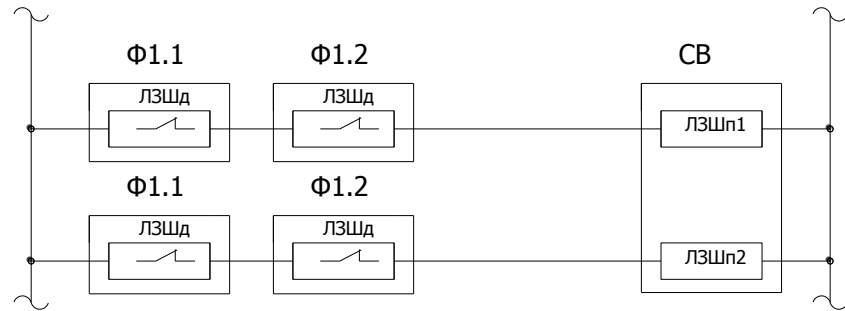
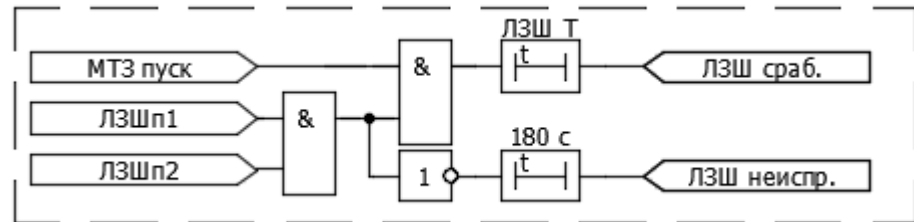


Рисунок 4.31– Реализация ЛЗШ ВВ при последовательном соединении датчиков



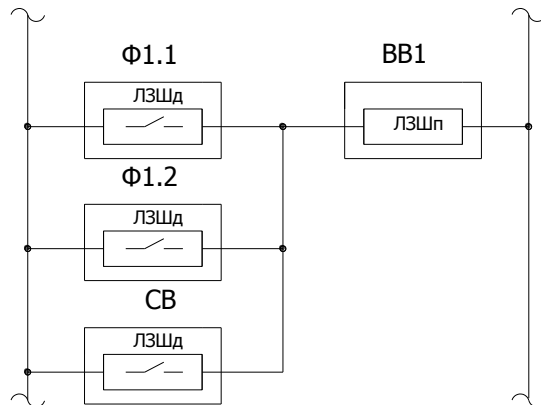
а) Вторичная схема ЛЗШ СВ



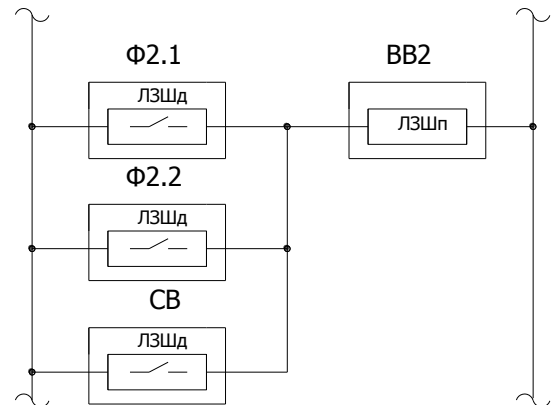
б) Логическая схема

Рисунок 4.32 – Реализация ЛЗШ СВ при последовательном соединении датчиков

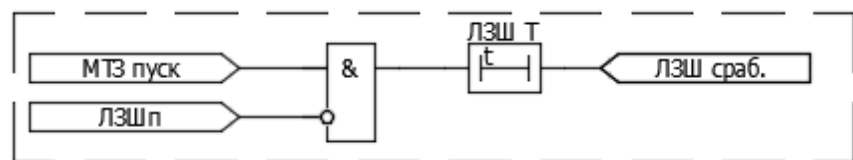
4.5.1.4 Схемы ЛЗШ ВВ и СВ при параллельном соединении датчиков приведены на рисунках 4.33 и 4.34.



