

**Электрические сети 6-35 кВ. Резистивное и комбинированное  
заземление нейтрали.  
Методические указания по проектированию.**



Ключевые слова: заземление нейтрали, резистор, реактор, подстанция, перенапряжения, электробезопасность, замыкание на землю, релейная защита

---

- 1 РАЗРАБОТАН РУП «Белэнергосетьпроект»
- 2 УТВЕРЖДЕН приказом государственного производственного объединения электроэнергетики «Белэнерго» \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_ и ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_
- 3 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Настоящий стандарт организации не может быть тиражирован и распространен без разрешения ГПО «Белэнерго»

---

Издан на русском языке

## Содержание

1 Область применения .....	1
2 Нормативные ссылки .....	1
3 Термины и определения, обозначения и сокращения.....	2
3.1 Термины и определения .....	2
3.2 Обозначения и сокращения.....	3
4 Основные положения .....	4
5 Выбор режима заземления нейтрали .....	5
5.1 Общие положения .....	5
5.2 Высокоомное резистивное заземление нейтрали .....	6
5.3 Низкоомное резистивное заземление нейтрали.....	7
5.4 Комбинированное заземление нейтрали.....	7
6 Выбор основных параметров оборудования заземления нейтрали .....	8
6.1 Критерии выбора оборудования заземления нейтрали .....	8
6.2 Выбор параметров резистивного заземления резистора .....	8
6.3 Комбинированное заземление нейтрали.....	11
7 Способы включения резистора или ДГР в нейтраль сети 6-35 кВ .....	12
7.1 Принципиальные схемы включения резистора или ДГР в нейтраль сети .	13
7.2 Определение мощности трансформатора для присоединения резистора или ДГР	14
8 Выбор средств защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ с резистивным и комбинированным заземлением нейтрали.....	15
8.1 Общие принципы организации работы релейной защиты и автоматики ...	15
8.2 Релейная защита отходящих присоединений.....	17
8.3 Релейная защита шин и присоединения заземления нейтрали .....	19
8.4 Требования к релейной защите от замыканий на землю.....	20
8.5 Рекомендации по выбору типов релейной защиты .....	21
8.6 Схемы подключения реле тока.....	23
9 Особенности организации работы сетей 6-35 кВ при резистивном и комбинированном заземлении нейтрали .....	24
9.1 Подстанция без связей по сети 6-35 кВ с другими подстанциями .....	24
9.2 Подстанция, имеющая связь по сети 6-35 кВ с другими подстанциями ...	27
9.3 Защита от замыканий на землю параллельных кабельных линий.....	30
9.4 Питание двух секций шин от одной обмотки силового трансформатора .	33
Приложение А (справочное) Технические характеристики оборудования заземления нейтрали .....	38
Приложение Б (рекомендуемое) Методика расчета токов для выбора параметров срабатывания релейной защиты .....	46
Приложение В (рекомендуемое) Методика выбора уставок релейной защиты	52
Приложение Г (справочное) Рекомендации по определению емкостного тока замыкания на землю .....	60

Приложение Д (справочное) Рекомендации по определению токов и напряжений небаланса.....	63
Библиография.....	73

**СТАНДАРТ ГПО «БЕЛЭНЕРГО»**

---

**Электрические сети 6-35 кВ. Резистивное и  
комбинированное заземление нейтрали.  
Методические указания по проектированию.**

---

Дата введения \_\_\_\_\_

**1 Область применения**

Настоящий стандарт организации ГПО «Белэнерго» (далее – стандарт) устанавливает основные технические и методические положения по проектированию резистивного и комбинированного заземления нейтрали.

Стандарт предназначен для применения проектными организациями ГПО «Белэнерго» при проектировании резистивного и комбинированного заземления нейтрали 6-35 кВ на подстанциях и распределительных устройствах, а также эксплуатационными организациями при наладке и эксплуатации резистивного и комбинированного заземления нейтрали.

Другими ведомствами и организациями Республики Беларусь стандарт может быть использован по согласованию с ГПО «Белэнерго».

**2 Нормативные ссылки**

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие технические нормативные правовые акты в области технического нормирования и стандартизации (далее – ТНПА):

ТКП 181-2009 (02230) Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей

ТКП 339-2022 (33240) Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний

ТКП 427-2022 (33240) Электроустановки. Правила по обеспечению безопасности при эксплуатации

СТБ 2574-2020 Электроэнергетика. Основные термины и определения

ГОСТ 721-77 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В

ГОСТ 16110-82 Трансформаторы силовые. Термины и определения

ГОСТ 18624-73 Реакторы электрические. Термины и определения

ГОСТ 30830-2002 (МЭК 60076-1-93) Трансформаторы силовые. Часть 1. Общие положения

ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения

ГОСТ 15150 Машины, приборы и другие технические изделия исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды

СТП 09110.20.361-04 Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрической сети 6-35 кВ

СТП 09110.47.103-07 Методические указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 35-750 кВ

СТП 09110.47.203-07 Методические указания по выполнению заземления на электрических станциях и подстанциях напряжением 35-750 кВ

СТП 09110.20.361-04 Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрической сети 6-35 кВ

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие включенных в перечень ТНПА.

Если ссылочные ТНПА заменены (изменены), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться замененными (измененными) ТНПА. Если ссылочные ТНПА отменены без замены, то положение, в котором дана ссылка на них, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

### **3 Термины и определения, обозначения и сокращения**

#### **3.1 Термины и определения**

В настоящем стандарте применяют термины, установленные в ТКП 181, ТКП 339, ТКП 427, СТБ 2574, ГОСТ 16110, ГОСТ 18624, ГОСТ 30830, ГОСТ 32144, а также следующие термины с соответствующими определениями:

**3.1.1 дуговое перенапряжение:** перенапряжение, возникающее в сети при неустойчивом (перемежающемся) горении дуги в месте повреждения.

**3.1.2 заземление:** Преднамеренное электрическое соединение какой-либо части электроустановки с заземляющим устройством.

**3.1.3 заземление нейтрали сети через дугогасящий реактор:** преднамеренное электрическое соединение нейтрали сети с заземляющим устройством через дугогасящий реактор, который создает индуктивный ток с целью компенсации емкостного тока в месте однофазного замыкания на землю («компенсированная нейтраль»).

**3.1.4 изолированная нейтраль:** Нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через приборы сигнализации, измерения, защиты, заземляющие дугогасящие реакторы и подобные им устройства, имеющие большое сопротивление.

**3.1.5 направленная токовая защита от однофазных замыканий на**

**землю:** защита, реагирующая на ток и напряжение нулевой последовательности, а также электрический угол между ними. Защита подключается к фильтру токов и фильтру напряжения нулевой последовательности.

**3.1.6 ненаправленная токовая защита от однофазных замыканий на землю:** защита, реагирующая на ток нулевой последовательности. Защита подключается к фильтру токов нулевой последовательности.

**3.1.7 перенапряжение:** Превышение напряжения над наибольшим рабочим напряжением, установленным для данного электрооборудования.

**3.1.8 распределительное устройство; РУ:** Электроустановка, служащая для приема и распределения электроэнергии одного класса напряжения и содержащая коммутационные аппараты, сборные и соединительные шины, вспомогательные устройства (компрессорные, аккумуляторные и др.), а также устройства защиты, автоматики, телемеханики, связи и измерений.

**3.1.9 распределительная электрическая сеть; РС:** Совокупность электроустановок для передачи и распределения электрической энергии между пользователями электрической сети, состоящая из подстанций, распределительных устройств, токопроводов, воздушных и кабельных линий электропередачи, работающих на определенной территории (ГОСТ 32144).

**3.1.10 резонанс:** Явление в электрической цепи, содержащей участка, имеющие индуктивный и емкостной характер, при котором разность фаз синусоидального электрического напряжения и синусоидального электрического тока на входе цепи равна нулю.

**3.1.11 трансформатор силовой:** Статическое устройство, имеющее две или более обмотки, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного напряжения и тока в одну или несколько других систем переменного напряжения и тока, имеющих обычно другие значения при той же частоте, с целью передачи мощности (ГОСТ 30830).

**3.1.12 электрическое оборудование (электрооборудование):** Любое оборудование, предназначенное для производства, преобразования, передачи, распределения и потребления электрической энергии, например: трансформаторы, генераторы, аппараты, измерительные приборы, устройства защиты, кабельная продукция, электроприемники (ТКП 181).

Примечание – Электрооборудование электроустановки – это электрооборудование, относящееся к электроустановке.

## 3.2 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте применяют следующие сокращения:

**АПВ** – автоматическое повторное включение;

**ВЛ** – воздушная линия электропередачи;

**ДГР** – дугогасящий реактор;

**ЗУ** – заземляющее устройство;

**КЗ** – короткое замыкание;

**ЛЭП** – линия электропередачи;

**ОЗЗ** – однофазное замыкание в электрической цепи на землю;

**ПС** – подстанция;  
**РЗ** – релейная защита;  
**РЗА** – релейная защита и автоматика;  
**РП** – распределительный пункт;  
**СШ** – сборные шины;  
**ТЗН** – трансформатор заземления нейтрали;  
**ТН** – трансформатор напряжения;  
**ТСН** – трансформатор собственных нужд;  
**ТТ** – трансформатор тока;  
**ШР** – шунтирующий низковольтный резистор;  
**ТТНП** – трансформатор тока нулевой последовательности;  
**ФМЗО** – силовой фильтр нулевой последовательности;  
**ФННП** – фильтр напряжения нулевой последовательности;  
**ФТНП** – фильтр тока нулевой последовательности;  
**ЭДС** – электродвижущая сила;  
 **$Y_0/\Delta$**  – соединение обмоток трансформатора по схеме звезда с нулем – треугольник.

#### 4 Основные положения

**4.1** Сети номинального напряжения 6-35 кВ работают с изолированной нейтралью, с компенсацией емкостного тока замыкания на землю (резонансное заземление нейтрали) [1].

Основным достоинством таких систем заземления нейтрали является то, что даже в режиме ОЗЗ без отключения повреждённого участка сети представляется возможным определенное время (до обнаружения и устранения повреждения) осуществлять электроснабжение потребителей. Однако отмеченное преимущество всегда сопровождается негативными явлениями, основными из которых являются:

- при металлическом ОЗЗ напряжение на неповреждённых фазах повышается до линейного, что требует выполнения фазной изоляции на линейное напряжение и представляет повышенную опасность для изоляции кабельных сетей с длительным сроком эксплуатации;

- появляются значительные дуговые перенапряжения, которые способствуют снижению срока службы изоляции, увеличению вероятности перехода ОЗЗ в двухфазные и трехфазные замыкания, появлению множественных повреждений для всей сети, питающейся от данной секции шин подстанции;

- режим ОЗЗ может приводить к развитию феррорезонансных перенапряжений в цепи намагничивания измерительных трансформаторов, электродвигателей и другого оборудования;

- в случае резонансной настройки ДГР ОЗЗ сопровождается малыми токами замыкания на землю, что исключает возможность создания простой, надёжной и селективной защиты, способной выявить повреждённые присоединения;



– повышается опасность поражения людей и животных по причине длительного существования режима работы электрической сети в режиме ОЗЗ.

**4.2** В настоящее время в Белорусской энергосистеме успешно эксплуатируются сети 6-10 кВ с резистивным заземлением нейтрали. Режим заземления нейтрали через резистор обеспечивает:

- снижение уровня перенапряжений в сети при ОЗЗ;
- нормальное функционирование работы РЗА при ОЗЗ, действующей либо на отключение поврежденного присоединения, либо на сигнал о его повреждении;
- снижает вероятность повреждения людей и животных при ОЗЗ поскольку ОЗЗ, как правило, быстро отключается;
- при всех рабочих и защитных функциях обеспечивать экономическую целесообразность принимаемых мероприятий.

**4.3** Резистивное заземление нейтрали в основном применяется в кабельных сетях 6-10 кВ. Согласно собираемой статистике кабельные сети с резистивным заземлением нейтрали работают со значительно меньшим количеством повреждений изоляции сети, чем кабельные сети с изолированной нейтралью или с нейтралью заземленной через ДГР.

**4.4** Применение резистивного заземления нейтрали в сетях воздушных линий и кабельно-воздушных линий позволяет снижать уровень дуговых перенапряжений, но не всегда обеспечивает селективную работу релейной защиты поскольку при повреждениях на ВЛ переходное сопротивление в месте замыкания достигает порядка нескольких кОм. При этом продолжается работа сети в режиме ОЗЗ, что приводит к риску поражения электрическим током людей и животных.

**4.5** Комбинированное заземление нейтрали сетей 6-35 кВ сочетает качества резонансного и резистивного заземления нейтрали. Комбинированное заземление нейтрали состоит из ДГР и подключаемого резистора. В нормальном режиме сеть работает с заземлением нейтрали через ДГР. При возникновении ОЗЗ к вторичной силовой обмотке ДГР кратковременно подключается резистор. Резистор обеспечивает значительный ток для срабатывания защит на сигнал или на отключение поврежденного присоединения. После срабатывания защиты поврежденного присоединения резистор отключается. Если защита присоединения работает на сигнал сеть продолжает работать в режиме ОЗЗ с минимальным током в месте повреждения. В случае если защита работает на отключение поврежденного присоединения, то после отключения сеть продолжает работать в нормальном режиме.

## **5 Выбор режима заземления нейтрали**

### **5.1 Общие положения**

**5.1.1** На выбор режима заземления нейтрали сети влияют следующие характеристики:

- величина емкостного тока замыкания на землю;
- электрическая прочность изоляции электрооборудования;
- возможность осуществления отключения присоединения с однофазным замыканием на землю (резервируемость нагрузки присоединений);
- возможность организации селективной защиты от однофазного замыкания на землю;
- электробезопасность;
- тип сети (кабельная, воздушная или кабельно-воздушная).

**5.1.2** Применяются следующие режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ с применением резистора:

- высокоомное заземление нейтрали;
- низкоомное заземление нейтрали;
- резонансное заземление нейтрали с подключаемым низкоомным резистором (комбинированное заземление нейтрали).

## **5.2 Высокоомное резистивное заземление нейтрали**

**5.2.1** Высокоомное резистивное заземление нейтрали целесообразно применять в случаях, когда сеть должна иметь возможность длительной работы в режиме ОЗЗ до обнаружения места ОЗЗ и устранения повреждения. При этом суммарный ток ОЗЗ в месте повреждения не должен превышать 10 А, что позволяет применять высокоомное резистивное заземление нейтрали только в сетях с величиной ёмкостного тока до 8,9 А.

Высокоомное резистивное заземление нейтрали характеризуется снижением уровня перенапряжений в сети до допустимой величины, организацией эффективной защиты от ОЗЗ с действием на сигнал или на отключение и возможностью продолжительной работы сети в режиме ОЗЗ при действии защит на сигнал.

**5.2.2** Применение высокоомного резистивного заземления нейтрали допускается только при наличии специального технико-экономического обоснования.

**5.2.3** Признаком режима высокоомного резистивного заземления нейтрали является соотношение величины сопротивления резистора  $R_N$  и величины емкостного сопротивления сети  $X_C$ :

$$2X_C > R_N > X_C. \quad (5.1)$$

Ёмкостное сопротивление сети  $X_C$  определяется по выражению

$$X_C = \frac{U_\phi}{I_C}, \text{ Ом}; \quad (5.2)$$

где  $I_C$  – емкостной ток сети, А.

### 5.3 Низкоомное резистивное заземление нейтрали

**5.3.1** Низкоомное резистивное заземление нейтрали применяется в случаях, когда ОЗЗ должно быть селективно отключено в течение минимально возможного времени. При этом ток в нейтрали должен быть достаточным для работы релейной защиты на отключение.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали характеризуется значительным снижением уровня перенапряжений в сети и организацией простой и эффективной защиты от ОЗЗ.

Основная область применения низкоомного резистивного заземления нейтрали – кабельные сети напряжением 6-35 кВ.

**5.3.2** Признаком режима низкоомного резистивного заземления нейтрали является соотношение величины сопротивления резистора  $R_N$  и величины емкостного сопротивления сети  $X_C$ :

$$R_N \leq X_C. \quad (5.3)$$

### 5.4 Комбинированное заземление нейтрали

**5.4.1** Комбинированное заземление нейтрали целесообразно применять в случаях, когда сеть должна иметь возможность длительной работы в режиме ОЗЗ до обнаружения места ОЗЗ и устранения повреждения.

Комбинированное заземление нейтрали характеризуется снижением уровня перенапряжений в сети до допустимой величины, организацией эффективной защиты от ОЗЗ с действием на сигнал или на отключение и возможностью продолжительной работы сети в режиме ОЗЗ при действии защит на сигнал.

Комбинированное заземление нейтрали кратковременно (до 10 с) в поврежденном присоединении создает ток достаточный для селективной работы простых защит от ОЗЗ. При этом сохраняется возможность длительной работы в режиме ОЗЗ.

Область применения комбинированного заземления нейтрали:

- сети воздушных линий 6-35 кВ с величиной емкостного тока более 10 А;
- кабельно-воздушные сети 6-35 кВ с величиной емкостного тока более 10 А;
- кабельные сети 6-35 кВ с величиной емкостного тока более 10 А питающие потребителей отключение которых при ОЗЗ недопустимо;

**5.4.2** Комбинированное заземление нейтрали сочетает в себе свойства резонансного и резистивного заземления нейтрали:

- обеспечивается возможность длительной работы сети в режиме ОЗЗ;
- минимизируется ток ОЗЗ в месте повреждения сети;
- обеспечивается селективная работа простых токовых защит от ОЗЗ на

отключение или на сигнал.

## 5.5 Критерии выбора режима заземления нейтрали сетей 6-35 кВ

5.5.1 Режим заземления нейтрали сетей 6-35 кВ определяется по следующими критериям:

- величина емкостного тока замыкания на землю;
- требования к принципу действия релейной защиты.

5.5.2 Рекомендуемые варианты режима заземления нейтрали сети в зависимости от принципа действия защиты от ОЗЗ и величины емкостного тока замыкания на землю представлены в сводной таблице 5.1.

**Таблица 5.1 – Выбор режима заземления нейтрали**

Величина емкостного тока замыкания на землю	Действие РЗ на сигнал	Действие РЗ на отключение поврежденного присоединения
менее 8,9 А	Высокоомное резистивное заземление нейтрали	Низкоомное резистивное заземление нейтрали
более 8,9 А	Комбинированное заземление нейтрали	
Комбинированное заземление нейтрали		

## 6 Выбор основных параметров оборудования заземления нейтрали

### 6.1 Критерии выбора оборудования заземления нейтрали

Выбор оборудования заземления нейтрали осуществляется по следующим критериям:

- обеспечение требуемой кратности перенапряжений в сети;
- обеспечение эффективной работы защит от ОЗЗ;
- обеспечение электробезопасности;
- обеспечение термической стойкости оборудования;
- обеспечение надежной работы с учетом климатических условий в местах установки оборудования.

### 6.2 Выбор параметров резистивного заземления резистора

6.2.1 Для низкоомного заземления нейтрали коэффициент перенапряжений в сети составляет:

$$k_{II} = 1,0 \div 2,2; \quad (6.1)$$

Для высокоомного заземления нейтрали коэффициент перенапряжений в сети составляет:

$$k_{II} \leq 2,6. \quad (6.2)$$

**6.2.2** Сопротивление резистора по заданной кратности уровня перенапряжений  $k_{II}$  определяется по выражению:

$$R_N = X_C \frac{k_{II} - 1}{3,4 - k_{II}}, \text{ Ом.} \quad (6.3)$$

**6.2.3** Аттестация проектируемых и действующих резисторов по критерию снижения перенапряжений производится по величине кратности перенапряжений  $k_{II}$ , которая определяется по выражению:

$$k_{II} = \frac{2,4 \cdot R_N}{R_N + X_C} + 1. \quad (6.4)$$

**6.2.4** Допустимое сопротивление резистора по критерию эффективной работы РЗА определяется по выражению

$$R_N \leq \frac{U_\phi}{I_{C3}}, \text{ Ом.} \quad (6.5)$$

где  $I_{C3}$  – ток срабатывания релейной защиты от ОЗЗ, А (определяется в соответствии с приложением В или по рекомендациям изготовителя устройства РЗА).

**6.2.5** На ПС 110 кВ и выше, включающих сети 6-35 кВ с заземлённой через резистор нейтралью, условия электробезопасности выполняются всегда, так как стекающий в землю ток с нейтрали при ОЗЗ в сети 6-35 кВ всегда значительно меньше тока однофазного КЗ в сети 110 кВ и выше, по которому проектируется ЗУ ПС и выбираются защитные мероприятия.

**6.2.6** На ПС 6-35 кВ, включающих сети с заземлённой через резистор нейтралью, электробезопасность обеспечивается при допустимой величине сопротивления ЗУ  $R_{3У\text{дон}}$ , удовлетворяющего условию

$$R_{3У\text{дон}} \leq \frac{R_{3У(ПУЭ)} \cdot R_N}{\sqrt{R_N^2 + X_C^2}}, \text{ Ом.} \quad (6.6)$$

где  $R_{3У(ПУЭ)}$  – величина сопротивления ЗУ нормируемая ТКП 339, Ом.

Из формулы (6.6) следует, что по сравнению с принятой в соответствии с ТКП 339 допустимой величиной сопротивления ЗУ при заземлении нейтрали сети через резистор всегда ухудшаются условия электробезопасности. В этом случае электробезопасность обеспечивается двумя способами: либо путем доведения сопротивления ЗУ до допустимого по формуле (6.6), либо путем выполнения на ПС специальных защитных мероприятий, связанных с отключением поврежденного присоединения, или устройством специального выравнивания потенциалов в соответствии с СТП 09110.47.103 и СТП 09110.47.203.

**6.2.7** Величина сопротивления резистора должна выбираться при условии наибольшего рабочего напряжения  $U_{н.раб}$ , которое по ГОСТ 721 составляет:

$$\frac{U_{н.раб}}{\sqrt{3}} = \frac{7,2}{\sqrt{3}} = 4,2 \text{ кВ} \text{ – для сети напряжением 6 кВ;}$$

$$\frac{U_{н.раб}}{\sqrt{3}} = \frac{12}{\sqrt{3}} = 6,9 \text{ кВ} \text{ – для сети напряжением 10 кВ;}$$

$$\frac{U_{н.раб}}{\sqrt{3}} = \frac{40,5}{\sqrt{3}} = 23,4 \text{ кВ} \text{ – для сети напряжением 35 кВ.}$$

**6.2.8** Термическая стойкость низкоомного резистора оценивается по допустимому кратковременному току  $I_{P\partial on}$  и времени его протекания  $t_{P\partial on}$ , которые должны удовлетворять условиям

$$I_{P\partial on} \geq I_P; \quad (6.7)$$

$$t_{P\partial on} \geq t_{C3pez}, \text{ но не менее } 10 \text{ с,} \quad (6.8)$$

где  $I_P = \frac{U_{н.раб}}{\sqrt{3} \cdot R_N}$  – ток, протекающий по резистору в режиме ОЗЗ, А;

$t_{C3pez}$  – время отключения ОЗЗ резервной защитой, действующей на вводной выключатель, с.

**6.2.9** Термическая стойкость высокоомного резистора оценивается по допустимому длительному току  $I_{P\partial on}$  или по номинальной мощности резистора  $S_{Pном}$ , которые должны удовлетворять условиям

$$I_{P\partial on} \geq I_P; \quad (6.9)$$

$$S_{Pном} \geq I_P^2 \cdot R_N. \quad (6.10)$$

**6.2.10** Рекомендуется при расчетах выбирать величину сопротивления резистора из данных, представленных в приложении А и предложениях заводов-изготовителей резисторов или из приведенного ниже номинального ряда.

Рекомендуемый номинальный ряд сопротивлений резисторов для заземления нейтрали: 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 800, 1000, 1250, 1500, 1800, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 7000, 10000 Ом.

**6.2.11** Резистор заземления нейтрали следует выбирать с учетом требований ГОСТ 15150 по климатическому исполнению и категории размещения.

**6.2.12** Рекомендуемая степень защиты резистора – IP 23 [11].

**6.2.13** Активная часть резистора должна быть выполнена из металла [11].

### 6.3 Комбинированное заземление нейтрали

**6.3.1** В состав комбинированного заземления нейтрали входит:

- ДГР плунжерного типа с дополнительной силовой обмоткой управления для подключения ШР;
- ШР;
- блок коммутации ШР;
- автоматическая система управления настройкой тока компенсации ДГР;
- автоматическая система управления коммутацией ШР;

**6.3.2** При точной настройке ДГР в резонанс коэффициент перенапряжений в сети составляет:

$$k_{II} \leq 2,4. \quad (6.11)$$

**6.3.3** Мощность ДГР должна выбираться по значению емкостного тока сети с учетом ее развития на ближайшие 10 лет.

Расчетная мощность ДГР  $Q_{ДГР}$ , кВА, определяется по выражению:

$$Q_{ДГР} = \frac{I_C \cdot U_{ном}}{\sqrt{3}}, \text{ Ом.} \quad (6.12)$$

где  $I_C$  – емкостной ток сети, А,

$U_{ном}$  – номинальное напряжение сети.

**6.3.4** Диапазон регулирования компенсации емкостного тока ДГР должен быть шире диапазона возможных значений емкостного тока сети при различных оперативных схемах.

**6.3.5** Для обеспечения эффективной работы РЗА должно выполняться условие:

$$I_{сз} \leq I_{ОЗЗ}, \text{ А.} \quad (6.13)$$

где  $I_{сз}$  – ток срабатывания релейной защиты от ОЗЗ, А (определяется в соответствии с приложением В или по рекомендациям изготовителя устройства РЗА),

$I_{ОЗЗ}$  – ток замыкания на землю.

При отключенном ШР ток ОЗЗ в месте повреждения минимален и обусловлен степенью точности настройки ДГР в резонанс. При подключении ШР к силовой обмотке управления ДГР в поврежденном присоединении начинает протекать активный ток ОЗЗ. Величина тока должна быть достаточной, чтобы выполнялось условие формулы (6.13).

Величина тока ОЗЗ в сети с комбинированным заземлением нейтрали при подключенном ШР определяется по выражению:

$$I_{OЗЗ} \approx \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot R_{ШР} \cdot K^2}, \text{ Ом}, \quad (6.14)$$

где  $K$  – коэффициент трансформации ДГР,  $R_{ШР}$  – сопротивление шунтирующего резистора.

Коэффициент трансформации ДГР определяется как отношение номинального напряжения основной обмотки к номинальному напряжению силовой обмотки управления:

$$K = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном ОУ}}, \text{ Ом}, \quad (6.15)$$

где  $U_{ном ОУ}$  – номинальное напряжение силовой обмотки управления.

Величина номинальное напряжение силовой обмотки управления зависит от конкретного типа ДГР. Типовые величины  $U_{ном ОУ} = 220 \text{ В}$  и  $U_{ном ОУ} = 500 \text{ В}$ .

**6.3.6** Термическая стойкость ШР оценивается по допустимому кратковременному току  $I_{ШР доп}$  и времени его протекания  $t_{ШР доп}$ , которые должны удовлетворять условиям

$$I_{ШР доп} \geq I_{ШР}; \quad (6.16)$$

$$t_{ШР доп} \geq t_{СЗрез}, \text{ но не менее } 10 \text{ с}, \quad (6.17)$$

где  $I_p = \frac{U_{ном ОУ}}{R_{ШР}}$  – ток, протекающий по резистору в режиме ОЗЗ, А;

$t_{СЗрез}$  – время отключения ОЗЗ резервной защитой, действующей на вводной выключатель, с.

**6.3.7** Кратковременная допустимая мощность силовой обмотки управления ДГР должна быть не менее:

$$S_{ОУ доп.} \geq \frac{U_{ном ОУ}^2}{R_{ШР}}, \text{ Ом}. \quad (6.18)$$

Допустимая длительность работы силовой обмотки управления в режиме максимальной кратковременной мощности:  $t_{доп}$  – не менее 10 с.

**6.3.8** ДГР и ШР следует выбирать с учетом требований ГОСТ 15150 по климатическому исполнению и категории размещения.

**6.3.9** Рекомендуемая степень защиты ШР – IP 23 [11].

**6.3.10** Активная часть ШР должна быть выполнена из металла [11].

## 7 Способы включения резистора или ДГР в нейтраль сети 6-35 кВ

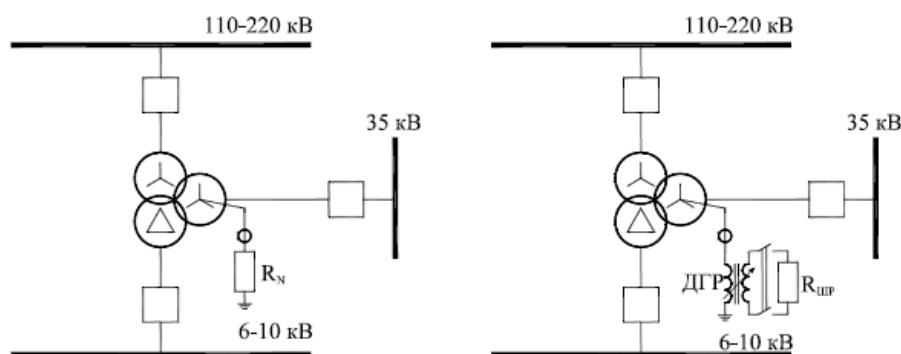


## 7.1 Принципиальные схемы включения резистора или ДГР в нейтраль сети

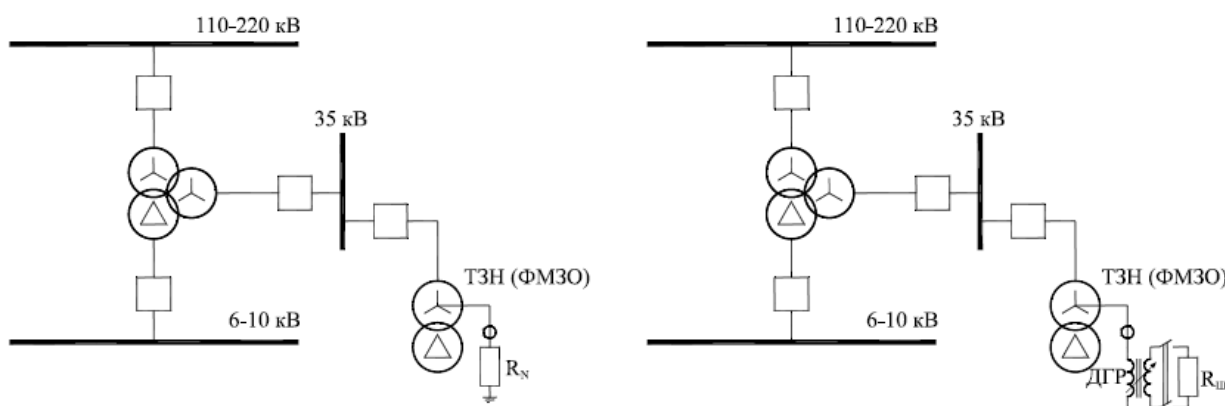
**7.1.1** Нейтрали сетей 6-35 кВ заземляются через резистор или ДГР на питающих ПС. Резисторы или ДГР сети устанавливаются на каждой секции шин 6-35 кВ.

**7.1.2** Включение ДГР или резистора может осуществляться одним из следующих способов:

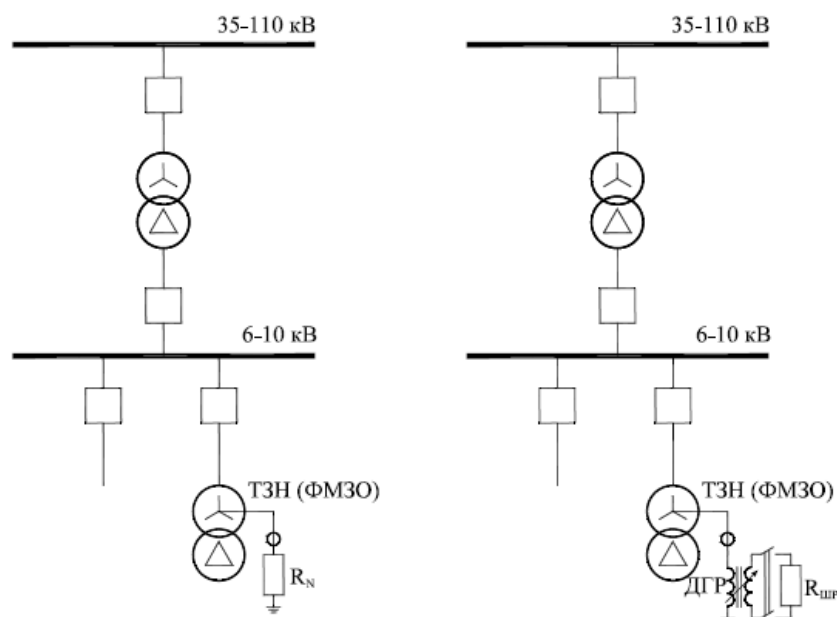
- включение в нейтраль обмотки силового трансформатора соединенной по схеме «звезда с нулем» (см. рисунок 7.1);
- включение в нейтраль обмотки высшего напряжения специально устанавливаемого трансформатора заземления нейтрали (ТЗН) со схемой соединения обмоток  $Y0/\Delta$  (см. рисунки 7.2, 7.3);
- включение через силовой фильтр нулевой последовательности ФМЗО (см. рисунок 7.2, 7.3, 7.4).



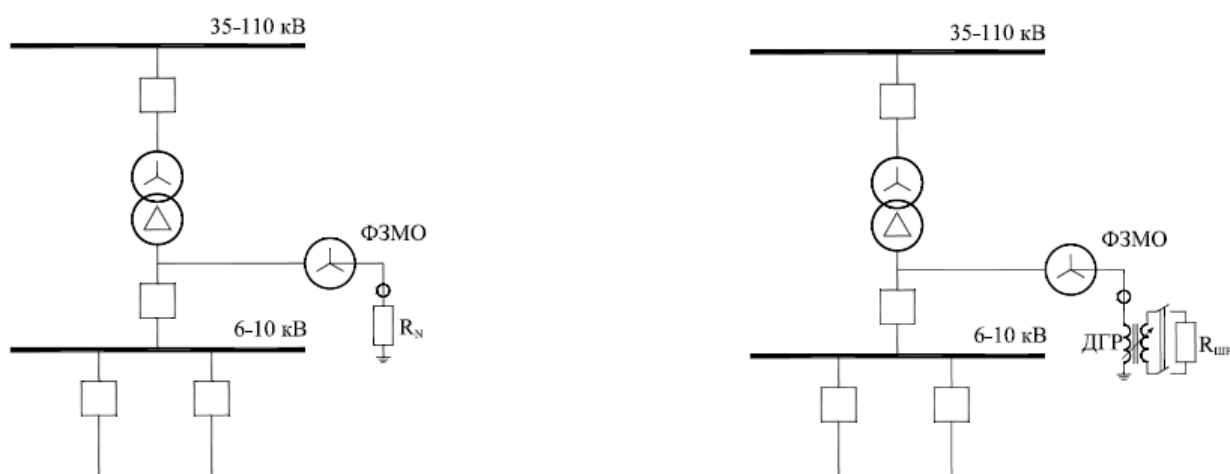
**Рисунок 7.1** – Принципиальная схема заземления нейтрали сети 35 кВ при включении резистора или ДГР в нейтраль обмотки среднего напряжения силового трансформатора



**Рисунок 7.2** – Принципиальная схема заземления нейтрали сети 35 кВ при включении резистора или ДГР в нейтраль ТЗН (ФМЗО)



**Рисунок 7.3 – Принципиальные схемы заземления нейтрали сети 6-10 кВ при включении резистора или ДГР в нейтраль ТЗН или ФМЗО**



**Рисунок 7.4 – Принципиальная схема заземления нейтрали сети 6-10 кВ при подключении ТЗН или ФМЗО к выводам обмотки силового трансформатора**

Описание ТЗН, ФМЗО, электрические схемы подключения резистора и справочные материалы приведены в приложении А.

ДГР не допускается подключать к трансформаторам:

- присоединенным к шинам через предохранители;
- имеющим соединение с сетью, емкостный ток которой компенсируется только по одной линии.

## **7.2 Определение мощности трансформатора для присоединения резистора или ДГР**

**7.2.1** Наиболее простым и недорогим решением является включение резистора или ДГР в нейтраль обмотки силового трансформатора, соединенной по схеме «звезда с нулем» (см. рисунок 7.1). В Белорусской энергосистеме в сетях среднего напряжения такая схема соединения обмоток силового

трансформатора может применяться только в сетях 35 кВ при условии выведенной на крышку бака трансформатора нейтрали обмотки 35 кВ.

Проверку силового трансформатора на термическую стойкость в режиме ОЗЗ производить не требуется.

**7.2.2** Наиболее распространенным способом включения резистора или ДГР в нейтраль сети является установка специального трансформатора ТЗН со схемой соединения обмоток  $Y0/\Delta-11$  (см. рисунки 7.2, 7.3) или ФМЗО. Мощность ТЗН (ФМЗО) выбирается в зависимости от типа заземления нейтрали сети.

**7.2.3** Для сетей с высокоомным заземлением нейтрали, в которых допустима длительная работа в режиме ОЗЗ мощность ТЗН (ФМЗО) выбирается по условию:

$$S_T \geq \frac{U^2}{3 \cdot k_{пер} \cdot R_N}, \text{ кВА}, \quad (7.1)$$

где  $k_{пер} = 1,0 \div 1,4$  – коэффициент перегрузки трансформатора.

**7.2.4** Для сетей с комбинированным заземлением нейтрали, в которых допустима длительная работа в режиме ОЗЗ мощность ТЗН (ФМЗО) выбирается по условию:

$$S_T \geq \frac{S_{номДГР}}{k_{пер}}, \text{ кВА}, \quad (7.2)$$

где  $k_{пер} = 1,0 \div 1,4$  – коэффициент перегрузки трансформатора,  
 $S_{номДГР}$  – номинальная мощность ДРГ.

**7.2.5** Для сетей с низкоомным заземлением нейтрали релейная защита которых обеспечивает немедленное отключение ОЗЗ мощность ТЗН (ФМЗО) выбирается по условию:

$$S_T \geq \frac{U^2}{3 \cdot k_{пер} \cdot R_N}, \text{ кВА}, \quad (7.3)$$

где  $k_{пер} = 1,4 \div 2$  – коэффициент перегрузки трансформатора.

## **8 Выбор средств защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ с резистивным и комбинированным заземлением нейтрали**

### **8.1 Общие принципы организации работы релейной защиты и автоматики**

**8.1.1** Низкоомное резистивное заземление нейтрали производится в случаях, когда режим ОЗЗ должен быть селективно отключен за минимально возможное время. Величина сопротивления низкоомного резистора должна выбираться из условия обеспечения селективного срабатывания релейной защиты при ОЗЗ на защищаемом присоединении. Защита также должна быть отстроена от броска тока замыкания на землю.

Высокоомное резистивное заземление нейтрали производится в тех случаях, когда сеть должна иметь возможность длительной работы в режиме ОЗЗ при этом емкостный ток ОЗЗ сети не превышает 8,9 А. Величина сопротивления резистора определяется, в основном, необходимостью снижения уровня перенапряжений и обеспечения величины тока ОЗЗ, достаточного для определения повреждённого присоединения при помощи токовых защит, работающих на сигнал или на отключение.

Комбинированное заземление нейтрали производится в тех случаях, когда сеть должна иметь возможность длительной работы в режиме ОЗЗ при этом длительный ток ОЗЗ в месте повреждения должен быть минимальным.

Величина сопротивления резистора в системе комбинированного заземления нейтрали выбирается таким образом, чтобы кратковременно (до 10 секунд) обеспечить величину тока ОЗЗ, достаточную для определения повреждённого присоединения при помощи токовых защит, работающих на сигнал или на отключение.

**8.1.2** Автоматика системы комбинированного заземления нейтрали должна обеспечивать автоматическую настройку ДГР плунжерного типа в резонанс с емкостью сети.

**8.1.3** При возникновении в сети ОЗЗ к обмотке управления ДГР с выдержкой времени (1-2 с) автоматически подключается ШР на время 5-10 секунд. ШР обеспечивает активную составляющую в токе ОЗЗ величиной 20-30 А, что достаточно для селективной работы простых токовых защит на отключение или на сигнал. По истечении 5-10 секунд резистор должен быть отключен.