а) Вторичная схема ЛЗШ ВВ1



б) Вторичная схема ЛЗШ ВВ2



в) Логическая схема

Рисунок 4.33– Реализация ЛЗШ ВВ при параллельном соединении датчиков

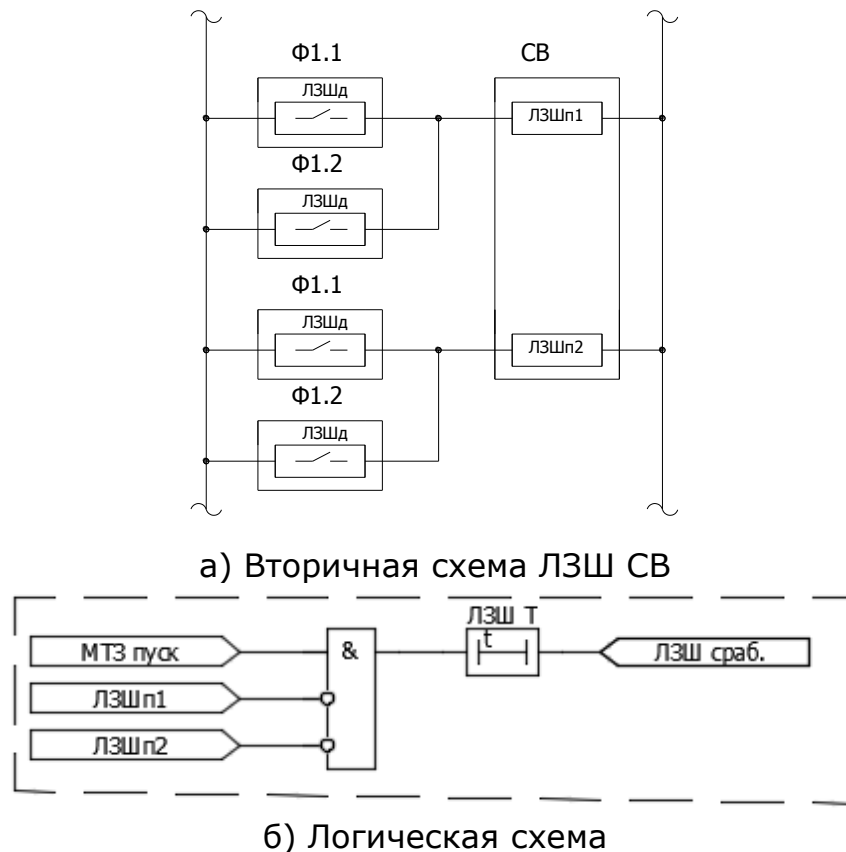


Рисунок 4.34 – Реализация ЛЗШ СВ при параллельном соединении датчиков

4.5.1.5 Наличие в логической схеме ЛЗШ секционного выключателя двух входов ЛЗШп (ЛЗШ-приемник) позволяет объединить логически, но развязать гальванически шинки ЛЗШ двух секций подстанции.

4.5.1.6 Последовательная схема ЛЗШ позволяет вести постоянный контроль вторичной цепи ЛЗШ на обрыв. При выявлении обрыва цепи ЛЗШ происходит срабатывание сигнализации. При обрыве цепи ЛЗШ КЗ на шинах отключаются с выдержкой времени МТЗ.

Возможно ускорение МТЗ ВВ и СВ при выявлении обрыва. В этом случае при обрыве цепи ЛЗШ КЗ на шинах и на отходящих присоединениях отключаются с выдержкой времени ЛЗШ.

4.5.1.7 Параллельная схема ЛЗШ отличается простотой организации вторичных цепей. Но в данной схеме отсутствует диагностика обрыва вторичных цепей, поэтому рекомендуется контролировать положения автомата шинки ЛЗШ. При КЗ на отходящем присоединении с оборванной цепью ЛЗШ происходит отключение ВВ с выдержкой времени ЛЗШ.

Во всех случаях, в том числе и при обрыве вторичных цепей, КЗ на шинах отключаются с выдержкой времени ЛЗШ.



#### **4.5.2 Выбор параметров срабатывания ЛЗШ**

4.5.2.1 Расчет тока срабатывания МТЗ ВВ, СВ и отходящих присоединений выполняют в соответствии с требованиями, приведёнными в 4.1-4.4.

4.5.2.2 Для предотвращения срабатывания ускоряемой ступени МТЗ в ВВ или СВ из-за задержки передачи сигнала пуска МТЗ от отходящих присоединений ЛЗШ выполняют с выдержкой времени  $t_{\text{ЛЗШ с.з.}}$ . Выдержку времени  $t_{\text{ЛЗШ с.з.}}$  рекомендуется принимать равной не менее 0,1 с.

4.5.2.3 Выбор вторичной схемы подключения выполняют на основании технико-экономического анализа.

## **5 Защита от ОЗЗ**

### **5.1 Принципы действия защиты**

#### **5.1.1 Режимы заземления нейтрали**

5.1.1.1 Наибольшее влияние на выбор уставок защиты от однофазных замыканий на землю оказывает режим заземления нейтрали.

Выделяют следующие режимы:

- изолированная нейтраль;
- нейтраль, заземленная через высокоомный резистор;
- нейтраль, заземленная через низкоомный резистор;
- нейтраль, заземленная через ДГР;
- нейтраль, заземленная через ДГР с высокоомным резистором;
- нейтраль, заземленная через ДГР с низкоомным резистором.

5.1.1.2 В данной работе рассматривается выполнение защиты в зависимости от режима заземления, но не рассматриваются преимущества того или иного способа заземления нейтрали. От способа заземления нейтрали зависят контролируемые параметры и принцип действия, а также действие защиты на отключение или сигнализацию (см. таблицу 5.1).

Таблица 5.1 – Принципы действия защиты от ОЗЗ

Режим заземления нейтрали	Неселективная защита по напряжению нулевой последовательности	Ненаправленная защита, реагирующая на составляющие промышленной частоты	Направленная защита, реагирующая на составляющие промышленной частоты	Направленная защита, реагирующая на активную составляющую тока промышленной частоты	Защита, реагирующая на высшие гармонические составляющие тока в переходном процессе	Защита, реагирующая на высшие гармонические составляющие тока в установив- шемся режиме
Изолированная	Сигнализация*, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0 \text{ с}$	Сигнализация*, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0 \text{ с}$	Сигнализация*, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0,05 \text{ с}$	×	Сигнализация*	×
Заземленная через высокоомный резистор	Сигнализация, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0 \text{ с}$	Сигнализация*, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0 \text{ с}$	Сигнализация*, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0,05 \text{ с}$	Сигнализация*, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0,05 \text{ с}$	Сигнализация*	×
Заземленная через низкоомный резистор	Отключение ВВ и СВ, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0,5 \text{ с}$	Отключение, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0 \text{ с}$	×	×	×	×
Компенсированная	Сигнализация, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0 \text{ с}$	×	×	Сигнализация, $t_{033 \text{ с.з.}} = 1 \text{ с}$	Сигнализация	Сигнализация, $t_{033 \text{ с.з.}} = 1 \text{ с}$
Компенсированная с включением высокоомного резистора	Сигнализация, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0 \text{ с}$	×	Сигнализация*, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0,05 \text{ с}$	Сигнализация*, $t_{033 \text{ с.з.}} = 0,05 \text{ с}$	Сигнализация	×
Компенсированная с включением низкоомного резистора	Отключение ВВ и СВ, $t_{033 \text{ с.з.}}$ от 0,5 до 2,0 с	Отключение, $t_{033 \text{ с.з.}}$ от 0 до 1,5 с	×	×	×	×
* Может быть предусмотрено действие на отключение по требованиям безопасности. Примечание – Знак "×" означает, что приведенный тип защиты не применяется при данном режиме заземления нейтрали.						

### **5.1.2 Сети с изолированной нейтралью**

5.1.2.1 В сетях с изолированной нейтралью возможно сохранение сети в работе при однофазных замыканиях на землю. Вследствие этого защита выполняется следующим образом:

- неселективная сигнализация наличия напряжения нулевой последовательности  $3U_0$  на шинах. Допускается отыскание поврежденного элемента поочередным отключением присоединений;
- селективная сигнализация ОЗЗ на присоединениях, отходящих от шин. Защиту выполняют без выдержки времени или с выдержкой времени, если это необходимо по условию отстройки от переходных процессов.

5.1.2.2 Защиту выполняют с действием на отключение на двигателях и генераторах при токах больше 5 А или 10 А в зависимости от мощности установки [1].

Защита может также действовать на отключение без выдержки времени по требованиям безопасности. При этом в качестве резервной защиты предусматривают неселективную защиту по напряжению нулевой последовательности с выдержкой времени 0,5 с, действующую на отключение всей электрически связанной сети.

5.1.2.3 На отходящих присоединениях применяют ненаправленную защиту, реагирующую на составляющую промышленной частоты тока нулевой последовательности. В случае, если чувствительность защиты недостаточна, применяют направленную защиту, реагирующую на составляющую промышленной частоты тока. Для повышения чувствительности к дуговым замыканиям должна применяться защита, реагирующая на высшие гармонические составляющие тока в переходном процессе.

### **5.1.3 Сети с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор**

5.1.3.1 Защиту сети от однофазных замыканий на землю в сетях, заземленных через высокоомный резистор, выполняют так же, как защиту сетей с изолированной нейтралью (см. 5.1.2).

### **5.1.4 Сети с нейтралью, заземленной через низкоомный резистор**

5.1.4.1 Применение заземления нейтрали через низкоомный резистор обусловлено требованием селективного отключения замыканий на землю.

5.1.4.2 Защита от замыканий на землю выполняется следующим образом:

- неселективная защита наличия напряжения нулевой последовательности  $3U_0$  на шинах с выдержкой времени, отстроенной от защиты присоединений, отходящих от шин. Защита действует на отключение всей электрически связанной сети;

- селективная защита от ОЗЗ на присоединениях, отходящих от шин. Защита отходящих присоединений выполняется ненаправленной и реагирует на составляющую промышленной частоты тока нулевой последовательности.

### **5.1.5 Сети с компенсированной нейтралью**

5.1.5.1 Компенсация емкостного тока замыкания на землю должна применяться при значениях тока, превышающих требуемые ПУЭ значения. Основной причиной использования дугогасящих реакторов являются требования сохранения электроснабжения при токах больше допустимых.

Применение дугогасящих реакторов возможно и при токах меньше указанных. В этих случаях реактор выполняет компенсацию токов ОЗЗ и способствует гашению дуги.

5.1.5.2 В сетях с компенсированной нейтралью защита выполняется следующим образом:

- неселективная сигнализация наличия напряжения нулевой последовательности  $3U_0$  на шинах. Допускается отыскание поврежденного элемента поочередным отключением присоединений;
- селективная сигнализация ОЗЗ на присоединениях, отходящих от шин.

5.1.5.3 В сетях с компенсированной нейтралью при настройке ДГР в резонанс через все ТНП протекают токи, равные емкостному току соответствующего присоединения. По этой причине невозможно выполнить защиту, реагирующую на составляющую емкостного тока.

5.1.5.4 Работа селективной защиты отходящих присоединений основана на следующих принципах:

- защита, реагирующая на составляющую высших гармоник тока в установившемся режиме. Как правило, выполняется на относительном замере, когда сравнивается уровень высших гармоник на всех присоединениях;
- направленная защита, реагирующая на активную составляющую тока промышленной частоты.

Данные защиты работают с выдержкой времени для отстройки от переходных процессов. Дополнительно предусматривается защита, реагирующая на высшие гармонические составляющие тока в переходном процессе, для работы при дуговых замыканиях.

### **5.1.6 Сети с компенсированной нейтралью с включением высокоомного резистора**

5.1.6.1 Режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор с шунтирующим низковольтным резистором, подключаемым во вторичную силовую обмотку, позволяет реализовать селективную защиту от замыканий на землю. Как правило, защиты от замыканий на землю в этом случае действуют на сигнал (ток в месте повреждения мал и его немедленное отключение не требуется).

В нормальном режиме низковольтный шунтирующий резистор дугогасящего реактора отключен и не влияет на точность настройки компенсации. Резистор подключается только при устойчивых замыканиях на землю на время, требуемое для срабатывания защит (1–3 секунды).

5.1.6.2 В сетях с компенсированной нейтралью с включением высокоомного резистора защита выполняется следующим образом:

- неселективная сигнализация наличия напряжения нулевой последовательности  $3U_0$  на шинах;
- селективная сигнализация ОЗЗ на присоединениях, отходящих от шин. На отходящих присоединениях применяют направленную защиту, реагирующую на активную составляющую тока промышленной частоты. Дополнительно может применяться защита, реагирующая на высшие гармонические составляющие тока в переходном процессе.

### **5.1.7 Сети с компенсированной нейтралью с включением низкоомного резистора**

5.1.7.1 Режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор с шунтирующим высоковольтным резистором, подключаемым к нейтрали трансформатора силовым выключателем, позволяет реализовать селективную защиту от замыканий на землю.