**8.1.4** Защита от ОЗЗ в сети организуется на всех присоединениях. Устанавливается максимальная токовая защита нулевой последовательности с действием на отключение присоединений при низкоомном резистивном заземлении нейтрали и с действием на отключение или сигнал при комбинированном или высокоомном резистивном заземлении нейтрали.

Селективность защит нулевой последовательности присоединений определяется тем, что активная составляющая тока ОЗЗ протекает только через повреждённое присоединение, в то время как через остальные присоединения протекает только собственный ёмкостный ток нулевой последовательности, от которого защита должна быть надёжно отстроена.

При недостаточной чувствительности максимальной токовой защиты нулевой последовательности необходимо использовать более сложные виды защит.

**8.1.5** При отказе защит по отключению повреждённого присоединения должно быть выполнено резервное действие защит от ОЗЗ по отключению секции (ввода), к которой присоединено повреждённое присоединение. Должен быть выполнен запрет АВР.

**8.1.6** При повреждении на шинах или присоединении резистора или ДГР защита должна отключать секцию (ввод) с запретом АВР.

**8.1.7** Необходимо предусматривать резервную защиту от ОЗЗ на шинах или на присоединении резистора для предотвращения работы сети в режиме ОЗЗ и защиты резистора от термического повреждения при отказе основной защиты.

**8.1.8** При повреждении на присоединении резистора допускается действие защиты на отключение присоединения резистора с переводом сети в режим изолированной нейтрали в случае, если емкостной ток ОЗЗ сети не превышает 10А и для данной сети допустим режим длительного ОЗЗ. При этом на присоединении резистора должна быть установлена защита от ОЗЗ.

**8.1.9** Применение АПВ на кабельных линиях после отключения ОЗЗ допускается только при наличии специального обоснования. Применение АПВ на воздушных и смешанных линиях рекомендуется.

## 8.2 Релейная защита отходящих присоединений

**8.2.1** Защита, реагирующая на величину напряжения нулевой последовательности является самой простой защитой от ОЗЗ в сети 6-35 кВ с резистивным и комбинированным заземлением нейтрали.

По сравнению с токовыми защитами рассматриваемый вариант обладает существенными преимуществами – в напряжении нулевой последовательности содержится гораздо меньше высокочастотных составляющих и защита по напряжению нулевой последовательности лучше ведёт себя, например, при ОЗЗ, сопровождающихся перемежающимися и прерывистыми дугами.

Защита действует на отключение в случае, если имеется только одно присоединение, и используется для организации сигнализации замыкания на землю в сети или как пусковой орган токовых защит от ОЗЗ при наличии двух и более присоединений.

**8.2.2** Ненаправленная токовая защита нулевой последовательности с независимой времятоковой характеристикой, реагирующая на составляющую промышленной частоты тока нулевой последовательности является наиболее простой токовой защитой от ОЗЗ в сети 6-35 кВ с резистивным или комбинированным заземлением нейтрали. Такая защита реагирует на значение полного тока нулевой последовательности промышленной частоты (3I<sub>0</sub>). Селективность и чувствительность этой защиты обеспечивается схемой сети и выбором соответствующих параметров резистивного или комбинированного заземления и уставок РЗ. Время срабатывания защиты не зависит от величины тока замыкания, как показано на рисунке 8.1.

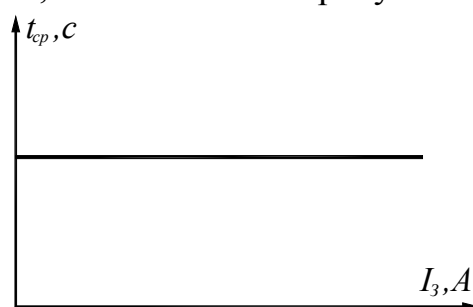


Рисунок 8.1 – Независимая характеристика времени срабатывания защиты от ОЗЗ

### 8.2.3 Ненаправленная токовая защита нулевой последовательности с обратнoзависимой времятоковой характеристикой, реагирующая на составляющую промышленной частоты тока нулевой последовательности.

Защита аналогична предыдущему типу защиты, но имеет более высокую селективность срабатывания. Повышение селективности срабатывания защиты обеспечивается за счет ее меньшего времени срабатывания  $t_{cp}$ , которое соответствует большему значению суммарного тока ОЗЗ по сравнению с собственными емкостными токами каждой из неповрежденных линий. После первоочередного отключения поврежденной линии защиты всех неповрежденных линий автоматически возвращаются в исходное положение. Время срабатывания защиты зависит от величины тока замыкания, как показано на рисунке 8.2.

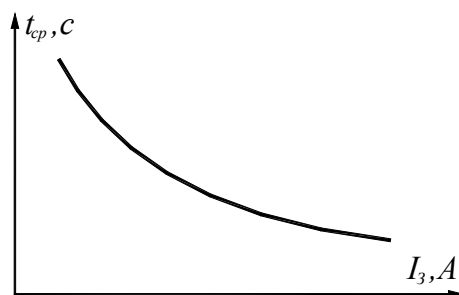


Рисунок 8.2 – Зависимая характеристика времени срабатывания защиты от ОЗЗ

Если эта защита от ОЗЗ должна действовать только на сигнал, то необходимо выполнить блокировки защит неповрежденных присоединений после срабатывания защиты поврежденного присоединения.

**8.2.4 Ненаправленная токовая защита нулевой последовательности, основанная на «относительном замере».** Такая защита запускается при ОЗЗ по признаку появления напряжения нулевой последовательности и сравнивает токи нулевой последовательности во всех присоединениях защищаемой системы или секции сборных шин. То присоединение, где основная гармоника тока нулевой последовательности больше, считается поврежденным. Такую защиту нельзя использовать при наличии в сети дугогасящего реактора или при малом количестве присоединений к сборным шинам (например, при двух присоединениях). При большом же количестве присоединениях защита работает весьма эффективно.

**8.2.5 Направленная защита, реагирующая на составляющие промышленной частоты тока и напряжения нулевой последовательности** применяется в сетях с высокоомным резистивным заземлением нейтрали и с очень небольшими значениями естественных емкостных токов, а также при низкоомном резистивном и комбинированном заземлении нейтрали и больших значениях собственных емкостных токов присоединений.

Преимуществами данного типа защиты являются меньший ток срабатывания защиты, который необходимо отстраивать не от собственного емкостного тока присоединения, а только от тока небаланса, и, как следствие, более высокая чувствительность. Отстройка от собственного емкостного тока

присоединения осуществляется по направлению мощности нулевой последовательности, которая на поврежденном присоединении направлена от линии к шинам, а на неповрежденных присоединениях – от шин в линию.

Также к этому классу защит относятся защиты дистанционного принципа действия.

### **8.2.6 Защита, реагирующая на составляющие тока и напряжения нулевой последовательности в переходном процессе ОЗЗ.**

Такие устройства целесообразно выполнять на основе двух принципов действия:

- сравнения амплитуд переходных токов в присоединениях защищаемого объекта. На основе данного принципа реализуются централизованные токовые устройства относительного замера;

- определения знака мгновенной мощности нулевой последовательности в начальной стадии переходного процесса. На основе данного принципа реализуются направленные централизованные и автономные (индивидуальные) устройства защиты от ОЗЗ.

## **8.3 Релейная защита шин и присоединения заземления нейтрали**

**8.3.1** Для защиты присоединения заземления нейтрали от междуфазных КЗ необходимо устанавливать комплект максимальной токовой защиты (РЗ-1, рисунки 8.3а, 8.3б) с действием на отключение вводного и секционного выключателей с запуском АВР секции при недопустимости работы сети в режиме изолированной нейтрали и с действием на отключение присоединения заземления нейтрали, если работа сети в режиме изолированной нейтрали допустима.

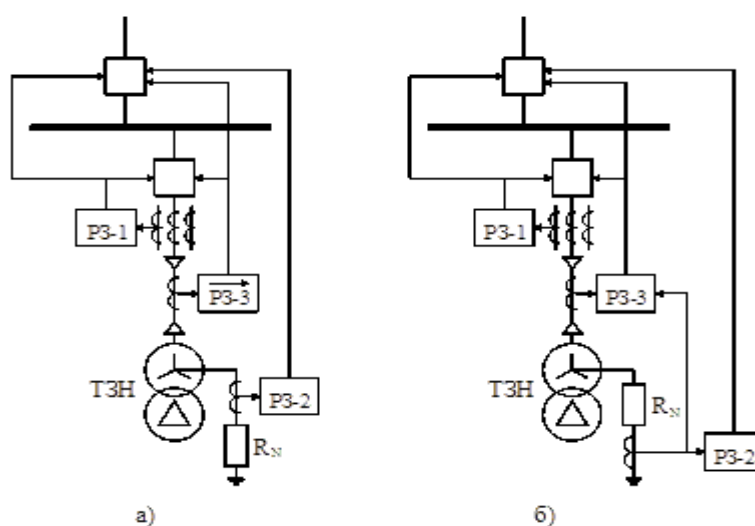
**8.3.2** Защита шин и присоединения резистора от замыканий на землю (РЗ-2, рисунки 8.3а, 8.3б) по цепям тока подключается к трансформатору тока, устанавливаемому в нейтрали. Эта защита обеспечивает отключение источника питания (вводного и секционного выключателей) при замыканиях на землю на шинах и присоединении заземляющего резистора, а также обеспечивает дальнейшее резервирование в случаях отказа выключателей или защит отходящих присоединений. Функционально данная защита, как правило, входит в состав защит вводного и секционного выключателей.

**8.3.3** При замыкании на землю на присоединении резистора допускается отключение только присоединения резистора, а не полное отключение секции с запретом АВР защитами резистора. В этом случае секция останется без повреждения в режиме изолированной нейтрали. Однако выполнение полноценной защиты присоединения резистора от замыканий на землю сопряжено с рядом трудностей. При повреждениях на присоединении резистора через трансформатор тока ячейки заземляющего резистора протекает суммарный емкостной ток сети, а при внешних замыканиях на землю – состав-

ляющая тока резистора. С учетом отмеченного целесообразно применение направленной защиты, реагирующей на емкостную составляющую тока (РЗ-3, рисунок 8.3а).

**Рисунок 8.3 – Схема подключения защиты присоединения резистора**

В случае, если величина емкостного тока сети не достаточна для выполнения селективной защиты присоединения резистора, для выполнения полноценной защиты целесообразно использование дифференциальной защиты нулевой последовательности, анализирующей токи в трансформаторе тока ячейки заземляющего резистора и трансформаторе тока, установленном в нейтрали (РЗ-3, рисунок 8.3б). При этом трансформатор тока в нейтрали должен быть установлен, как показано на рисунке 8.3б.



#### 8.4 Требования к релейной защите от замыканий на землю

**8.4.1** В сетях с резистивным заземлением нейтрали защита от ОЗЗ должна устанавливаться на всех отходящих присоединениях.

**8.4.2** Должна быть предусмотрена защита присоединения заземления нейтрали с действием на отключение секции (ввода) или присоединения заземления нейтрали (если допускается работа сети в режиме изолированной нейтрали).

**8.4.3** При низкоомном резистивном заземлении нейтрали необходимо использовать простые токовые защиты нулевой последовательности с действием на отключение поврежденного присоединения. Применение более сложных защит должно иметь соответствующее обоснование.

**8.4.4** При комбинированном и высокоомном резистивном заземлении нейтрали необходимо, по возможности, использовать наиболее простые то-



ковые защиты нулевой последовательности с действием на отключение поврежденного присоединения или на сигнал.

**8.4.5** Расчет токов для выбора уставок защит от ОЗЗ производится для металлических замыканий. Методика определения токов для выбора защит от замыканий на землю приведена в приложении Б.

**8.4.6** Выбор уставок защит от ОЗЗ осуществляется в соответствии с рекомендациями изготовителя и разработчика устройства защиты или с методикой выбора уставок защит, приведенной в приложении В.

**8.4.7** Коэффициент чувствительности определяется для минимального тока металлического замыкания и должен составлять:

$k_{\text{ч}} \geq 1,5$  – для защит кабельных и воздушных линий;

$k_{\text{ч}} \geq 2$  – для защит электродвигателей.

При необходимости учета переходного сопротивления в месте повреждения:

– для кабельных сетей с резистивным заземлением нейтрали принимают переходное сопротивление (сопротивление дуги) равным 30 Ом;

– для воздушных сетей с резистивным и комбинированным заземлением нейтрали определяется максимальное значение переходного сопротивления при выполнении требований к чувствительности защит.

## **8.5 Рекомендации по выбору типов релейной защиты**

**8.5.1** В зависимости от многих факторов, в числе которых: режим заземления нейтрали, схема сети, соотношение токов, требования к РЗА и пр. выбирается тип устанавливаемой на отходящем присоединении защиты.

На практике чаще всего защита от ОЗЗ организуется на беге терминала защиты отходящего присоединения, в котором предусмотрена соответствующая функция и вход для подключения ТТНП.

**8.5.2** При низкоомном резистивном заземлении нейтрали и комбинированном заземлении нейтрали с активной составляющей тока ОЗЗ порядка 30А и более и применении ТТНП достаточно простой ненаправленной токовой защиты с независимой времятоковой характеристикой. Обратозависимая времятоковая характеристика используется в случаях, когда необходимо уменьшить время отключения, в частности, вводного и секционного выключателя, которое может быть большим из-за «накапливания» ступеней селективности по мере приближения к источнику питания.

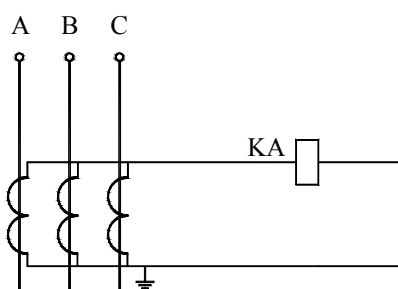
**8.5.3** При высокоомном резистивном заземлении необходимо использовать направленные токовые защиты. Они позволяют фиксировать первичный ток ОЗЗ от 0,5÷0,7 А и выше, который является достаточным для определения устойчивого ОЗЗ через большое переходное сопротивление.

**8.5.4** Защиты на присоединениях, питающих РП, рекомендуется выполнять направленными.

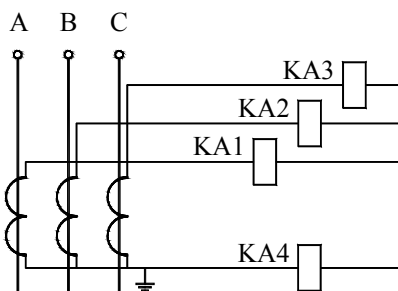
**8.5.5** Для электроснабжения ряда ответственных потребителей (метрополитен, котельные и пр.) распространена схема питания от двух параллельных кабельных линий, включаемых на одну секцию на питающей подстанции и на одну секцию в РП потребителя. Выключатели кабельных линий при этом нормально включены.

При замыкании на землю на одной из кабельных линий полный ток замыкания на землю распределяется между поврежденной и неповрежденной кабельными линиями обратно пропорционально их сопротивлениям до точки повреждения. С учетом отмеченного, усложняется организация селективных защит от замыканий на землю таких присоединений. При этом со стороны потребителя необходимо применение направленных защит при любых соотношениях между токами от ветви заземляющего резистора и емкостными токами сети. Со стороны источника питания также рекомендуется применение направленных защит от замыканий на землю. Однако, при небольших емкостных токах сети можно ограничиться применением ненаправленных защит. Кроме того, со стороны источника питания выполняется резервная защита от замыканий на землю, реагирующая на сумму токов трансформаторов тока двух параллельных линий. Также для защиты двух параллельных линий может быть использована поперечная дифференциальная токовая защита.

**8.5.6** Может возникнуть ситуация, когда на кабельной линии, выполненной однофазными кабелями большого сечения или с расщеплением фаз, невозможно установить ТТНП. В таком случае приходится использовать ФТНП, собранный на трех фазных трансформаторах тока (см. рисунки 8.6, 8.7).



**Рисунок 8.6** – Схема подключения реле тока через фильтр нулевой последовательности, выполненный на трех фазных трансформаторах тока



**Рисунок 8.7** – Схема подключения реле тока по схеме «звезда»

В таком случае требуется отстройка не только от собственного емкостного тока присоединения, но и от тока небаланса ФТНП (см. приложение Д).

Номинал резистора целесообразно выбирать исходя из условия, чтобы активный ток ОЗЗ не превышал максимальный нагрузочный ток самого мощного присоединения.

Однако из-за высоких значений токов междуфазных КЗ такая защита может не удовлетворять требованиям чувствительности. В таком случае целесообразно вводить выдержку времени большую на ступень селективности выдержки времени защиты от междуфазных КЗ и отстраивать защиту от небаланса, вызванного максимальным нагрузочным током.

## 8.6 Схемы подключения реле тока

**8.6.1** Наиболее распространенной является схема подключения реле тока к ТТНП, как показано на рисунке 8.4.

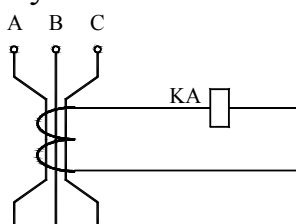


Рисунок 8.4 – Схема подключения реле тока к ТТНП

Обязательным условием правильной работы защиты нулевой последовательности является пропускание заземляющего шлейфа экрана и оболочки кабеля через ТТНП, если ТТНП устанавливается ниже кабельной разделки как показано на рисунке 8.5 а. Если ТТНП устанавливается выше кабельной разделки пропускать заземляющий шлейф экрана и оболочки кабеля через ТТНП не следует (рисунок 8.5 б).

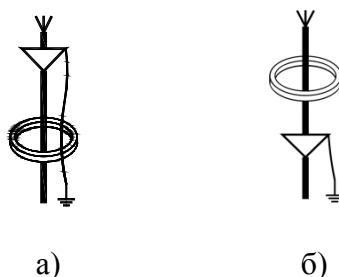


Рисунок 8.5 – Схема заземления экрана и оболочки кабеля

Подробнее про особенности монтажа ТТНП в [5].

Достоинствами данной схемы являются простота, низкая стоимость и высокая чувствительность; недостатками – необходимость выполнения кабельных вставок на отходящих ВЛ и ограничения по внутреннему диаметру ТТНП.

**8.6.2** При невозможности установки ТТНП для присоединений 6-35 кВ допускается производить замер тока устройствами РЗА в нулевом проводе при

соединении трансформаторов тока по схеме «звезда» (рисунок 8.7) или по схеме «фильтр тока нулевой последовательности» (рисунок 8.6).

Достоинствами этих схем являются простота и низкая стоимость (при подключении реле как на рисунке 8.7); недостатком – низкая чувствительность из-за больших значений небаланса фильтра.

## 9 Особенности организации работы сетей 6-35 кВ при резистивном и комбинированном заземлении нейтрали

### 9.1 Подстанция без связей по сети 6-35 кВ с другими подстанциями

**9.1.1** На вновь проектируемых ПС, как правило, используются кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, и присутствует необходимая степень резервирования и автоматизации распределительных электрических сетей, систем электроснабжения и технологических процессов. В такой сети ОЗЗ необходимо отключать за минимально возможное время. С этой целью необходима установка в нейтрали сети низкоомного резистора.

Если не требуется быстрого отключения ОЗЗ или оно невозможно, то применяется высокоомное резистивное заземление нейтрали при величинах токов замыкания меньше нормируемых [1] или комбинированное заземление нейтрали при величинах токов замыкания больше нормируемых [1].

Типовая схема сети 6-35 кВ строящейся или реконструируемой (с реконструкцией РУ 6-10 кВ) ПС представлена на рисунке 9.1.