Резистор подключается к нейтрали при устойчивых замыканиях на землю на 1-2 секунды. После подключения поврежденное присоединение отключается релейной защитой.

5.1.7.2 В сетях с компенсированной нейтралью с включением низкоомного резистора защита выполняется следующим образом:

- неселективная защита по наличию напряжения нулевой последовательности  $3U_0$  на шинах. Защита действует с выдержкой времени 0,5 с на отключение всей электрически связанной сети или на отключение резистора и сигнализацию;
- селективная ненаправленная защита, реагирующая на составляющую промышленной частоты тока нулевой последовательности.

## **5.2 Расчет уставок защит**

### **5.2.1 Расчет уставок ненаправленной защиты**

5.2.1.1 Ненаправленную защиту от замыканий на землю, реагирующую на основную гармонику тока нулевой последовательности применяют:

- в сетях с изолированной нейтралью;
- в сетях с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор;
- в сетях с нейтралью, заземленной через низкоомный резистор;
- в сетях с компенсированной нейтралью с включением низкоомного резистора.

5.2.1.2 Первичный ток срабатывания защиты  $I_{0ЗЗ \text{ с.з.}}, A$ , выбирают из условия отстройки от тока внешнего замыкания на землю по формуле

$$I_{033 \text{ с.з.}} = \frac{1}{k_B} \cdot (k'_{\text{отс}} \cdot I_C + k''_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб}}), \quad (5.1)$$

где  $k_B = 0,95$  - коэффициент возврата;

$k'_{\text{отс}}$  - коэффициент отстройки от внешнего замыкания на землю.

Принимается равным 1,5 при работе защиты с выдержкой времени, 2,5 - при работе защиты без выдержки времени;

$I_C$  - установившийся емкостной ток замыкания на землю защищаемого присоединения, А;

$k''_{\text{отс}} = 1,5$  - коэффициент отстройки;

$I_{\text{нб}}$  - первичный установившийся ток небаланса, обусловленный погрешностью измерения или расчета тока нулевой последовательности, А.

5.2.1.3 При подключении блока к ТНП рекомендуемое значение вторичного тока небаланса  $I_{\text{нб втор}}$  10 мА. Значение уточняется по опыту эксплуатации.

Первичный ток небаланса  $I_{\text{нб}}$ , А, рассчитывают по формуле

$$I_{\text{нб}} = I_{\text{нб втор}} \cdot n_T, \quad (5.2)$$

где  $I_{\text{нб втор}}$  - вторичный ток небаланса, А;

$n_T$  - коэффициент трансформации ТТ.

Дополнительно необходимо выполнить отстройку от небаланса при самозапуске нагрузки. Рекомендуемое значение вторичного тока небаланса при самозапуске  $I_{\text{нб втор}}$  30 мА. Значение  $I_{\text{нб втор}}$  уточняется по опыту эксплуатации.

Для предотвращения срабатывания защиты от ОЗЗ при внутренних КЗ рекомендуется блокировать защиту при пуске МТЗ.

5.2.1.4 Если защита реагирует на расчетный ток нулевой последовательности или подключена в обратный провод, первичный ток небаланса  $I_{\text{нб}}$ , А, рассчитывают по формуле

$$I_{\text{нб}} = 0,03 \cdot I_{\text{раб.макс}}, \quad (5.3)$$

где  $I_{\text{раб.макс}}$  - максимальный рабочий ток защищаемого присоединения, А.

При самозапуске нагрузки и внутренних КЗ отсутствие срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю обеспечивается одним из следующих способов:

- блокировка при токах больше  $I_{\text{раб.макс}}$ ;

- увеличение уставки срабатывания в соответствии с характеристикой торможения.

5.2.1.5 Чувствительность защиты от однофазных замыканий определяют при внутреннем замыкании на землю по формуле

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{0\Sigma}}{I_{033 \text{ с.з.}}}, \quad (5.4)$$

где  $I_{0\Sigma}$  - установившийся ток замыкания на защищаемой линии, А;

$I_{033 \text{ с.з.}}$  - ток срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю, А.

Для защит кабельных линий рекомендуется обеспечивать коэффициент чувствительности защиты от ОЗЗ не менее 1,25, для защит воздушных линий - не менее 1,5.

5.2.1.6 При недостаточной чувствительности в сетях с изолированной нейтралью и нейтралью, заземленной через высокоомный резистор, защиту рекомендуется подключать к ТТНП. При недостаточной чувствительности защиты, подключенной к ТТНП, защиту выполняют направленной.

При недостаточной чувствительности в сетях с нейтралью, заземленной через низкоомный резистор, рекомендуется подключать к ТТНП или уменьшить сопротивление резистора для увеличения тока внутреннего замыкания на землю.

В сетях с нейтралью, заземленной через низкоомный резистор, защиту выполняют по условию обеспечения селективности с предыдущими присоединениями.

5.2.1.7 В сетях с изолированной нейтралью и нейтралью, заземленной через высокоомный резистор, защиту рекомендуется выполнять без выдержки времени для обеспечения срабатывания защиты при кратковременных дуговых замыканиях.

При выполнении защиты с выдержкой времени уменьшается коэффициент отстройки  $k'_{отс}$  в формуле (5.1), соответственно увеличивается чувствительность защиты. Для увеличения чувствительности возможно выполнение защиты с выдержкой времени  $t_{033 \text{ с.з.}}$ , равной 0,05 с.

## 5.2.2 Расчет уставок направленной защиты

5.2.2.1 Направленную защиту от замыканий на землю применяют в сетях с изолированной нейтралью, нейтралью, заземленной через высокоомный резистор и компенсированной нейтралью с включением высокоомного резистора.

5.2.2.2 Первичный ток срабатывания направленной защиты от однофазных замыканий на землю  $I_{033 \text{ с.з.}}$ , А, выбирают по формуле

$$I_{033 \text{ с.з.}} = \frac{k_{отс} \cdot I_{Нб}}{k_B}, \quad (5.5)$$

где  $k_{отс} = 1,5$  - коэффициент отстройки;

$I_{Нб}$  - вторичный установившийся ток небаланса, обусловленный погрешностью измерения или расчета тока нулевой последовательности, рассчитывается в соответствии с 5.2.1.3, 5.2.1.4, А;

$k_B = 0,95$  - коэффициент возврата.

5.2.2.3 Уставку по напряжению определяют по условию отстройки от напряжения небаланса в нормальном режиме. Уставку по напряжению  $U_{0 \text{ с.з.}}$ , В, рекомендуется принимать равной 15 В.

5.2.2.4 Для сети с изолированной нейтралью рекомендуется устанавливать угол  $\varphi_{мч}$  равным  $90^\circ$ .

5.2.2.5 Для сети с нейтралью, заземленной через резистор, угол максимальной чувствительности  $\varphi_{м.ч.}$ ,  $^\circ$ , рассчитывают по формуле



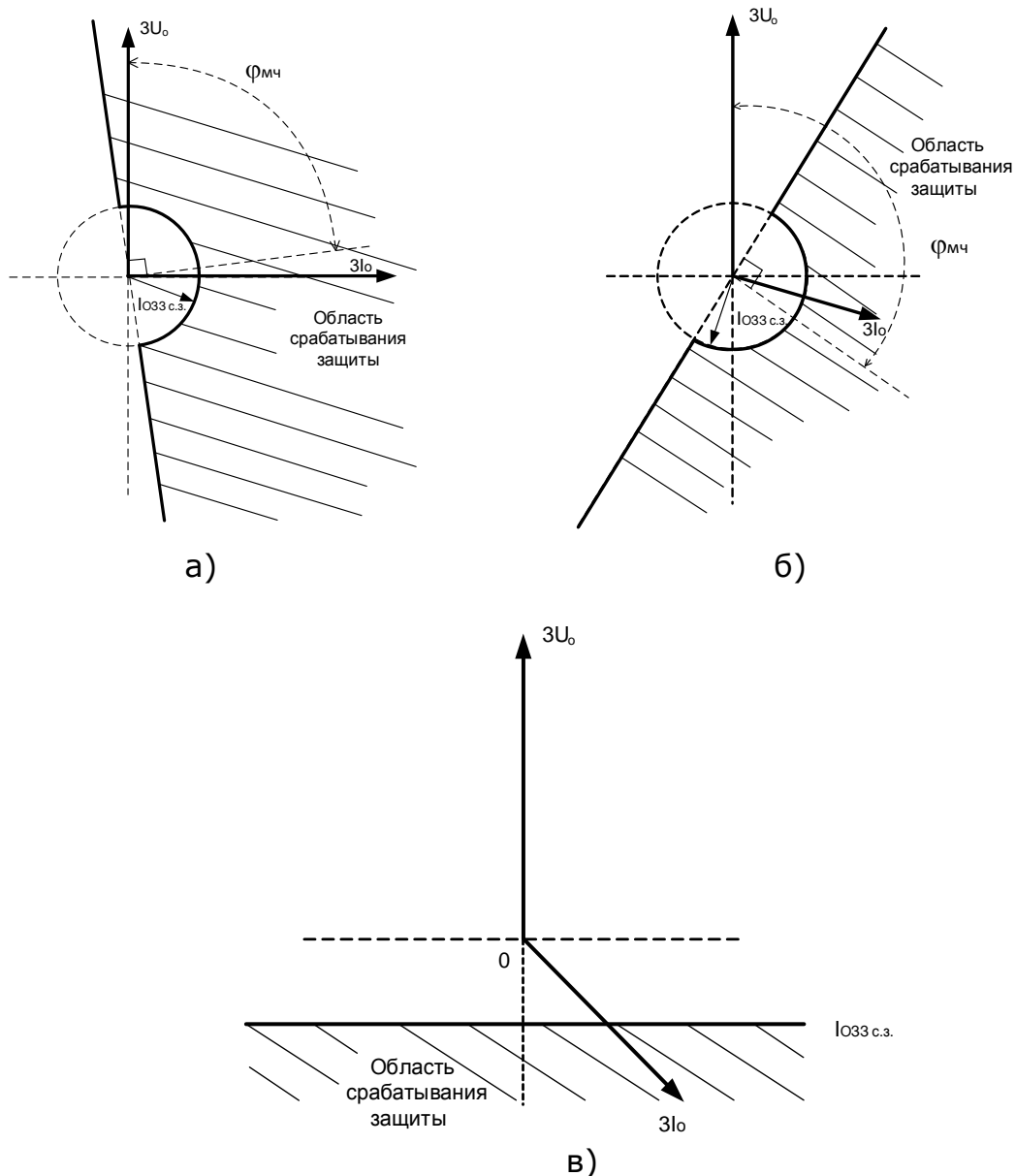
$$\varphi_{\text{м.ч.}} = 90 + \arctg\left(\frac{I_{0R}}{I_{0C}}\right), \quad (5.6)$$

где  $I_{0R}$ ,  $I_{0C}$  - активная и ёмкостная составляющие тока нулевой последовательности при внутреннем замыкании на землю, А.

Для сети с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор, рекомендуемое значение угла  $\varphi_{\text{мч}} = 135^\circ$ .

5.2.2.6 В сети с компенсированной нейтралью с включением высокоомного резистора применяют направленное реле активного тока.

5.2.2.7 Характеристики направленной защиты от ОЗЗ изображены на рисунке 7.2.