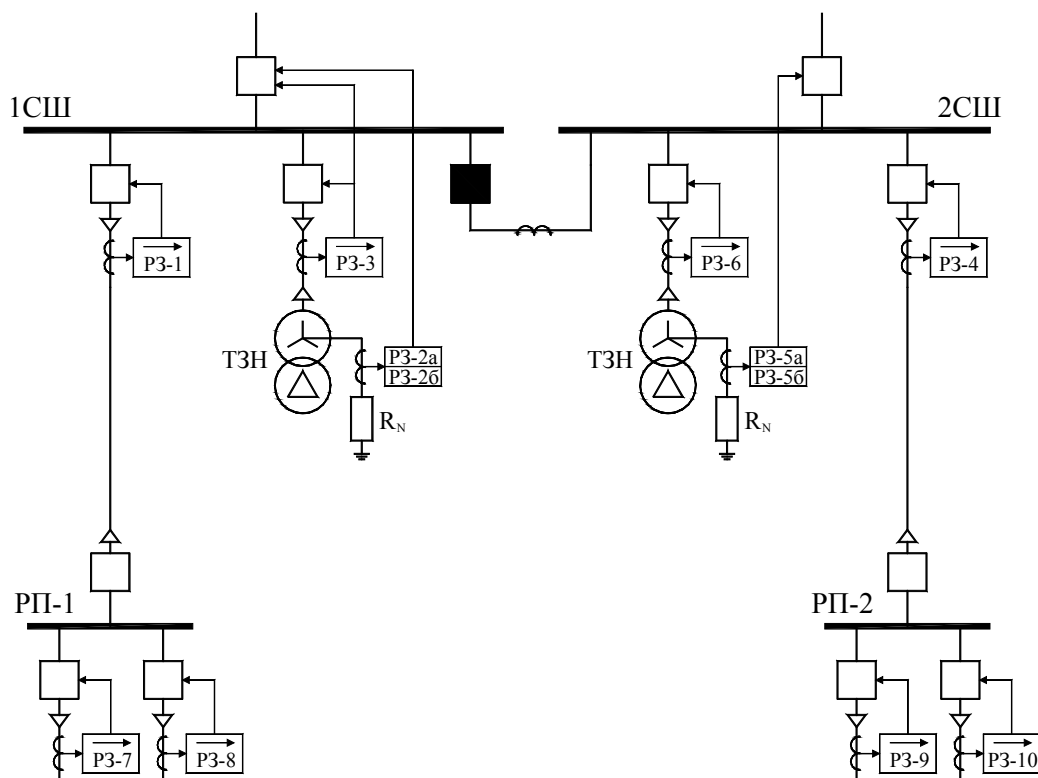


Рисунок 9.1 – Схема ПС в нормальном режиме

На каждой секции устанавливается ячейка заземляющего резистора.

**9.1.2** В нормальном режиме работы секционный выключатель отключен, и заземление нейтрали на каждой секции шин осуществляется через свой резистор (см. рисунок 9.1). При ОЗЗ в сети, например, на отходящих присоединениях РП-1, оно отключается защитами отходящих присоединений РП-1 РЗ-7 и РЗ-8 в случае, если таковые установлены. В противном случае ОЗЗ отключается комплектом защиты РЗ-1 с полным отключением РП-1. Выдержка времени защит РЗ-7 и РЗ-8 принимается равной нулю либо отстраивается от защит от ОЗЗ у потребителей при их наличии. Выдержка времени комплекта РЗ-1 принимается равной нулю при отсутствии защит на РП-1 или на ступень селективности больше максимальной выдержки времени защит РП-1.

При высокоомном резистивном заземлении нейтрали защиты РЗ-1, РЗ-7 и РЗ-8 выполняются направленными. При низкоомном резистивном заземлении, как правило, достаточно ненаправленной токовой защиты, однако для линий, питающих РП, рекомендуется использовать направленные защиты.

Для выбора параметров срабатывания направленных защит принимается, что в месте повреждения действует источник напряжения нулевой последовательности, и ток нулевой последовательности, создаваемый этим источником, протекает от места повреждения и замыкается через резистор в нейтрали сети и емкостное сопротивление сети. Поэтому при ОЗЗ на отходящем присоединении направление тока и мощности нулевой последовательности принимается из линии к шинам.

ОЗЗ на кабельной разделке и на шинах отключается защитой РЗ-2, которая является ненаправленной и реагирует на величину тока, протекающего через резистор. Защита должна действовать на отключения питания секции.

Защиту РЗ-2 целесообразно выполнять двухступенчатой с действием первой ступени на отключение секционного выключателя и выключателя линии связи, если по линии запрашивается другая ПС, а второй – вводного выключателя или выключателя линии связи, если данная линия связи является питающей.

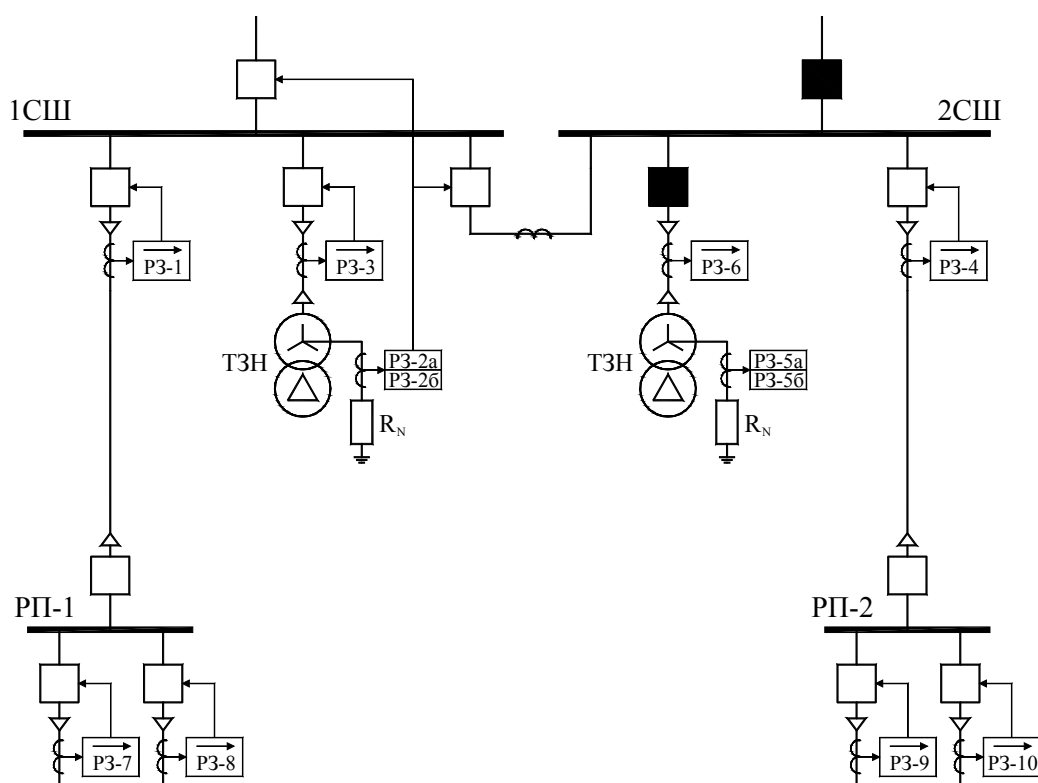
Для повышения надежности рекомендуется устанавливать резервную защиту от ОЗЗ на шинах, которая резервирует защиту РЗ-2. В связи с этим на рисунке 9.1 (далее по аналогии) обозначено: основная защита РЗ-2а, резервная защита – РЗ-2б.

При ОЗЗ на присоединении резистора комплект РЗ-3 отключает присоединение резистора с переходом сети в режим изолированной нейтрали, если такое допустимо. В случае, если переход сети в режим изолированной нейтрали не допустим, комплект РЗ-3 отключает присоединение резистора и вводной выключатель, а также запускает АВР секции.

**9.1.3** В аварийном или ремонтном режиме при питании обеих секций 6-35 кВ от одного трансформатора (см. рисунок 9.2) в работе оставляют только резистор, подключенный к секции, на которую подается питание. К примеру, при отключении ввода 2СШ питание потребителей 2СШ осуществляется через секционную перемычку, и резистор, подключенный к 2СШ, необходимо

отключать для сохранения селективности защит от ОЗЗ. При этом защита РЗ-6 не действует, т.к. присоединение резистора отключено от шин, защита РЗ-5 не действует. Уставки защит отходящих присоединений 2СШ остаются без изменений.

Защита от ОЗЗ на кабельной разделке и на шинах 2СШ осуществляется первой ступенью защиты РЗ-2а с действием на отключение секционного выключателя с выдержкой времени большей на ступень селективности максимальной выдержки времени отходящих присоединений 2СШ. При действии АВР секции 2СШ необходимо выполнять ускорение первой ступени защиты РЗ-2а. Для ремонтного режима при включенном секционном выключателе АВР выводится автоматически или переключающими устройствами.



**Рисунок 9.2 – Схема ПК в аварийном и ремонтном режиме**

Защита от ОЗЗ на кабельной разделке и на шинах 1СШ осуществляется второй ступенью защиты РЗ-2а с действием на отключение вводного выключателя 1СШ с выдержкой времени большей на ступень селективности большей из выдержек времени отключения присоединений 1СШ и секционного выключателя.

После срабатывания защиты РЗ-2а необходимо выполнить запрет АВР.

**9.1.4** При поэтапной реконструкции ПК (см. рисунок 9.3) допускается кратковременная работа секций с различными режимами заземления нейтрали только на период реконструкции при этом преимущество имеет режим с отключением поврежденного присоединения.

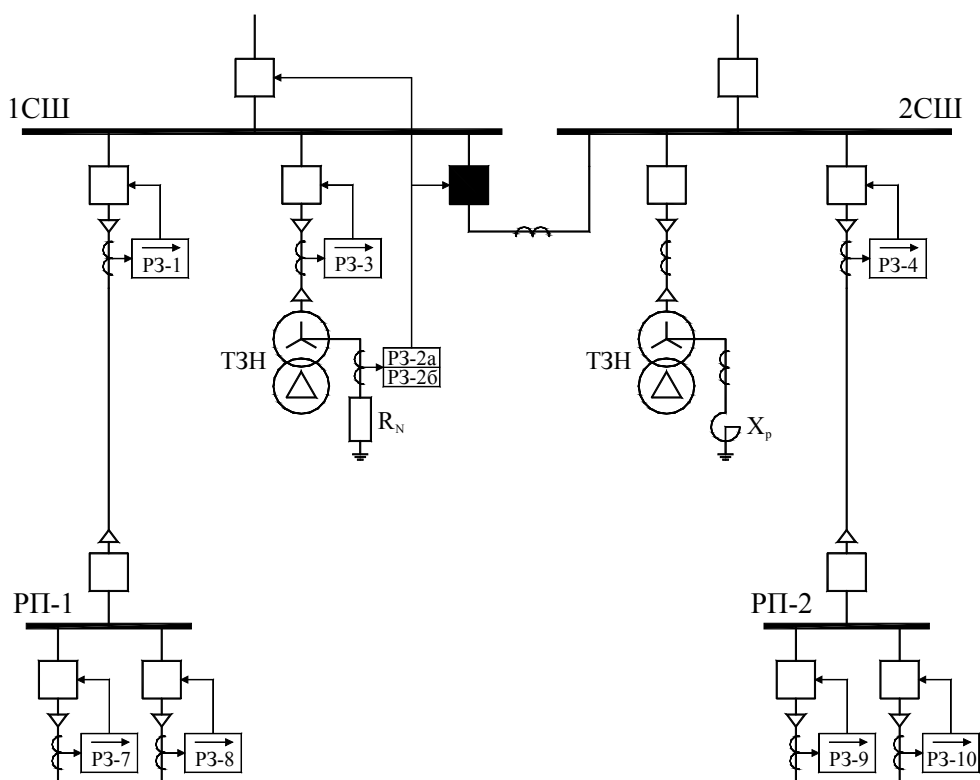
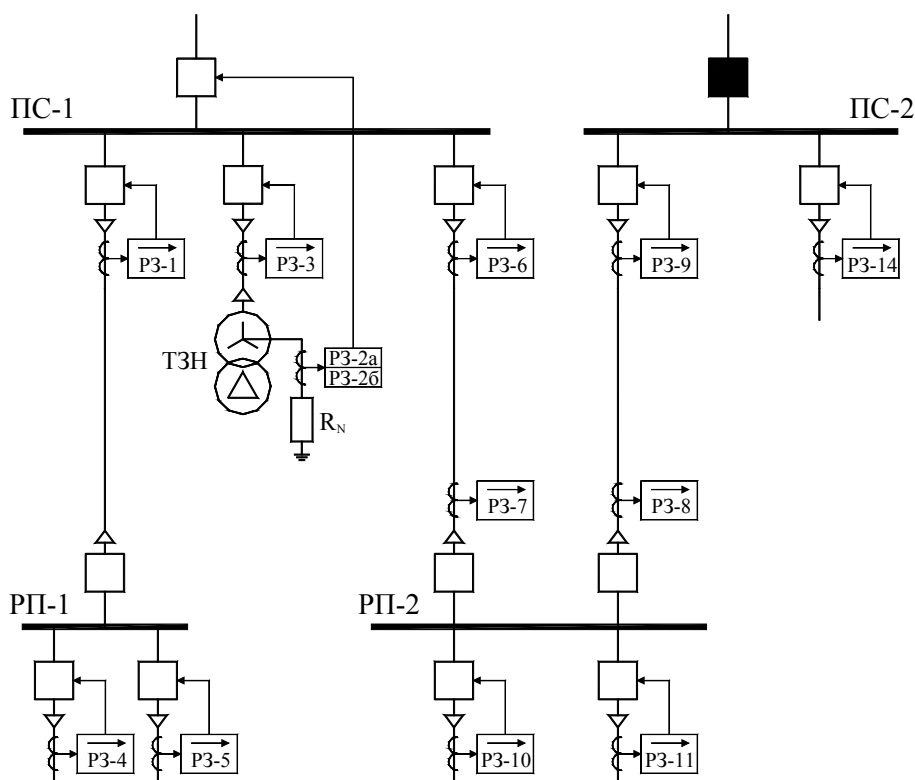


Рисунок 9.3 – Схема ПС при поэтапной реконструкции

## 9.2 Подстанция, имеющая связь по сети 6-35 кВ с другими подстанциями

**9.2.1** В случае, если от шин ПС с низкоомным резистивным заземлением в аварийном режиме запитывается ПС с изолированной (с отключенным резистором) или компенсированной нейтралью (см. рисунок 9.4), при ОЗЗ в сети ПС-2 должна в случае отсутствия или несрабатывания защит на ПС-2 срабатывать защита P3-8 при наличии защит на РП-2 или защита P3-6 при их отсутствии. При этом ПС-1 возвращается в нормальный режим работы, а ПС-2 теряет питание.

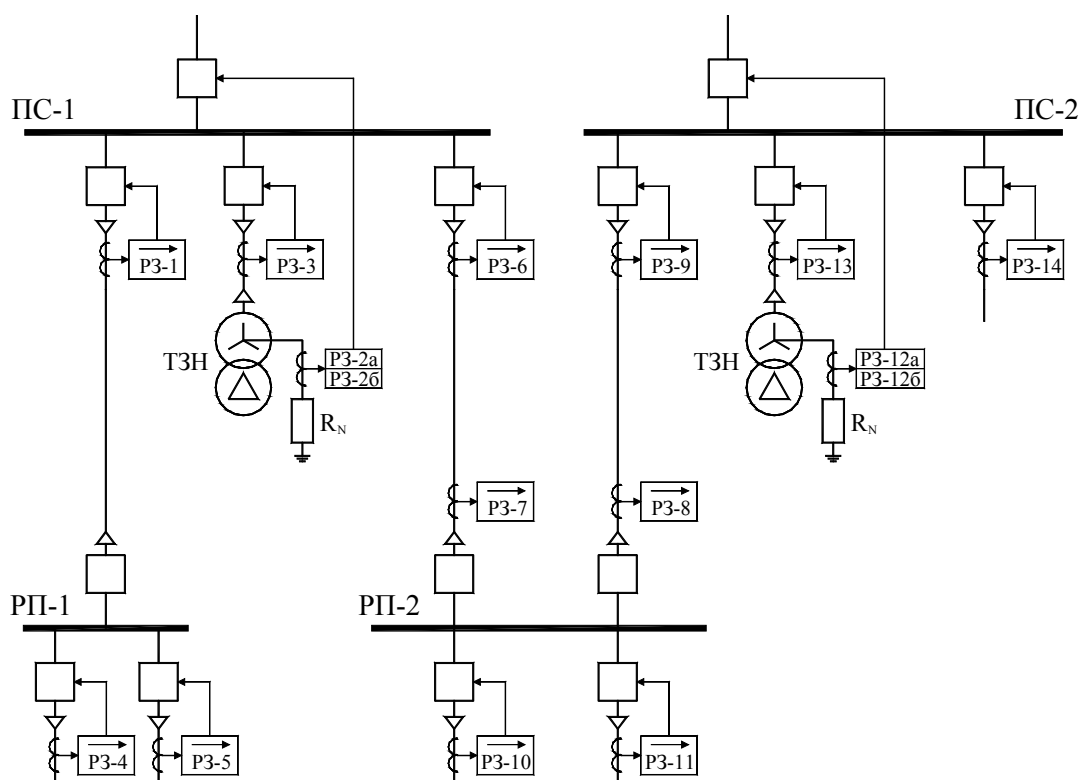


**Рисунок 9.4 – Схема питания ПС-2 от ПС-1**

При наличии защит на РП-2 выдержка времени P3-6 должна быть согласована с P3-8, P3-10 и P3-11.

**9.2.2** В случае, если подстанция объединяется по сети 6-35 кВ на параллельную работу с другой подстанцией с таким же типом резистивного заземления нейтрали (см. рисунок 9.5), то необходима установка на линии связи направленных токовых защит. Расчет уставок P3-6, P3-7, P3-8 и P3-9 выполняется как для линий с двухсторонним питанием.





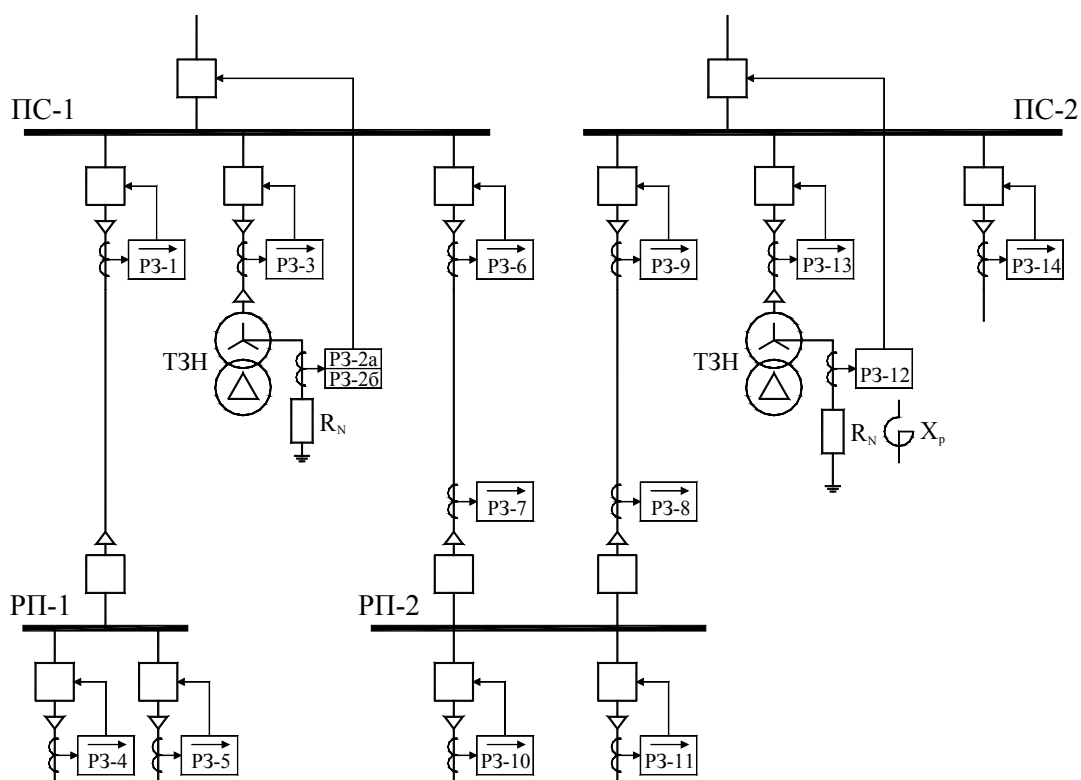
**Рисунок 9.5 – Схема параллельной работы ПС-1 и ПС-2 с одинаковым режимом заземления нейтрали**

Первая ступень защиты PЗ-2 должна действовать на отключение выключателя линии связи (резервировать защиту PЗ-6), вторая – на вводной выключатель.