а) сеть с изолированной нейтралью;

б) сеть с нейтралью, заземленной через резистор;

в) сеть с компенсированной нейтралью с включением высокоомного резистора

Рисунок 5.1 – Характеристики направленной защиты от ОЗЗ

5.2.2.8 В сетях с изолированной нейтралью и нейтралью, заземленной через резистор, чувствительность защиты от однофазных замыканий определяют при внутреннем замыкании на землю по формуле (5.4).

5.2.2.9 В сети с компенсированной нейтралью с включением высокоомного резистора чувствительность защиты от однофазных замыканий определяют при внутреннем замыкании на землю по формуле

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_R}{I_{033 \text{ с.з.}}}, \quad (5.7)$$

где  $I_R$  - установившееся значение активной составляющей тока, А;

$I_{033 \text{ с.з.}}$  - ток срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю, А.

5.2.2.10 Направленную защиту рекомендуется выполнять с выдержкой времени  $t_{033 \text{ с.з.}}$ , равной 0,05 с, для предотвращения срабатывания защиты из-за нестабильности сигнала тока.

### **5.2.3 Расчет уставок защиты, реагирующей на высшие гармонические составляющие тока в переходном процессе**

5.2.3.1 Защиту, реагирующую на высшие гармонические составляющие тока в переходном процессе, применяют:

- в сетях с изолированной нейтралью;
- в сетях с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор;
- в сетях с компенсированной нейтралью;
- в сетях с компенсированной нейтралью с включением высокоомного резистора.

5.2.3.2 Пуск защиты происходит при скачкообразном увеличении напряжения  $3U_0$  сверх заданной уставки. Уставку по напряжению  $U_{0 \text{ с.з.}}$ , В, определяют согласно 5.2.2.3. При появлении напряжения нулевой последовательности контролируется направление мощности свободной составляющей тока нулевой последовательности.

### **5.2.4 Расчет уставок защиты, реагирующей на высшие гармонические составляющие тока в установившемся режиме**

5.2.4.1 Защиту, реагирующую на высшие гармонические составляющие тока в установившемся режиме, применяют в сетях с компенсированной нейтралью.

5.2.4.2 Первичный ток срабатывания защиты  $I_{033 \text{ с.з.}}$ , А, выбирают из условия отстройки от уровня высших гармоник при внешнем замыкании на землю

$$I_{033 \text{ с.з.}} = \frac{k_{\text{Г}} \cdot k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{С}}}{k_{\text{В}}}, \quad (5.8)$$

где  $k_{\text{Г}} = 0,05$  – доля высших гармоник в токе ОЗЗ при внешних замыканиях на землю;

$k_{отс}=1,2$  - коэффициент отстройки от внешнего замыкания на землю;

$I_c$  - установившийся емкостной ток замыкания на землю защищаемого присоединения, А;

$k_B = 0,95$  - коэффициент возврата.

5.2.4.3 Защита действует на сигнализацию с выдержкой времени  $t_{033}$ , равной 1 с.

### 5.2.5 Расчет уставок неселективной защиты по напряжению нулевой последовательности

5.2.5.1 Защита по напряжению нулевой последовательности устанавливается независимо от режима заземления нейтрали.

5.2.5.2 Уставку по напряжению  $U_{0с.з.}$ , В, определяют по формуле

$$U_{033 \text{ с.з.}} = k_{отс} \cdot U_{0 \text{ нб}}, \quad (5.9)$$

где  $k_{отс}$  - коэффициент отстройки, принимается равным 1,5;

$U_{0 \text{ нб}}$  - максимальное напряжение небаланса на выводах  $3U_0$  трансформатора напряжения, может быть принято равным 7 В.

5.2.5.3 В сетях с нейтралью, заземленной через низкоомный резистор, защита действует на отключение всей электрически связанной сети с выдержкой времени  $t_{033}$ , равной 0,5 с.

5.2.5.4 В сетях с изолированной и компенсированной нейтралью, заземленной через высокоомный резистор, защита действует на сигнализацию с выдержкой времени 0,1 с.

## 5.3 Примеры расчета

### 5.3.1 Пример расчета защиты от ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью

5.3.1.1 Пример расчета уставок защиты от ОЗЗ приведен для схемы сети, представленной на рисунке 5.2. Сеть 10 кВ работает с изолированной нейтралью.

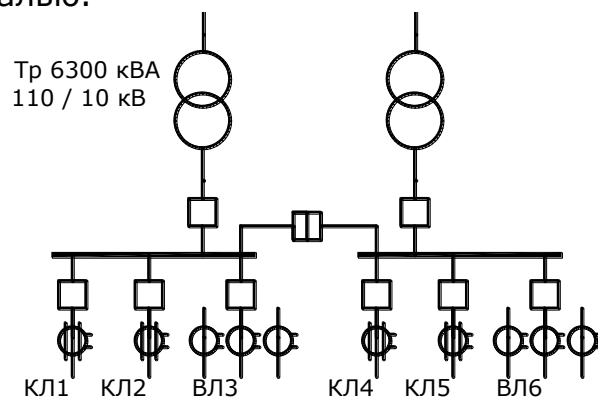


Рисунок 5.2 – Первичная схема сети

Параметры присоединений приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Параметры присоединений

Присоединение	Характеристика линии	Длина, км	Удельная емкость, мкФ/км	Номинальный ток, А	ТТ
1	КЛ АПвПнг(А)-3х120	0,5	0,35	110	ТЗРЛ $n_T=25/1$
2	КЛ АПвПнг(А)-3х95	0,3	0,32	80	ТЗРЛ $n_T=25/1$
3	ВЛ	1,7	0,00441	70	ТОЛ-10 $n_T=100/5$
4	КЛ АПвПнг(А)-3х95	0,3	0,32	90	ТЗРЛ $n_T=25/1$
5	КЛ АПвПнг(А)-3х70	0,2	0,29	80	ТЗРЛ $n_T=25/1$
6	ВЛ	1,1	0,00441	90	ТОЛ-10 $n_T=100/5$

5.3.1.2 В сетях с изолированной нейтралью возможно сохранение сети в работе при однофазных замыканиях на землю. Вследствие этого защита выполняется следующим образом:

- неселективная сигнализация наличия напряжения нулевой последовательности  $3U_0$  на шинах. Данную сигнализацию выполнить в составе защит вводного выключателя в блоке БМРЗ-152-ВВ-01;
- селективная сигнализация ОЗЗ на присоединениях, отходящих от шин. Защиту выполнить в защите отходящих линий БМРЗ-152-КЛ.

Защита от ОЗЗ, установленная на КЛ, подключена к ТТНП. Диапазон уставок ОЗЗ РТ1 от 0,01 до 4,00 А.

Защита от ОЗЗ, установленная на ВЛ, подключена в обратный провод фазных ТТ. Диапазон уставок ОЗЗ РТ1 от 0,01 до 4,00 А.

5.3.1.3 Рассчитать емкостные токи всех присоединений.

Емкостной ток кабельной линии 1 определить по формуле<sup>1)</sup>

$$I_C = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \omega \cdot C_{\text{уд}} \cdot L \cdot 10^{-3} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 314 \cdot 0,35 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,95 \text{ А}$$

Аналогично определить емкостной ток для остальных КЛ.

Емкостной ток ВЛ 3 определить по приближенной формуле<sup>2)</sup>

$$I_C = k_c \cdot U_{\text{ном}} \cdot L \cdot 10^{-3} = 2,7 \cdot 10 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} = 0,046 \text{ А}$$

Аналогично определить емкостной ток ВЛ 6, результаты свести в таблицу.

Таблица 5.3 – Емкостные токи присоединений

Присоединение	Емкостной ток, А
1	0,95
2	0,522
3	0,046
4	0,522
5	0,315
6	0,03

<sup>1)</sup> - см. формулу (6.1) [6]

<sup>2)</sup> - см. формулу (6.2) [6]

Емкостной ток секции 1  $I_{\Sigma 1}$  равен 1,52 А, секции 2 – 0,87 А.

5.3.1.4 Первичный ток небаланса  $I_{НБ}$ , А, рассчитать по формуле (5.2)

$$I_{НБ} = I_{НБ \text{ втор}} \cdot n_T = 0,01 \cdot 25 = 0,25 \text{ А}$$

5.3.1.5 Первичный ток срабатывания защиты КЛ1  $I_{033 \text{ с.з.}}$ , А, выбрать из условия отстройки от тока внешнего замыкания на землю по формуле (5.1)

$$I_{033 \text{ с.з.}} = \frac{1}{k_B} \cdot (k'_{\text{отс}} \cdot I_C + k''_{\text{отс}} I_{НБ}) = \frac{1}{0,95} \cdot (2,5 \cdot 0,95 + 1,5 \cdot 0,25) = 2,9 \text{ А}$$

5.3.1.6 Чувствительность защиты от однофазных замыканий определить при внутреннем замыкании на землю по формуле (5.4)

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{0\Sigma}}{I_{033 \text{ с.з.}}} = \frac{1,52}{2,9} = 0,52$$

Коэффициент чувствительности защиты менее 1,25, поэтому необходимо применение направленной защиты.

5.3.1.7 Первичный ток срабатывания направленной защиты от однофазных замыканий на землю  $I_{033 \text{ с.з.}}$ , А, выбрать по формуле (5.5)

$$I_{033 \text{ с.з.}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot I_{НБ}}{k_B} = \frac{1,5 \cdot 0,25}{0,95} = 0,4 \text{ А}$$

5.3.1.8 Чувствительность защиты от однофазных замыканий определить при внутреннем замыкании на землю по формуле (5.4)

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{0\Sigma}}{I_{033 \text{ с.з.}}} = \frac{1,52}{0,4} = 3,8$$

Коэффициент чувствительности больше 1,25, требование по чувствительности удовлетворяется.

5.3.1.9 Пересчет тока, выраженного в первичных значениях, во вторичные значения выполнить по формуле (3.1)

$$I_{033 \text{ с.р.}} = \frac{I_{033 \text{ с.з.}}}{n_T} = \frac{0,4}{25} = 0,016 \text{ А}$$

Уставка  $I_{\text{с.р.}}$  входит в доступный диапазон уставок

$$0,010 \leq I_{033 \text{ с.р.}} = 0,016 \leq 4,000$$

5.3.1.10 Для сети с изолированной нейтралью рекомендуется устанавливать угол  $\varphi_{\text{мч}}$  равным  $90^\circ$ .

5.3.1.11 Уставку по напряжению определить по условию отстройки от напряжения небаланса в нормальном режиме. Уставку по напряжению  $U_{0\text{с.з.}}$ , В, рекомендуется принимать равной 15 В.

5.3.1.12 Защита действует на сигнализацию с выдержкой времени  $t_{033 \text{ с.з.}}$ , равной 0,05 с.

5.3.1.13 Дополнительно рекомендуется применять защиту, реагирующую на высшие гармонические составляющие тока в переходном процессе.