Работа сети с двумя резисторами должна быть обоснована расчетами. В противном случае в работе необходимо оставлять только один резистор.

**9.2.3** При объединении на параллельную работу ПС-1 с низкоомным резистивным заземлением нейтрали и ПС-2 с высокоомным резистивным или резонансным заземлением нейтрали (см. рисунок 9.6) необходимо либо переводить защиты ПС-2 на отключение поврежденного присоединения, либо отключать линию связи при фиксации ОЗЗ на одной из ПС.

При наличии защит на РП-2 (PЗ-7, PЗ-8) она остается в работе при ОЗЗ на одной из ПС, при отсутствии защит – отключается защитами PЗ-6 и PЗ-9.



**Рисунок 9.6 – Схема параллельной работы ПС-1 и ПС-2 с разными режимами заземления нейтралей**

### **9.3 Защита от замыканий на землю параллельных кабельных линий**

**9.3.1** Для электроснабжения ряда ответственных потребителей (метрополитен, котельные и пр.) распространена схема питания от двух параллельных кабельных линий, включаемых на одну секцию на питающей подстанции и на одну секцию в РП потребителя. Выключатели кабельных линий при этом нормально включены. Данный вопрос подробно рассмотрен в [6].

Схема питания для данного случая приведена на рисунке 9.7.

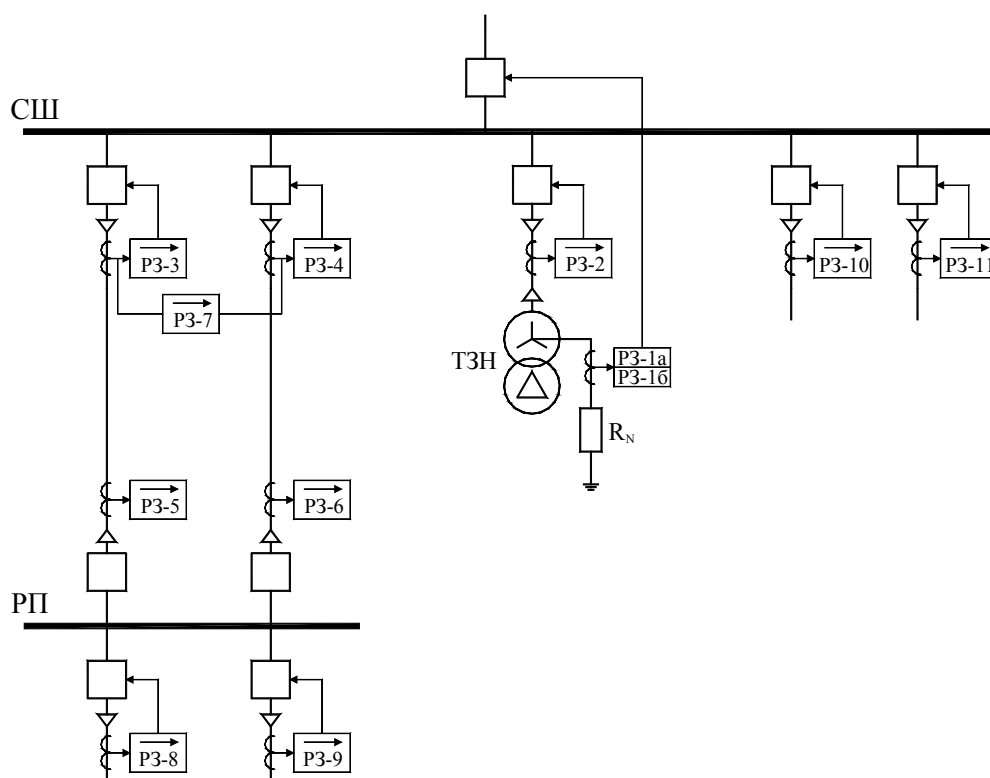


Рисунок 9.7 – Схема питания по параллельным кабельным линиям

**9.3.2** При замыкании на землю на одной из кабельных линий полный ток замыкания на землю распределяется между поврежденной и неповрежденной кабельными линиями обратно пропорционально их сопротивлениям до точки повреждения. С учетом отмеченного, усложняется организация селективных защит от замыканий на землю таких присоединений. При этом необходимо применение направленных защит P3-3, P3-4, P3-5 и P3-6. При небольших емкостных токах сети допускается применение ненаправленных защит со стороны питания (P3-3 и P3-4), что должно обосновываться расчетом. Кроме того, со стороны источника питания выполняется резервная защита от замыканий на землю (P3-7), реагирующая на сумму токов трансформаторов тока каждой линии.

**9.3.3** По своему принципу действия направленные токовые защиты со стороны РП имеют «мертвую» зону. При замыканиях на землю в зоне действия защиты повреждения со стороны потребителя отключаются с нулевой выдержкой времени. При замыканиях на землю в «мертвой» зоне защита первоначально не запускается. После того как аналогичная защита со стороны питающей подстанции отключит повреждение, через рассматриваемую защиту начнет протекать полный ток, она запустится и произведет отключение своего выключателя. Таким образом, при повреждениях в «мертвой» зоне работа защиты со стороны потребителя «замедлится» на выдержки времени работы защит со стороны питания и отключения выключателя со стороны источника питания. Здесь также отметим, что нами рассматриваются металлические за-

мыкания на землю. При замыканиях через переходное сопротивление «мертвая» зона защиты будет расширяться.

**9.3.4** Со стороны источника питания защиты кабельных линий РЗ-3 и РЗ-4 также выполняются направленными и реагирующими на активную составляющую тока замыкания на землю. При соответствующем обосновании допускается выполнение защит ненаправленными.

При выборе уставки срабатывания по току данной защиты необходимо отстроиться от направленной защиты смежной кабельной линии, установленной со стороны потребителя. В этом случае защита охватывает «свою» кабельную линию и частично захватывает смежную кабельную линию (защита с расширенной зоной). Возможно также выполнение защиты охватывающей только часть своей кабельной линии (защита с укороченной зоной). Однако в последнем случае снижается чувствительность защиты при больших переходных сопротивлениях в месте повреждения. «Мертвые» зоны защит со стороны питания и потребителя могут перекрываться и селективного отключения кабельной линии в этом случае не обеспечивается. С учетом изложенного предпочтительней исполнение защиты с расширенной зоной.

**9.3.5** Логика работы защиты со стороны питания и потребителя следующая:

- при замыкании на землю в зоне действия защит, установленных со стороны РП потребителя, происходит отключение выключателя кабельной линии со стороны РП с нулевой выдержкой времени, а отключение выключателя со стороны питания происходит с выдержкой времени защит, установленных со стороны источника питания;

- при замыкании на землю в «мертвой» зоне защит, установленных со стороны РП потребителя, происходит отключение выключателя со стороны питания с выдержкой времени защит, установленных со стороны источника питания, а отключение выключателя со стороны РП происходит после перераспределения тока замыкания на землю и срабатывания защит со стороны РП (т.е. «мертвая» зона защит со стороны потребителя устраняется после отключения выключателя поврежденной кабельной линии со стороны источника питания).

**9.3.6** Отказ одной из рассмотренных защит при замыкании на землю на кабельной линии может привести к отключению вводного выключателя питающей подстанции (например, отказ защит со стороны питания при замыкании на землю в «мертвой» зоне защит со стороны потребителя). Такое нежелательное действие избегается применением защиты РЗ-7, реагирующей на сумму токов трансформаторов тока параллельных линий. Ток в этой защите будет равен полному току замыкания на землю.

Тогда уставка этой защиты по току выбирается, как и для обычного отходящего присоединения. Выдержка времени выбирается на ступень селективности больше, чем выдержка защит от замыканий на землю со стороны источника питания.

Защита действует на отключение обоих выключателей кабельных линий со стороны источника питания и тем самым исключается нежелательное отключение ввода источника питания при отказе направленных защит.

#### 9.4 Питание двух секций шин от одной обмотки силового трансформатора

**9.4.1** В случае, если номинальный ток вторичной обмотки силового трансформатора превосходит номинальный ток вводной ячейки РУ 6-10 кВ, применяется параллельное питание двух секций шин от одной обмотки силового трансформатора каждой через свой вводной выключатель, как показано на рисунке 9.8.

На ПС с большой нагрузкой может применяться схема с двумя силовыми трансформаторами с расщепленной обмоткой низшего напряжения и восемью секциями шин 6-10 кВ.

Организация резистивного заземления нейтрали в данном случае может быть организовано тремя способами:

- установка резисторов на каждой секции шин 6-10 кВ с одновременной работой обоих резисторов (рисунок 9.9);
- установка резисторов на каждой секции шин 6-10 кВ с одновременной работой одного резистора на две секции шин (рисунок 9.10);
- установка одного резистора на выводах обмотки силового трансформатора (рисунок 9.11).

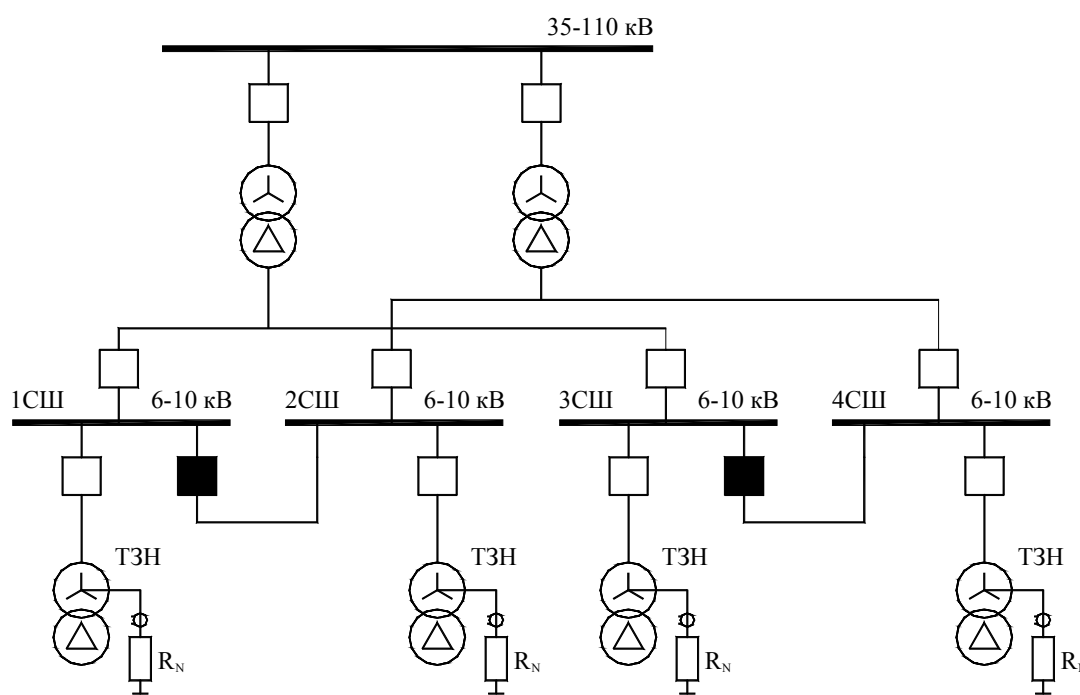
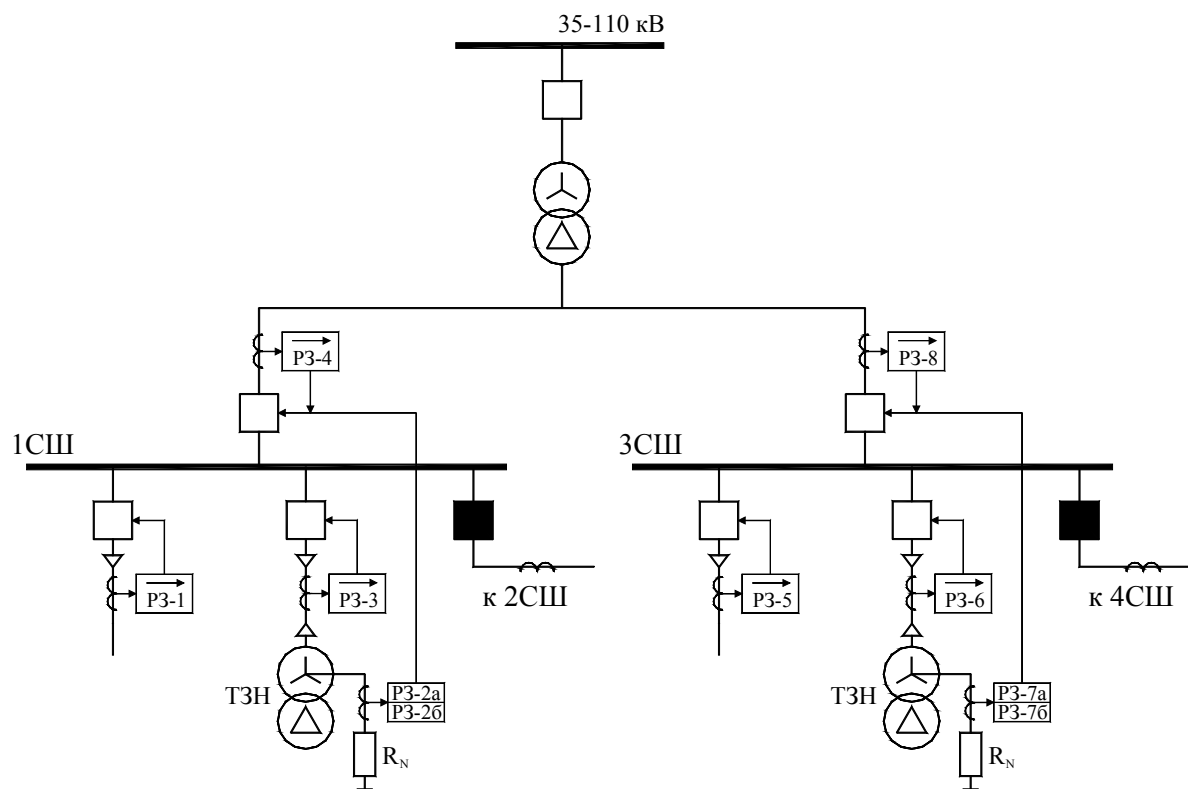


Рисунок 9.8 – Схема питания двух секций от одной обмотки силового трансформатора

**9.4.2** Одновременная работа резисторов на обеих секциях шин (см. рисунок 9.9).

Такой режим имеет следующие требования:

- величина резистора выбирается исходя из возможности автономной работы каждой секции шин;
- уставки защит отходящих присоединений выбираются по величине тока ОЗЗ при автономной работе секции, к которой подключено присоединение, т.е. при работе одного резистора;
- должны выполняться условия селективности как при работе одного резистора, так и при работе двух резисторов;
- на вводах устанавливаются направленные токовые защиты от ОЗЗ.



**Рисунок 9.9 – Схема питания двух секций от одной обмотки силового трансформатора с одновременной работой резисторов на обеих секциях**

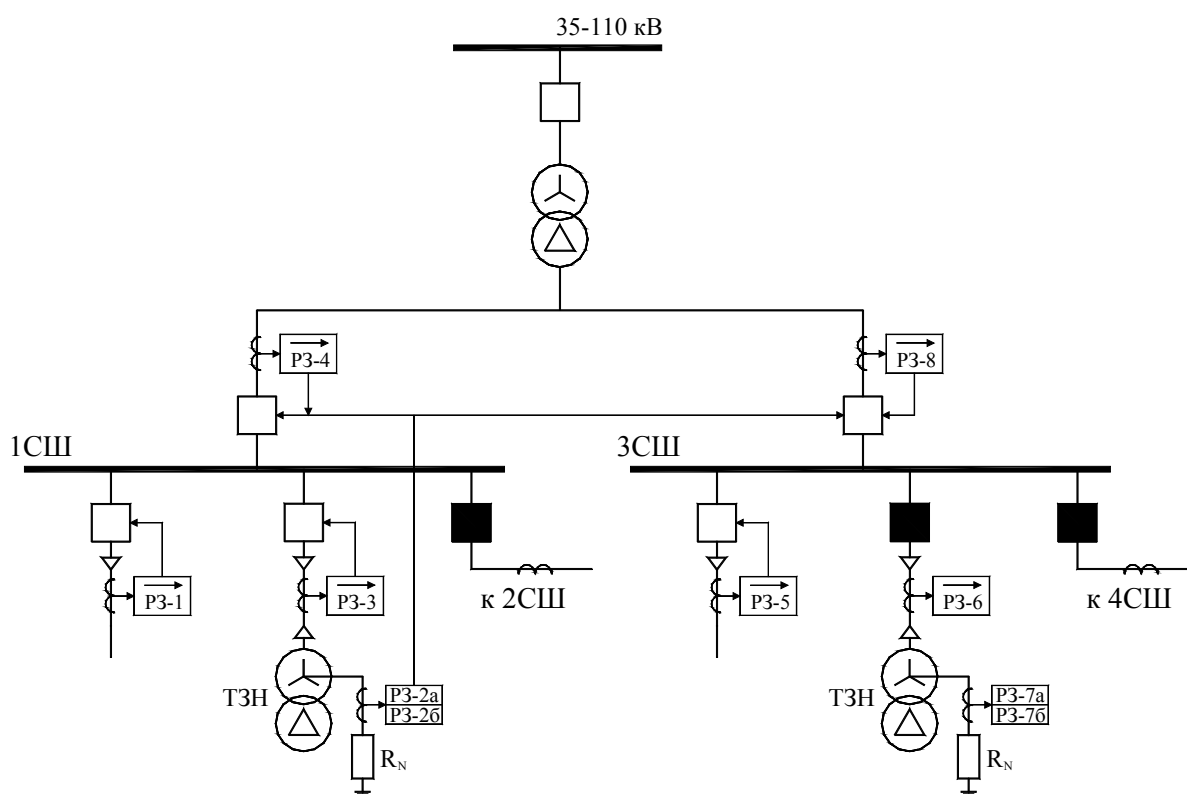
При ОЗЗ на присоединении 1СШ должна действовать защита присоединения P3-1. При отказе выключателя или защиты P3-1 поврежденного присоединения и при повреждении на 1СШ или присоединении резистора 1СШ отключается ввод 1СШ защитой P3-4, которая срабатывает при направлении мощности нулевой последовательности от 1СШ к 3СШ, с выдержкой времени на ступень селективности больше максимальной выдержки времени защит от ОЗЗ секционного выключателя и отходящих присоединений 1СШ. Должен быть выполнен запрет АВР секции 1СШ.

При ОЗЗ на ошиновке силового трансформатора защиты P3-4 и P3-8 не действуют, и повреждение отключается защитами P3-2 и P3-7, которые действуют на отключение вводных выключателей (секционных выключателей) своих секций, с выдержкой времени на ступень селективности больше выдержек времени защит P3-4 и P3-8. При этом двухобмоточный трансформатор

должен быть отключен со стороны высшего напряжения, трехобмоточный трансформатор (с расщепленной обмоткой низшего напряжения) может оставаться в работе до вывода в ремонт.

После отключения вводных выключателей должен срабатывать АВР секций 1СШ и 3СШ. При действии АВР 1СШ и 3СШ целесообразно вводить ускорение защит от ОЗЗ 2СШ и 4СШ.

**9.4.3 Одновременная работа одного резистора на две секции шин** (см. рисунок 9.10).



**Рисунок 9.10 – Схема питания двух секций от одной обмотки силового трансформатора с работой одного резистора на две секции шин**

Величина каждого резистора выбирается исходя из работы резистора на две секции шин. На вводах требуется установка направленных защит.

При ОЗЗ на присоединении 3СШ должна действовать защита присоединения РЗ-5. При отказе выключателя или защиты РЗ-5 поврежденного присоединения и при повреждении на 3СШ отключается ввод 3СШ защитой РЗ-8, которая срабатывает при направлении мощности нулевой последовательности от 3СШ к 1СШ, с выдержкой времени на ступень селективности больше максимальной выдержки времени защит от ОЗЗ секционного выключателя и отходящих присоединений 3СШ с запретом АВР.

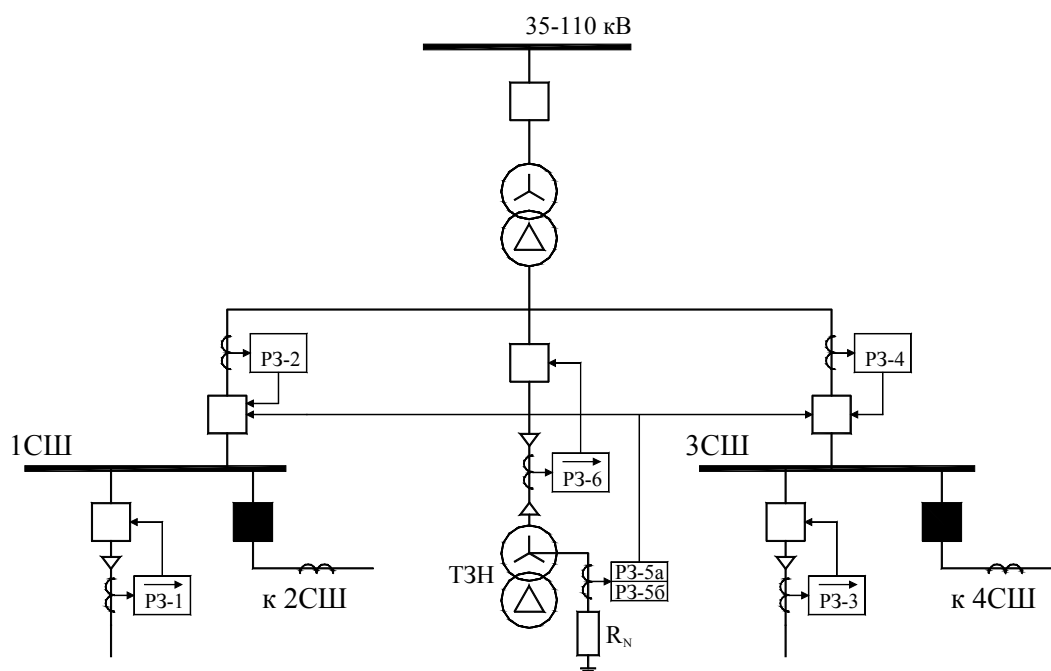
При ОЗЗ на присоединении 1СШ должна действовать защита присоединения РЗ-1. При отказе выключателя или защиты РЗ-1 поврежденного присоединения и при повреждении на 1СШ отключается ввод 1СШ защитой РЗ-4, которая срабатывает при направлении мощности нулевой последовательности от 1СШ к 3СШ, с выдержкой времени на ступень селективности больше мак-

симальной выдержки времени защит от ОЗЗ секционного выключателя и отходящих присоединений 1СШ. После отключения ввода 1СШ должен быть выполнен АВР резистора 3СШ.

При ОЗЗ на ошиновке силового трансформатора защиты РЗ-4 и РЗ-8 не действуют, и повреждение отключается защитой РЗ-2, которая действует на отключение вводных выключателей 1СШ и 3СШ, с выдержкой времени на ступень селективности больше выдержек времени защит РЗ-4 и РЗ-8. При этом двухобмоточный трансформатор должен быть отключен со стороны высшего напряжения, трехобмоточный трансформатор (с расщепленной обмоткой низшего напряжения) может оставаться в работе до вывода в ремонт.

После отключения вводных выключателей должен срабатывать АВР секций 1СШ и 3СШ. При действии АВР 1СШ и 3СШ целесообразно вводить ускорение защит от ОЗЗ 2СШ и 4СШ.

#### 9.4.4 Установка резистора на выводах обмотки силового трансформатора (см. рисунок 9.11).



**Рисунок 9.11 – Схема питания двух секций от одной обмотки силового трансформатора с установкой резистора на выводах обмотки силового трансформатора**

Применение такой схемы не целесообразно при больших величинах емкостного тока сети из-за сложности обеспечения чувствительности защит РЗ-2 и РЗ-4, ток срабатывания которых необходимо отстраивать от емкостного тока секции. Применение такой схемы должно быть обосновано расчетами. При использовании данной схемы резистор должен быть подключен через ФМЗО.

При ОЗЗ на присоединении 1СШ должна действовать защита присоединения РЗ-1. При отказе выключателя или защиты РЗ-1 поврежденного присоединения и при повреждении на 1СШ отключается ввод 1СШ защитой РЗ-2, с выдержкой времени на ступень селективности больше максимальной выдержки



ки времени защит от ОЗЗ секционного выключателя и отходящих присоединений 1СШ. Должен быть выполнен запрет АВР секции 1 СШ.

При ОЗЗ на ошиновке силового трансформатора защиты РЗ-2 и РЗ-4 не должны действовать, и повреждение отключается защитой РЗ-5, которая действует на отключение вводных выключателей 1СШ и 3СШ, с выдержкой времени на ступень селективности больше выдержек времени защит РЗ-2 и РЗ-4. При этом двухобмоточный трансформатор должен быть отключен со стороны высшего напряжения, трехобмоточный трансформатор (с расщепленной обмоткой низшего напряжения) может оставаться в работе до вывода в ремонт.

При ОЗЗ на присоединении резистора защиты РЗ-2 и РЗ-4 не действуют, и повреждение отключается защитой РЗ-6, которая действует на отключение вводных выключателей 1СШ и 3СШ, с выдержкой времени на ступень селективности больше выдержки времени защиты РЗ-5. При этом двухобмоточный трансформатор должен быть отключен со стороны высшего напряжения, трехобмоточный трансформатор (с расщепленной обмоткой низшего напряжения) может оставаться в работе до вывода в ремонт.

После отключения вводных выключателей должен срабатывать АВР секций 1СШ и 3СШ. При действии АВР 1СШ и 3СШ целесообразно вводить ускорение защит от ОЗЗ 2СШ и 4СШ.

## Приложение А (справочное)

### Технические характеристики оборудования заземления нейтрали

#### А.1 Резисторы для заземления нейтрали

**А.1.1** Выпускаются следующие марки резисторов: РШ-2 (РФ), РНВ (РФ), РЗ (РФ), резисторы фирм Schniewindt (Германия) и AREVA (Германия) NER (РФ).

**А.1.2** Производственная база многих заводов позволяет делать на заказ резисторы любого номинала с требуемыми параметрами, в том числе с требуемой термической стойкостью.

**А.1.3** Резистор типа РШ-2 и элементы, из которых он комплектуется, имеют параметры, приведенные в таблице А.1

**Таблица А.1 – Параметры бетэловых резисторов типа РШ-2**

Наименование параметра	Значение	
	резистор	элемент
Сопrotивление при приложении напряжения 220 В и температуре 20 °С, Ом	100 ± 10	200 ± 20
Номинальное напряжение, кВ	6, 10	6, 10
Номинальный ток, А	60	30
Длительность протекания номинального тока, с	2	2
Минимальный интервал между двумя замыканиями на землю, ч	0,3	0,3
Количество замыканий в год, не более	12	12
Максимальный ток термического воздействия при длительности не более двух часов, А	2,5	2,5

Данные по единичным бетэловым резисторам типа РНВ приведены в таблице А.2.

**Таблица А.2 – Параметры единичных бетэловых резисторов типа РНВ**

Время протекания тока, с	Допустимый ток, А		Время протекания тока, с	Допустимый ток, А	
	R <sub>p</sub> =500 Ом	R <sub>p</sub> =1000 Ом		R <sub>p</sub> =500 Ом	R <sub>p</sub> =1000 Ом
2	20	14	300	1,6	1,2
10	9,0	6,0	600	1,2	0,8
30	5,0	3,5	1800	0,7	0,5

60	3,5	2,5	3600	0,5	0,4
120	2,5	1,8	7200	0,5	0,4

Данные по резисторам производства фирмы Schniewindt (Германия) приведены в таблице А.3.

**Таблице А.3 – Параметры резистора для заземления нейтрали в сети 10 кВ типа Schniewindt**

Номинальное напряжение, кВ	Сопротивление резистора, Ом	Номинальный кратковременный ток, А	Время протекания номинального кратковременного тока, с
6	100	40	2
6	1800	2*	-
10	50	116	2
10	75	77	2
10	100	60	2

\* Для высокоомного резистора нормируемым параметром является длительно допустимый ток

Данные по резисторам производства фирмы AREVA (Германия) приведены в таблице А.4.

**Таблице А.4 – Параметры резистора для заземления нейтрали в сети 10 кВ типа AREVA**

Наименование параметра	Значение
Сопротивление при 20 °С	100 Ом
Длительный ток	4 А
Кратковременный ток	60 А/2 сек.
Номинальное напряжение	10 кВ
Класс защиты	IP 20
Исполнение резистора	элементы встроены в стальной корпус
Присоединения	подводка кабеля через нижнюю часть
Размеры (ВхLxH)	1000 х 800 х 1800 мм

Резисторы типа РЗ рассчитаны на время воздействия наибольшего фазного напряжения до 6 часов, что позволяет обходиться без автоматики и защиты для его отключения.

Общие технические характеристики единичных резисторов РЗ:

- номинальное напряжение сети – 3, 6, 10, 35 кВ;
- номинальная мощность – до 200 кВт;
- сопротивление – 100÷10 000 Ом;
- время работы в режиме ОЗЗ – не более 6 час.

Параметры наиболее часто используемых резисторов типа РЗ приведены в таблице А.5.

**Таблица А.5 – Параметры резисторов типа РЗ**

Типы единичных резисторов	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность, кВт	Сопротивление резистора, Ом
РЗ-1700-10-6	6	10	1700
РЗ-1000-40-10	10	40	1000
РЗ-1000-12-6	6	12	1000
РЗ-500-24-6	6	24	500
РЗ-8000-51-35	35	51	8000
РЗ-4000-102-35	35	102	4000

Общие технические характеристики единичных резисторов NER:

- номинальное напряжение сети 3, 6, 10, 15, 20, 35 кВ;
- номинальный ток от 1 до 2000 А (в том числе нестандартные значения по заказу потребителя);
- время работы в режиме с однофазным замыканием в сети от нескольких секунд до неограниченно длительного;
- исполнение для наружной установки;

Параметры наиболее часто используемых резисторов типа NER приведены в таблице А.6.

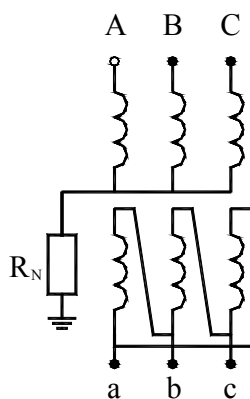
Таблица А.6 – Параметры резисторов типа NER

Тип резистора	Номинальное сопротивление, Ом	Номинальная мощность, кВт	Номинальное напряжение сети, кВ	Номинальный ток резистора, А	Допустимое время протекания номинального тока, с
NER-9-1440-6	9	1440	6	400	5 (10)
NER-18-727-6	18	727	6	200	5 (10)
NER-36-363-6	36	363	6	100	5 (10)
NER-91-146-6	91	146	6	40	5 (10)
NER-300-40-6	300	40	6	11,5	длительно
NER-500-24-6	500	24	6	7	длительно
NER-700-18-6	700	18	6	5	длительно
NER-1000-12-6	1000	12	6	3,5	длительно
NER-1700-7-6	1700	7	6	2	длительно
NER-2000-7-6	2000	6	6	1,7	длительно
NER-14,4-2310-10	14,4	2310	10	400	5 (10)
NER-29-1160-10	29	1160	10	200	5 (10)
NER-58-580-10	58	580	10	100	5 (10)
NER-150-240-10	150	240	10	40	5 (10)
NER-500-67-10	500	67	10	11,5	длительно
NER-800-42-10	800	42	10	7	длительно
NER-1000-34-10	1000	34	10	5,8	длительно
NER-3000-12-10	3000	12	10	2	длительно
NER-11,5-11500-20	11,5	11500	20	1000	5 (10)
NER-23-5750-20	23	5750	20	500	5 (10)
NER-58-2320-20	58	2320	20	200	5 (10)
NER-50-8000-35	50	8000	35	400	5 (10)
NER-100-4000-35	100	4000	35	200	5 (10)
NER-200-2000-35	200	2000	35	100	5 (10)
NER-1000-408-35	1000	408	35	20	длительно
NER-2000-204-35	2000	204	35	10	длительно
NER-3000-136-35	3000	136	35	6,7	длительно
NER-4000-102-35	4000	102	35	5	длительно

## А.2 Трансформаторы для подключения резисторов

В качестве ТЗН используются ненагруженные силовые трансформаторы или ТСН со схемой соединения обмоток  $Y_0/\Delta$  (см. рисунок А.1).

Схема подключения резистора в нейтраль ТЗН и ТСН используется для низкоомного и высокоомного резистивного заземления нейтрали. При подключении резистора в нейтраль ТСН необходимо производить проверку ТСН на термическую стойкость в режиме ОЗЗ.



**Рисунок А.1 – Схема подключения резистора в нейтраль ТЗН**

Параметры трансформаторов, необходимые для выбора ТЗН приведены в таблице А.7.

**Таблица А.7 – Параметры трансформаторов 10/0,4(0,23) кВ и 6/0,4(0,23) кВ**

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВА	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Напряжение КЗ, %	Активное сопротивление R, мОм	Индуктивное сопротивление X, мОм
ТМ-25/6	25	6	2,4	4,5	39,6	54,8
ТМ-40/6	40	6	3,9	4,5	19,8	35,3
ТМ-63/6	63	6,3	6,1	4,7	14	26,1
ТМ-100/6	100	6	9,2	4,5	7,09	14,6
ТМ-160/6	160	6,3	15,4	4,5	4,11	10,4
ТМ-250/6	250	6	24,1	4,5	2,35	6,75
ТМ-320/6	320	6,3	30,8	5,5	2,35	6,40
ТМ-400/6	400	6	38,5	4,5	1,24	3,86
ТМ-400/6	400	6	38,5	5,5	1,24	4,79
ТМ-630/6	630	6	60,6	5,5	0,69	3,07

**Окончание таблицы А.7**

ТМ-1000/6	1000	6	96,2	5,5	0,44	1,93
ТМ-2500/6	2500	6	240,6	5,5	0,15	0,78
ТМ-25/10	25	10	1,4	4,5	96	152,3
ТМ-40/10	40	10	2,3	4,5	55	98,1
ТМ-63/10	63	10	3,6	4,5	37,0	70,5

TM-100/10	100	10	5,8	4,5	19,7	40,7
TM-160/10	160	10	9,2	4,5	10,9	28,1
TM-250/10	250	10	14,4	4,5	5,92	17,0
TM-320/10	320	10	18,5	5,5	6,05	16,1
TM-400/10	400	10	23,1	4,5	3,44	10,7
TM-400/10	400	10	23,1	5,5	3,44	13,3
TM-630/10	630	10	36,4	5,5	1,91	8,73
TM-1000/10	1000	10	57,7	5,5	1,22	5,36
TM-2500/10	2500	10	144,3	5,5	0,42	2,16

### А.3 Сетевые фильтры нулевой последовательности (ФМЗО)

Подключение резистора может быть выполнено через специально устанавливаемый силовой фильтр нулевой последовательности ФМЗО, представляющий собой маслonaполненный трехфазный трансформатор, не имеющий низковольтной вторичной обмотки и с обмоткой высшего напряжения выполненной по схеме «зигзаг» (см. рисунок А.2). Схема используется для низкоомного и высокоомного резистивного заземления нейтрали. Необходимые условия: схема соединения первичной обмотки звезда с нулем; проверка ФМЗО на термическую стойкость в режиме ОЗЗ.

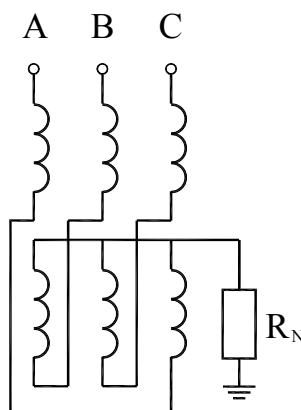


Рисунок А.2 – Схема подключения резистора через ФМЗО

Параметры, необходимые для выбора ФМЗО приведены в таблице А.8

Таблица А.8 – Параметры фильтров нулевой последовательности ФМЗО

Тип фильтра	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Максимальный ток, А	Ток XX, А	Потери XX, Вт	Напряжение КЗ, %	Потери КЗ, Вт
-------------	----------------------------	--------------------	---------------------	-----------	---------------	------------------	---------------

ФМЗО-40/6,6	6,6	8,4	10,5	0,04	75	3	600
ФМЗО-80/6,6	6,6	16,8	21	0,1	120	3,2	1200
ФМЗО-200/6,6	6,6	42	52,2	0,15	250	4,2	3000
ФМЗО-310/6,6	6,6	65,1	81,4	0,3	550	3,5	3500
ФМЗО-500/6,6	6,6	105	131,2	0,25	850	5,5	5000
ФМЗО-875/6,6	6,6	183,7	229,6	0,6	800	4,5	6000
ФМЗО-40/11	11	5	6,3	0,03	65	3	600
ФМЗО-80/11	11	10,1	21	0,1	120	3,2	1200
ФМЗО-200/11	11	25,2	52,2	0,15	250	4,2	3000
ФМЗО-310/11	11	39,1	48,9	0,6	600	3,6	3700
ФМЗО-500/11	11	63	78,75	0,15	850	5,5	5000
ФМЗО-875/11	11	110	137,7	0,35	800	4,5	6000
Примечание – При температуре окружающего воздуха не более +40 0С, допускаются следующие нагрузки фильтра: в течение 6 часов - 100 % (номинальный ток); в течение 2 часов - 120 % (перегрузка 20 %).							

#### А.4 Дугогасящие реакторы ZTC и ASR

##### Типовая серия реакторов

- Номинальное напряжение сети 6, 10, 15, 20, 35 кВ.
- Номинальная мощность от 100 до 8000 кВА (в том числе нестандартные значения по заказу потребителя).
- Длительность работы в режиме с однофазным замыканием в сети 24 часа.
- Плавное регулирование тока компенсации в диапазоне от 10 до 100% номинального тока.



- Диапазон рабочих температур от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  (при более низких температурах возможно исполнение в контейнере).
- Высота установки над уровнем моря не более 1000 м.

Дугогасящий реактор стандартно оснащен тремя обмотками:

- Главной обмоткой, которая изготавливается в соответствии с номинальным напряжением сети, номинальной мощностью реактора и длительностью работы сети в режиме однофазного замыкания;
- Измерительной обмоткой (номинальное напряжение 100 В, номинальный ток 3А), используется для автоматического управления дугогасящим реактором и измерения величины напряжения на нейтрали  $U_0$
- Вспомогательной силовой обмоткой (номинальное напряжение 500 В, номинальная мощность — 10% номинальной мощности реактора в течение 90 с), применяется для кратковременного включения шунтирующего резистора, создающего активную составляющую в токе поврежденного присоединения, что обеспечивает его селективное определение при наличии соответствующих релейных защит.

Параметры дугогасящих реакторов ZTC и ASR приведены в таблице А.10.