5.3.1.14 Первичный ток срабатывания защиты ВЛЗ  $I_{033 \text{ с.з.}}$ , А, выбрать из условия отстройки от тока внешнего замыкания на землю по формуле

$$I_{033 \text{ с.з.}} = \frac{1}{k_B} \cdot (k'_{\text{отс}} \cdot I_C + k''_{\text{отс}} I_{НБ}) = \frac{1}{0,95} \cdot (2,5 \cdot 0,046 + 1,5 \cdot 2,1) = 3,43 \text{ А}$$

## 5.3.1.15 Первичный ток небаланса рассчитать по формуле

$$I_{\text{нб}} = 0,03 \cdot I_{\text{раб.макс}} = 0,03 \cdot 70 = 2,1 \text{ А}$$

5.3.1.16 Чувствительность защиты от однофазных замыканий определить при внутреннем замыкании на землю по формуле

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{0\Sigma}}{I_{033 \text{ с.з.}}} = \frac{1,52}{3,43} = 0,44$$

Коэффициент чувствительности защиты менее 1,25, поэтому необходимо применение направленной защиты.

5.3.1.17 Первичный ток срабатывания направленной защиты от однофазных замыканий на землю  $I_{033 \text{ с.з.}}$ , А, выбрать по формуле (5.5)

$$I_{033 \text{ с.з.}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб}}}{k_{\text{в}}} = \frac{1,5 \cdot 2,1}{0,95} = 3,3 \text{ А}$$

5.3.1.18 Чувствительность защиты от однофазных замыканий определить при внутреннем замыкании на землю по формуле

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{0\Sigma}}{I_{033 \text{ с.з.}}} = \frac{1,52}{3,3} = 0,46$$

Коэффициент чувствительности защиты менее 1,5, поэтому необходимо применение кабельной вставки для подключения ТТНП.

5.3.1.19 Уставки, вводимые в блок БМРЗ-152-КЛ-01, установленный на КЛ1, приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Уставки для ввода в блок БМРЗ-152-КЛ-01

Обозначение в блоке	Комментарий	Обозначение в расчете	Значение уставки
<b>Общие параметры защищаемого объекта</b>			
S21	Ввод действия ОЗЗ на отключение	-	Выведен
S26	ОЗЗ направленная	-	Введен
ОЗЗ РТ1	Ток срабатывания защиты от ОЗЗ, А	$I_{033 \text{ с.р.}}$	0,016
ОЗЗ РН	Напряжение срабатывания защиты от ОЗЗ, В	$U_{033 \text{ с.р.}}$	15
Ф0 МЧ	Угол максимальной чувствительности, °	$\varphi_{\text{м.ч.}}$	90
ОЗЗ Т1	Выдержка времени первой ступени защиты от ОЗЗ, с	$t_{033 \text{ с.з.}}$	0,05
S28	Ввод СНОЗЗ	-	Введен

### **Литература**

1. Правила устройства электроустановок. Шестое издание. – СПб.: Издательство ДЕКАН, 2005. – 464 с.
2. IEC 60255-3 Electrical relays. Part 3: Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time. Second edition 1989-05.
3. Голубев М.Л. Расчет уставок релейной защиты и предохранителей в сетях 0,4-35 кВ. М., «Энергия», 1969.
4. ГОСТ 2213-79 Предохранители переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие технические условия. Введ. 1981-01-01.
5. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. -296 с., ил.
6. СТО ДИВГ-058-2017. Расчет токов коротких замыканий и замыканий на землю в распределительных сетях. Методические указания. СПб: НТЦ Механотроника, 2017.
7. Шабад М.А. Защита трансформаторов распределительных сетей. – Л.:Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981- 136 с.ил.
8. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. Введ. 1986-07-01.
9. Байтер И.И. Защита и АВР электродвигателей собственных нужд. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. 104 с., ил.- (Б-ка электромонтера, Вып. 502).

УДК 621.316.925.1

Ключевые слова: защита распределительных сетей, расчёт уставок, максимальная токовая защита, токовая отсечка, логическая защита шин, защита от однофазных замыканий на землю

**Генеральный директор  
ООО «НТЦ «Механотроника»**

**Шейкин И.С.**

Технический директор

Гондуров С.А.

Заведующий кафедрой Релейной  
защиты и автоматики  
электрических станций, сетей и  
систем  
Петербургского Энергетического  
Института Повышения  
Квалификации  
к.т.н.

Соловьёв А.Л.

Начальник отдела релейной  
защиты и автоматики

Иванов И.В.

Ведущий инженер-системотехник

Сельков Е.А.

**НОРМОКОНТРОЛЬ:**

Начальник бюро стандартизации и  
технической документации

Ермоленко Л.М.

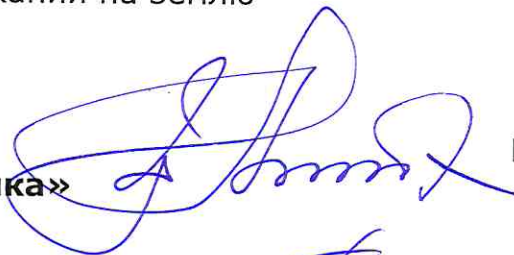


[illegible]

УДК 621.316.925.1

Ключевые слова: защита распределительных сетей, расчёт уставок, максимальная токовая защита, токовая отсечка, логическая защита шин, защита от однофазных замыканий на землю

Генеральный директор  
ООО «НТЦ «Механотроника»



Шейкин И.С.

Технический директор



Гондуров С.А.

Заведующий кафедрой Релейной  
защиты и автоматики  
электрических станций, сетей и  
систем  
Петербургского Энергетического  
Института Повышения  
Квалификации  
к.т.н.

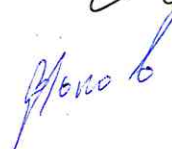
Соловьёв А.Л.

Начальник отдела релейной  
защиты и автоматики



Иванов И.В.

Ведущий инженер-системотехник



Сельков Е.А.

**НОРМОКОНТРОЛЬ:**

Начальник бюро стандартизации и  
технической документации



Ермоленко Л.М.