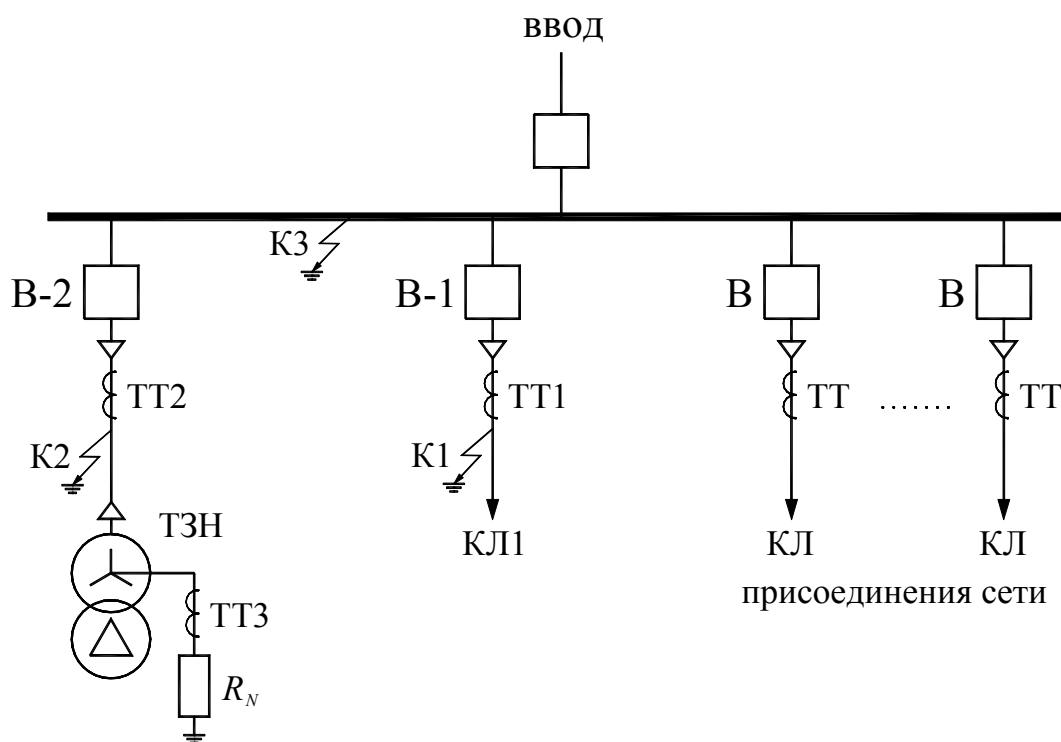
**Таблица А.10 – Параметры дугогасящих реакторов ZTC и ASR**

Тип реактора	Номинальная мощность реактора, кВА	Номинальное напряжение сети, кВ	Номинальное напряжение реактора, кВ	Диапазон тока компенсации, А
ZTC 50	100	6 / 10	3,46 / 5,77	3-29 / 2-17
ZTC 50	190	6 / 10	3,46 / 5,77	5-55 / 3-33
ZTC 250	300	6 / 10	3,46 / 5,77	9-87 / 5-52
ZTC 250	480	6 / 10	3,46 / 5,77	14-139 / 8-83
ASR 1.0	840	6 / 10	3,46 / 5,77	24-243 / 15-145
ASR 1.0	1000	6 / 10	3,46 / 5,77	29-289 / 17-173
ASR 1.0	1250	6 / 10	3,46 / 5,77	36-361 / 22-217
ASR 1.6	1520	6 / 10	3,46 / 5,77	44-439 / 26-263
ASR 1.0	1000	35	20,2	5-50
ASR 1.0	1250	35	20,2	6-62
ASR 1.6	1620	35	20,2	8-80
ASR 2.0	2000	35	20,2	10-99
ASR 2.6	2500	35	20,2	12-124
ASR 3.2	3200	35	20,2	16-158
ASR 4.0	4000	35	20,2	20-198

**Приложение Б**  
**(рекомендуемое)**  
**Методика расчета токов для выбора параметров срабатывания**  
**релейной защиты**

**Б.1** Токи замыкания на землю определяются по методике, предложенной в [29], для характерных точек, указанных на рисунке Б.1:

- повреждение на отходящем присоединении (точка К1);
- повреждение на кабеле заземляющего резистора (точка К2);
- повреждение на шинах (точка К3).



**Рисунок Б.1 – Расчетная схема сети**

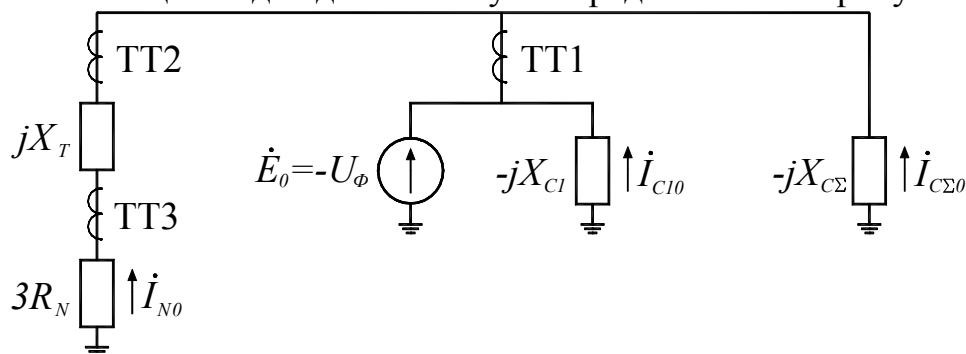
Полный ток в точке повреждения будет равен

$$i_3^{(1)} = \frac{3U_\phi}{z_{0\Sigma}}, \text{ А}, \quad (\text{Б.1})$$

где  $z_{0\Sigma}$  – результирующее сопротивление нулевой последовательности относительно точки замыкания, Ом.

**Б.2 Повреждение на отходящем присоединении (точка К1).**

Схема замещения для данного случая представлена на рисунке Б.2.



**Рисунок Б.2 – Схема замещения при замыкании на землю на отходящем присоединении**

Полный ток замыкания на землю для этого случая будет:

$$\dot{I}_3^{(1)} = 3\dot{I}_0 = 3(\dot{I}_{N0} + \dot{I}_{C\Sigma 0} + \dot{I}_{Cl0}) = \dot{I}_N + \dot{I}_{C\Sigma} + \dot{I}_{Cl}, \text{ А}, \quad (\text{Б.2})$$

где  $\dot{I}_N$ ,  $\dot{I}_{C\Sigma}$ ,  $\dot{I}_{Cl}$  – составляющие тока замыкания на землю от ветви резистора, емкости всей сети за исключением поврежденного присоединения и емкости поврежденного присоединения, соответственно, А.

Емкостные токи замыкания на землю для отдельных присоединений и для всей сети могут быть найдены в соответствии с рекомендациями приложения Г.

Токи в трансформаторах тока ТТ1, ТТ2 и ТТ3:

$$\dot{I}_{ТТ1} = \dot{I}_N + \dot{I}_{C\Sigma}, \text{ А}; \quad (\text{Б.3})$$

$$\dot{I}_{ТТ2} = \dot{I}_{ТТ3} = \dot{I}_N, \text{ А}. \quad (\text{Б.4})$$

Рассмотрим выражения для расчета составляющих токов  $\dot{I}_N$ ,  $\dot{I}_{C\Sigma}$ ,  $\dot{I}_{Cl}$ . Ток замыкания на землю от ветви резистора в соответствии с (Б.1) и рисунком Б.2 будет:

$$\dot{I}_P = \frac{3U_\phi}{3R_N + jX_T} = \frac{U_\phi}{Z_N}, \text{ А}, \quad (\text{Б.5})$$

где  $R_N$  – активное сопротивление заземляющего резистора, Ом;  
 $X_T$  – индуктивное сопротивление трансформатора заземления нейтрали, Ом;

$$Z_N = R + j\frac{X_T}{3} \text{ – полное сопротивление нейтрали, Ом.}$$

Значение сопротивления трансформатора определяется формулой:

$$X_T = \frac{U_{K\%}}{100} \cdot \frac{(U_{ном})^2}{S_{ном}}, \quad (\text{Б.6})$$

где  $U_{K\%}$  – напряжение короткого замыкания ТЗН, выраженное в процентах;

$U_{ном}, S_{ном}$  – номинальные напряжение и мощность ТЗН, кВ, кВА.

При практических расчетах допускается пренебрегать сопротивлением ТЗН ( $Z_N = R_N$ ), т.к. оно практически не оказывает влияние на модуль сопротивления нейтрали и угол между током и напряжением, обусловленный индуктивным сопротивлением ТЗН, не превышает 4-5°. При расчете направленных защит и малых токах замыкания на землю данную составляющую рекомендуется учитывать.

Действующее значение тока от ветви резистора:

$$\dot{I}_P = \frac{U_\Phi}{Z_N}, \text{ А.} \quad (\text{Б.7})$$

Ток замыкания на землю от емкости неповрежденной сети в соответствии с (Б.1) и рисунка Б.2 будет:

$$\dot{I}_{C\Sigma} = \frac{3U_\Phi}{-jX_{C\Sigma}} = j3U_\Phi \omega C_\Sigma, \text{ А,} \quad (\text{Б.8})$$

где  $X_{C\Sigma}$  – суммарное емкостное сопротивление неповрежденной части сети;

$C_\Sigma$  – суммарная емкость неповрежденной части сети.

Емкостная составляющая тока неповрежденной сети изменяется в достаточно широких пределах. Так он может изменяться от нуля до величин порядка сотен ампер для подстанций с большим количеством отходящих присоединений на секцию и развитой распределительной сетью.

Ток замыкания на землю от емкости поврежденного присоединения будет:

$$\dot{I}_{C1} = \frac{3U_\Phi}{-jX_{C1}} = j3U_\Phi \omega C_1, \quad (\text{Б.9})$$

где  $X_{C1}$  – емкостное сопротивление поврежденного присоединения;

$C_1$  – емкость поврежденного присоединения.

С учетом формул (Б.7), (Б.8), (Б.9) выражения для расчета тока замыкания на землю и токов в отдельных трансформаторах тока принимают вид:

$$\dot{i}_3^{(1)} = U_\phi \left( \frac{1}{Z_N} + j3\omega C_\Sigma + j3\omega C_1 \right), \text{ А}; \quad (\text{Б.10})$$

$$\dot{I}_{TT1} = U_\phi \left( \frac{1}{Z_N} + j3\omega C_\Sigma \right), \text{ А}; \quad (\text{Б.11})$$

$$\dot{I}_{TT2} = \dot{I}_{TT3} = \frac{U_\phi}{Z_N}, \text{ А}. \quad (\text{Б.12})$$

На рисунке Б.3 приведена векторная диаграмма токов для рассматриваемой точки повреждения.

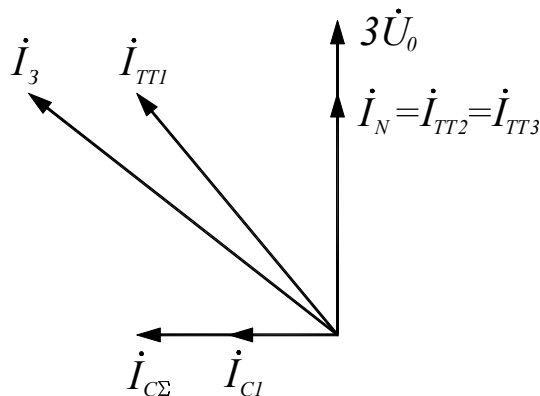


Рисунок Б.3 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю на отходящем присоединении

### Б.3 Повреждение на кабеле заземляющего резистора (точка К2).

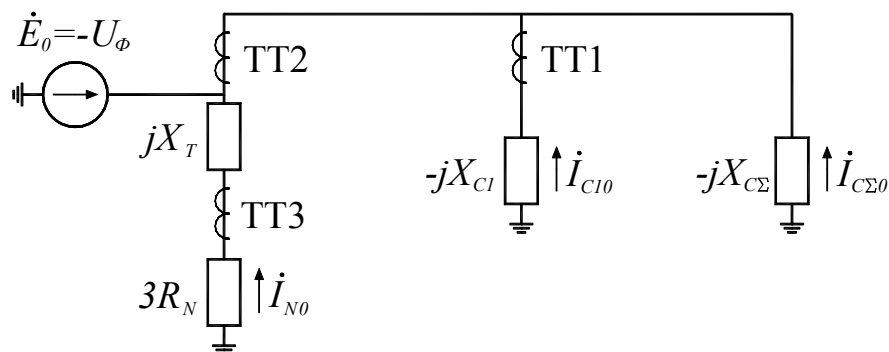
Схема замещения для данного случая представлена на рисунке Б.4.

Токи в трансформаторах тока в данном случае будут определяться по выражениям:

$$\dot{I}_{TT1} = -\dot{I}_{C1} = -j3U_\phi\omega C_1, \text{ А}; \quad (\text{Б.13})$$

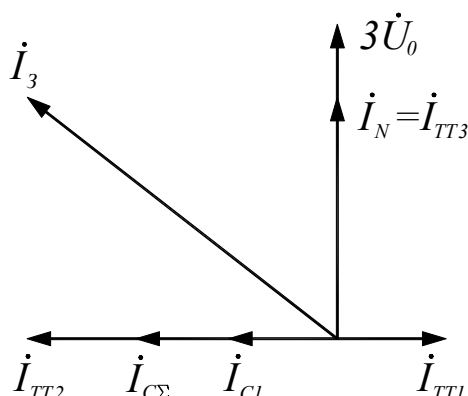
$$\dot{I}_{TT2} = \dot{I}_{C\Sigma} + \dot{I}_{C1} = j3U_\phi\omega(C_\Sigma + C_1), \text{ А}; \quad (\text{Б.14})$$

$$\dot{I}_{TT3} = \dot{I}_N = \frac{U_\phi}{Z_N}, \text{ А}. \quad (\text{Б.15})$$



**Рисунок Б.4 – Схема замещения при замыкании на землю на кабеле заземляющего резистора**

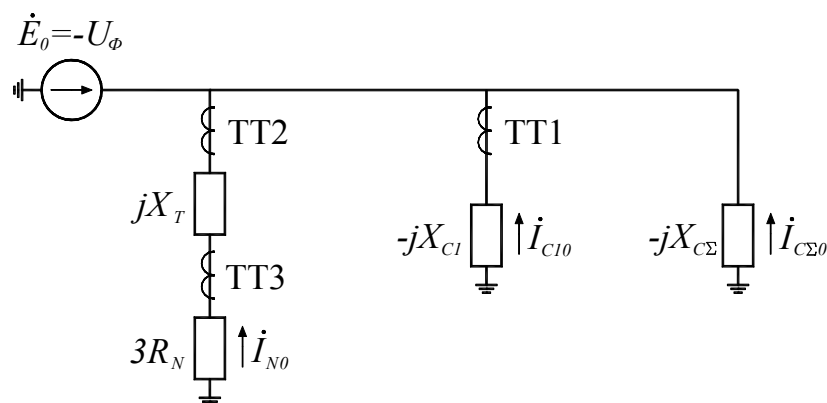
На рисунке Б.5 приведена векторная диаграмма токов для случая повреждения на кабеле заземляющего резистора.



**Рисунок Б.5 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю на кабеле заземляющего резистора**

#### **Б.4 Повреждение на шинах (точка К3).**

Схема замещения для данного случая представлена на рисунке Б.6.



**Рисунок Б.6 – Схема замещения при замыкании на землю на шинах**

Токи в трансформаторах тока в данном случае будут определяться по выражениям:

$$\dot{I}_{TT1} = -\dot{I}_{C1} = -j3U_{\phi}\omega C_1, \text{ A}; \quad (\text{Б.16})$$

$$\dot{I}_{TT2} = \dot{I}_{TT3} = \dot{I}_N = \frac{U_{\phi}}{Z_N}, \text{ A}. \quad (\text{Б.17})$$

На рисунке Б.7 приведена векторная диаграмма токов для случая повреждения на шинах.

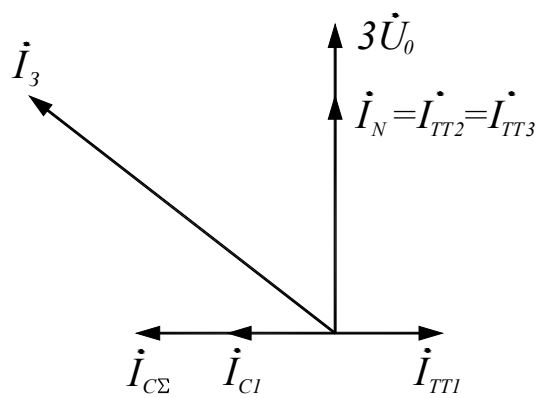


Рисунок Б.7 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю на шинах

**Приложение В**  
(рекомендуемое)  
**Методика выбора уставок релейной защиты**

**В.1 Выбор уставок защиты отходящего присоединения**

**В.1.1 Определение тока срабатывания ненаправленной токовой защиты.**

Расчет уставок данного типа защиты выполняется с [18,29-31]. Входным сигналом для данной защиты является ток нулевой последовательности ТТНП, установленного на отходящем присоединении.

Существует два условия выбора тока срабатывания защиты:

1) несрабатывание защиты при внешнем ОЗЗ:

Защита отстраивается от максимального собственного емкостного тока защищаемого присоединения. Ток срабатывания защиты определяется по выражению

$$I_{CЗ} \geq k_n \cdot k_{бр} \cdot I_{C10\max}, \text{ А.} \quad (\text{В.1})$$

где  $k_n$  – коэффициент надежности;

$k_{бр}$  – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока в момент возникновения ОЗЗ, а также способность реле реагировать на него;

$I_{C10\max}$  – максимальное значение собственного емкостного тока защищаемого присоединения при внешнем ОЗЗ.

Рекомендуемые значения коэффициентов:

$$k_n = 1,2;$$

$$k_{бр} = 3 \div 5 \text{ – для электромеханических реле типа РТ-40;}$$

$$k_{бр} = 2 \div 3 \text{ – для реле типа РТЗ-51;}$$

$$k_{бр} = 1 \div 1,5 \text{ – для микропроцессорных защит;}$$

$$k_{бр} = 1 \text{ – при времени срабатывания защиты более 0,3 с.}$$

К каждом конкретном случае при выборе уставок срабатывания необходимо руководствоваться рекомендациями разработчика и изготовителя защиты;

2) срабатывание (чувствительность) защиты при ОЗЗ на защищаемом присоединении:

$$k_{ч} = \frac{I_3}{I_{CЗ}}, \quad (\text{В.2})$$

где  $I_3$  – полный ток ОЗЗ (геометрическая сумма суммарного емкостного тока и активного тока резистивного заземления), протекающий в месте установки защиты при ОЗЗ на защищаемом присоединении.

Коэффициент чувствительности должен составлять:

$$k_{ч} \geq 1,5 \text{ – для защит воздушных и кабельных линий;}$$

$$k_{ч} \geq 2 \text{ – для защит электродвигателей.}$$



В случае если на отходящем присоединении невозможно установить ТТНП, и используется трехтрансформаторный фильтр нулевой последовательности (см. приложение Д) выражение (В.1) принимает вид

$$I_{C3} \geq k_n \cdot (k_{\sigma p} \cdot I_{C10 \max} + I_{н\delta}), \text{ А}, \quad (\text{В.3})$$

где  $I_{н\delta}$  – ток небаланса фильтра, определяемый в соответствии с (Д.1).

На практике выбор уставки срабатывания защиты отходящего присоединения целесообразно осуществлять по требуемому коэффициенту чувствительности  $k_u$ . Тогда ток срабатывания защиты определяется по выражению

$$I_{C3} = \frac{I_{\min}}{k_u}, \text{ А}. \quad (\text{В.4})$$

где  $I_{\min}$  – минимальный ток, протекающий через защиту в режиме ОЗЗ на защищаемом присоединении, А.

Ток, протекающий через защиту в режиме ОЗЗ на защищаемом присоединении, будет минимален, если емкостной ток сети равняется нулю, и протекает только активный ток, обусловленный наличием резистора в нейтрали, откуда

$$I_{\min} = \frac{U_{\phi}}{Z_N}, \text{ А}. \quad (\text{В.5})$$

Полученная величина уставки должна быть проверена по условию несрабатывания при внешнем повреждении по выражению (В.1). В большинстве случаев данное условие выполняется, однако при больших величинах токов присоединения (20 А и более) условие не выполняется и защита оказывается неэффективна.

### **В.1.2 Определение тока срабатывания направленной токовой защиты.**

Расчет уставок данного типа защиты выполняется с использованием источников [29,30,32].

Входными сигналами для данной защиты являются ток нулевой последовательности от ТТНП, установленного на отходящем присоединении и напряжения нулевой последовательности от ТН, установленного на шинах.

Существует два условия выбора тока срабатывания защиты:

1) несрабатывание защиты при протекании максимального суммарного тока небаланса:

Защита отстраивается от максимального суммарного тока небаланса, протекающего через устройство защиты. Ток срабатывания защиты определяется по выражению

$$I_{\tilde{N}\zeta} \geq k_i \cdot I_{i \dot{a} \max}, \text{ A.} \quad (\text{B.6})$$

где  $k_n = 1,2$  – коэффициент надежности;

$I_{нб\max}$  – максимальное значение суммарного тока небаланса.

Суммарный ток небаланса рассчитывается в соответствии с рекомендациями приложения Д.

2) срабатывание (чувствительность) защиты при ОЗЗ на защищаемом присоединении:

$$k_{\dot{z}} = \frac{I_{\zeta}}{I_{\tilde{N}\zeta}}, \quad (\text{B.7})$$

где  $I_{\zeta}$  – полный ток ОЗЗ (геометрическая сумма суммарного емкостного тока и активного тока резистивного заземления), протекающий через защиту при ОЗЗ на защищаемом присоединении.

Коэффициент чувствительности должен составлять:

$k_{\dot{z}} \geq 1,5$  – для защит воздушных и кабельных линий;

$k_{\dot{z}} \geq 2$  – для защит электродвигателей.

### В.1.3 Определение характеристики срабатывания направленной токовой защиты.

На рисунке В.1 представлена векторная диаграмма токов и напряжений при ОЗЗ в сети. Ток  $I_{\text{ТТЛ}}$  (см. рисунок Б.1), протекающий через защиту при ОЗЗ на защищаемом присоединении, является геометрической суммой тока  $I_P$ , протекающего через резистор, и емкостного тока сети  $I_{\text{С}\Sigma}$ . Угол между напряжением нулевой последовательности и током  $I_{\text{ТТЛ}}$  находится в диапазоне

$$\varphi_{\Pi} = 0 \div 90^{\circ}. \quad (\text{B.8})$$

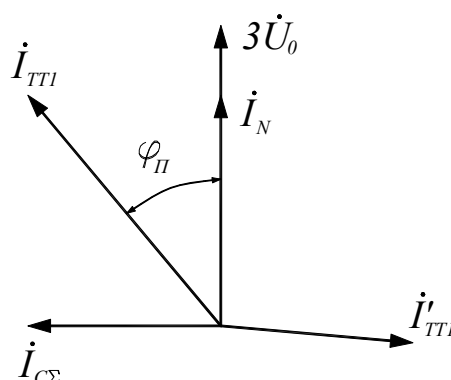
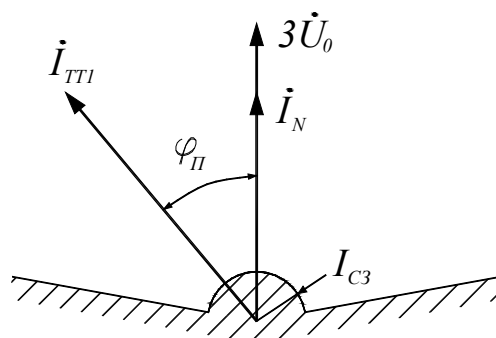


Рисунок В.1 – Векторная диаграмма токов и напряжений при ОЗЗ в сети

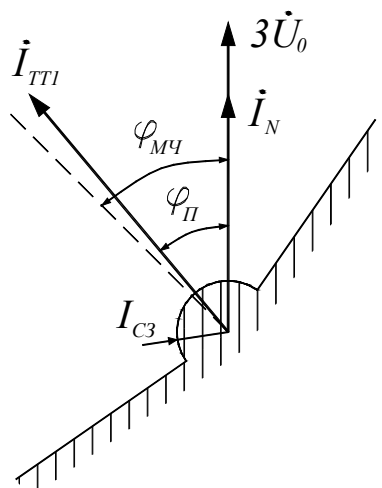
На рисунке  $I'_{\text{ТТЛ}}$  обозначен ток, протекающий через защиту при ОЗЗ вне защищаемого присоединения.

Характеристика срабатывания защиты, реагирующей на активную составляющую тока, приведена на рисунке В.2. Угол максимальной чувствительности в данном случае равен  $\varphi_{МЧ} = 0^\circ$ .



**Рисунок В.2 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю на отходящем присоединении и область срабатывания защиты, реагирующей на активную составляющую тока нулевой последовательности**

Характеристика срабатывания защиты, реагирующей на полный ток нулевой последовательности, приведена на рисунке В.3. Угол максимальной чувствительности в данном случае рекомендуется принимать  $\varphi_{МЧ} = 45^\circ$  или ближайшее возможное значение.



**Рисунок В.3 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю на отходящем присоединении и область срабатывания защиты, реагирующей на полный ток нулевой последовательности**

При выборе типа защиты следует иметь в виду, что характеристика, приведенная на рисунке В.3, обеспечивает работоспособность защиты не только в нормальном режиме – при наличии в сети заземляющего резистора, но и при выходе последнего из строя и работе сети в режиме с изолированной нейтралью. Защита при этом будет работать хуже, но в принципе останется работоспособной.

Характеристика, приведенная на рисунке В.2, в большей степени соответствует самой идее использования заземляющего резистора – защита срабатывает только в том присоединении, по которому протекает активный ток этого

резистора, т.е. идеально выявляет поврежденное присоединение. Однако при выходе заземляющего резистора из строя сеть остается без защиты от ОЗЗ. При применении таких защит целесообразно использовать надежные заземляющие резисторы, способные длительное время находиться под напряжением без опасности перегреться и выйти из строя. Не следует подключать резисторы через длинные кабели, которые могут часто повреждаться. Кроме того, защиты такого рода следует применять с кабельными трансформаторами тока нулевой последовательности, не дающими значительных угловых погрешностей.

Следует отметить, что при использовании любой из характеристик в процессе монтажа и наладки защиты необходимо провести весьма ответственную операцию: фазировку цепей тока и напряжения. Следует убедиться в том, что полярность цепей тока и напряжения для каждого устройства защиты выдержана правильно, и соответствующее устройство будет работать при ОЗЗ на защищаемом присоединении и не станет срабатывать при внешних ОЗЗ. Опыт работы показывает, что без такой проверки, сопровождающейся опытами искусственного ОЗЗ, невозможно быть полностью уверенным, что схема защиты собрана верно.

#### **В.1.4 Определение напряжения срабатывания**

Опыт эксплуатации показывает, что небаланс по напряжению нулевой последовательности чрезвычайно редко превышает значение 2,5 В. В связи с этим можно принять

$$U_{\tilde{N}\zeta\min} = 5 \div 7,5, \text{ В.} \quad (\text{В.9})$$

При этом следует иметь в виду, что рассматриваемое устройство защиты от ОЗЗ будет чувствительнее стандартных устройств сигнализации по  $3U_0$ , имеющих уставку порядка 20 В, т.е., например, при срабатывании защиты на сигнал устройство сигнализации может и не сработать.

#### **В.1.5 Определение времени срабатывания**

Время срабатывания защиты отходящего присоединения принимается на ступень селективности больше максимального времени срабатывания защит от ОЗЗ присоединений, отходящих от шин питаемого РП.

$$t_{CЗ} = t_{CЗ.РП\max} + \Delta t, \text{ с,} \quad (\text{В.10})$$

где  $\Delta t$  – ступень селективности, принимаемая 0,5 с при согласовании защиты с защитами отходящих присоединений, выполненными на электромеханической и микроэлектронной элементной базе, и 0,2÷0,3 с при согласовании защиты с защитами отходящих присоединений, выполненными на микропроцессорной элементной базе.

При отсутствии защит от ОЗЗ на смежных элементах сети уставка срабатывания защиты может быть принята равной нулю. Однако может быть це-

лесообразным введение небольшой выдержки времени порядка  $0,3 \div 1,0$  с для отстройки от переходных режимов и небалансов и повышения чувствительности защиты по току.

## В.2 Выбор уставок защиты резистора и шин

**В.2.1** Защита заземляющего резистора по цепям тока подключается к трансформатору тока ТТЗ (см. рисунок Б.1). Эта защита обеспечивает отключение источника питания (вводного и секционного выключателей) при замыканиях на землю на шинах и присоединении заземляющего резистора, а также обеспечивает дальнейшее резервирование в случаях отказа выключателей или защит отходящих присоединений. Функционально данная защита, как правило, входит в состав защит вводного и секционного выключателей.

### В.2.2 Определение тока срабатывания защиты.

Уставка срабатывания защиты по току с учетом (Б.12), (Б.15), (Б.17) и (В.4), (В.5) определяется по выражению:

$$I_{\tilde{N}\tilde{C}} = \frac{I_N}{k_{\tilde{+}}} = \frac{U_{\tilde{O}}}{k_{\tilde{+}} Z_N}, \text{ А.} \quad (\text{В.11})$$

Проверка данной защиты по условию отстройки по току не требуется.

### В.2.3 Определение времени срабатывания защиты.

Время срабатывания защиты, входящей в состав терминала защиты секционного выключателя, принимается на ступень селективности больше максимального времени срабатывания защит от ОЗЗ отходящих присоединений.

$$t_{\tilde{N}\tilde{C}\tilde{N}\tilde{A}} = t_{\tilde{N}\tilde{C}\max} + \Delta t, \text{ с,} \quad (\text{В.12})$$

где  $\Delta t$  – ступень селективности, принимаемая 0,5 с при согласовании защиты с защитами отходящих присоединений, выполненными на электромеханической и микроэлектронной элементной базе, и  $0,2 \div 0,3$  с при согласовании защиты с защитами отходящих присоединений, выполненными на микропроцессорной элементной базе.

Время срабатывания защиты, входящей в состав терминала защиты вводного выключателя, принимается на ступень селективности больше времени срабатывания защиты секционного выключателя.

$$t_{\tilde{N}\tilde{C}\tilde{A}\tilde{A}} = t_{\tilde{N}\tilde{C}\tilde{N}\tilde{A}} + \Delta t, \text{ с.} \quad (\text{В.13})$$

Также целесообразно иметь два набора уставок по времени на вводном выключателе, что при нормальном режиме работы и отключенном секционном выключателе время срабатывания защиты вводного выключателя равнялось

$$t_{C3\text{ввода}} = t_{C3\max} + \Delta t, \text{ с.} \quad (\text{В.14})$$

При этом должно выполняться условие по обеспечению термической стойкости заземляющего резистора:

$$t_{\tilde{N}C} \leq t_D, \text{ с.} \quad (\text{В.15})$$

где  $t_P$  – время термической стойкости заземляющего резистора при расчетной величине тока замыкания на землю через него.

### В.3 Выбор уставок защиты кабеля заземляющего резистора

**В.3.1** При замыканиях на землю в кабеле заземляющего резистора во многих случаях целесообразно отключение поврежденного присоединения (присоединения резистора), а не полное отключение секции с запретом АВР защитами резистора. В этом случае секция останется без повреждения в режиме изолированной нейтрали. Однако выполнение полноценной защиты кабеля заземляющего резистора от замыканий на землю сопряжено с рядом трудностей. Анализ выражений (Б.12), (Б.14) и (Б.17) показывает, что при повреждениях на кабеле резистора через трансформатор тока ТТ2 (см. рисунок Б.1) протекает суммарный емкостной ток сети, а при внешних замыканиях на землю – составляющая тока резистора. С учетом отмеченного целесообразно применение направленной защиты, реагирующей на емкостную составляющую тока (см. рисунок В.4).

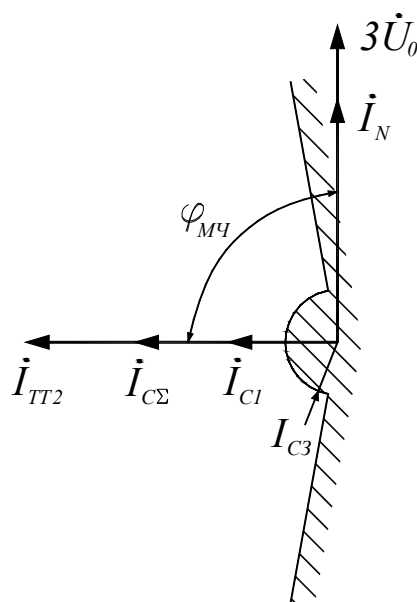


Рисунок В.4 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю в кабеле заземляющего резистора

#### В.3.2 Определение тока срабатывания защиты.

Уставка срабатывания защиты по току выбирается аналогично уставке срабатывания по току направленной защиты отходящего присоединения (см. В.1.2).

#### В.3.3 Определение напряжения срабатывания защиты.

Уставка срабатывания защиты по напряжению выбирается аналогично уставке срабатывания по напряжению направленной защиты отходящего присоединения (см. В.1.4).

### **В.3.4 Определение времени срабатывания защиты.**

Время срабатывания защиты принимается равным нулю:

$$t_{\tilde{N}C} = 0, \text{ с.} \quad (\text{В.16})$$

**В.3.5** Основной недостаток данной защиты – ее недостаточная чувствительность. Так, при суммарном емкостном токе сети меньшем заданной уставки защита работать не будет.

Для выполнения полноценной защиты кабеля заземляющего резистора возможно использование дифференциальной защиты нулевой последовательности, анализирующей токи в трансформаторах тока ТТ2 и ТТ3 (см. рисунок Б.1). Однако это ведет к существенному удорожанию защит присоединения заземляющего резистора.

## Приложение Г (справочное)

### Рекомендации по определению емкостного тока замыкания на землю

Определение емкостного тока замыкания на землю производится в соответствии с СТП 09110.20.361.

Приближенное значение величины емкостного тока замыкания на землю сети определяется по удельным емкостным токам и протяженности отдельных участков этой сети.

Удельные емкостные токи кабелей различных сечений и номинальных напряжений указаны в таблицах Г.1-Г.4.

Приближенная оценка величины емкостного тока воздушной линии электропередачи может быть определена по формуле:

$$I_{\tilde{N}} = (2,7 \div 3,3) \cdot U \cdot l \cdot 10^{-3}, \text{ А}, \quad (\text{Г.1})$$

где  $U$  – напряжение сети, кВ;

$l$  – длина линии, км.

Для линий 6-10 кВ, а также линий 35 кВ без тросов принимается коэффициент 2,7; для линий 35 кВ на деревянных опорах с тросами – 3,3; на металлических опорах с тросами – 3,0.

Емкостный ток двухцепной линии может быть определен по формуле:

$$I_{\tilde{N}\tilde{a}\tilde{a}} = (1,6 \div 1,3) \cdot I_{\tilde{N}}, \text{ А}, \quad (\text{Г.2})$$

где  $I_C$  – емкостный ток одноцепной линии, А.

Увеличение емкостного тока сети за счет емкости оборудования подстанций может ориентировочно оцениваться для воздушных и кабельных сетей 6-10 кВ – на 10%, для воздушных сетей 35 кВ – на 12%. Для кабельных сетей 35 кВ увеличение емкостного тока за счет оборудования подстанций учитывать не следует.

Недостаточная точность аналитического метода определения емкостных токов замыкания на землю и напряжений несимметрии реальных воздушных линий электропередачи определяет применение расчетов только для предварительной оценки параметров проектируемых сетей, а также перед прямыми их измерениями.



**Таблица Г.1 – Емкостные токи замыкания на землю кабелей с секторными жилами и поясной изоляцией**

Сечение, мм <sup>2</sup>	Ток замыкания на землю, А/км	
	Кабели 6 кВ	Кабели 10 кВ
16	0,37	0,52
25	0,46	0,62
35	0,52	0,69
50	0,59	0,77
70	0,71	0,90
95	0,82	1,00
120	0,89	1,10
150	1,10	1,30
185	1,20	1,40
240	1,30	1,60
300	1,50	1,80

**Таблица Г.2 – Емкостные токи замыкания на землю кабелей с бумажной пропитанной изоляцией**

Сечение, мм <sup>2</sup>	Ток замыкания на землю, А/км	
	Кабели 20 кВ	Кабели 35 кВ
25	2,0	-
35	2,2	-
50	2,5	-
70	2,8	3,7
95	3,1	4,1
120	3,4	4,4
150	3,7	4,8
185	4,0	5,2

**Таблица Г.3 – Емкостные токи замыкания на землю кабелей с пластмассовой изоляцией**

Сечение, мм <sup>2</sup>	Ток замыкания на землю, А/км		
	Кабели 6 кВ	Кабели 10 кВ	Кабели 35 кВ
25	0,55	1,90	3,30
35	0,60	2,10	3,60
50	0,65	2,30	3,90
70	0,70	2,60	4,50
95	0,75	2,90	4,80
120	0,85	3,20	5,40

150	0,90	3,40	5,70
185	1,00	3,80	6,30
240	1,00	4,50	6,90
300	-	5,00	7,50
400	-	5,60	8,10

Примечания

1 Три жилы кабелей 6кВ имеют общий металлический экран.

2 Каждая жила кабелей 10-35 кВ имеет отдельный металлический экран.

**Таблица Г.4 – Емкость кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена**

Сечение, мм <sup>2</sup>	Ток замыкания на землю, А/км		
	Кабели 6 кВ	Кабели 10 кВ	Кабели 35 кВ
50	0,43	0,72	2,53
70	0,49	0,82	2,86
95	0,55	0,91	3,19
120	0,58	0,97	3,41
150	0,64	1,07	3,74
185	0,70	1,16	4,07
240	0,77	1,29	4,51
300	0,85	1,41	4,95
400	0,94	1,57	5,50
500	1,04	1,73	6,05
630	1,15	1,92	6,70
800	1,28	2,14	7,47

## Приложение Д (справочное)

### Рекомендации по определению токов и напряжений небаланса

**Д.1** Для расчета уставок направленных защит необходимо оценивать численные значения небалансов тока и напряжения, которые могут присутствовать в защите при отсутствии на защищаемом присоединении ОЗЗ и способны привести к срабатыванию чувствительных видов защит.

Под небалансом в защите от однофазных замыканий на землю будем понимать рабочий сигнал (в рассматриваемом случае – ток или напряжение нулевой последовательности), «ощущаемый» защитой при отсутствии ОЗЗ на защищаемом присоединении или искажающий её поведение при ОЗЗ на защищаемом присоединении. Одной из особенностей небалансов в защитах от ОЗЗ является то, что некоторые из них могут не только приводить к ложным или излишним срабатываниям защиты, но и способны влиять на её чувствительность при замыкании на защищаемом присоединении.

В приложении рассмотрены основные виды небалансов и даны рекомендации по их определению.

### **Д.2 Небаланс измерительных трансформаторов тока и напряжения.**

Большие токи междуфазных КЗ приводят к появлению в трехтрансформаторных фильтрах нулевой последовательности значительных токов небаланса, от которых необходимо отстраивать защиту, если это не выполнено соответствующим выбором выдержки времени. Ток небаланса определяется по выражению

$$I_{нб.ФТНП} = k_{одн} \cdot \varepsilon \cdot I_{КЗmax}, \text{ А}, \quad (\text{Д.1})$$

где  $k_{одн} = 0,5 \div 1$  – коэффициент однотипности трансформаторов тока;

$\varepsilon = 0,1$  – предельная погрешность трансформаторов тока;

$I_{КЗmax}$  – максимальный ток междуфазного КЗ, который будет протекать по фильтру.

Ток небаланса ТТНП определяется в соответствии по выражению

$$I_{нб.ТТНП} = I_{нб.300} \cdot \frac{I_{КЗmax}}{300}, \text{ А}, \quad (\text{Д.2})$$

где  $I_{нб.300}$  – ток небаланса ТТНП, при протекании по кабелю тока 300 А (его значение может быть взято из [35]).

Небаланс напряжения может быть вызван не идентичностью характеристик фазных обмоток измерительных трансформаторов напряжения. Для измерения напряжения  $3U_0$  в сетях 6–10 кВ, как правило, используются трехфазные пятистержневые трансформаторы напряжения с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена по схеме звезда, а вторая – по схеме

разомкнутого треугольника, реализующая фильтр напряжения нулевой последовательности.

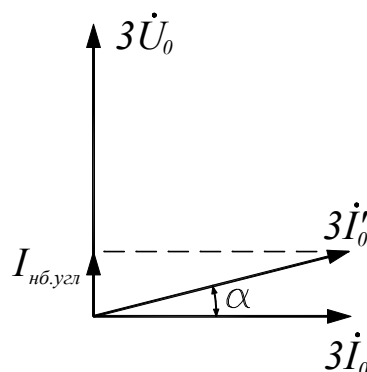
В некоторых случаях для измерения напряжения в качестве ФННП используется группа из трех однофазных ТН.

При несимметрии параметров фильтров напряжения нулевой последовательности (трансформаторов напряжения) или его нагрузок, на выводах обмоток, соединенных в «разомкнутый треугольник», может появиться напряжение небаланса. Величину этого небаланса на разомкнутых зажимах нулевых обмоток, приведенную к первичной обмотке, можно оценить по заданной допустимой погрешности измерения фазных напряжений следующим образом [9]:

$$U_{\text{нбТН}} = \frac{U_{\Phi} \cdot f_U}{2}, \text{ В}, \quad (\text{Д.3})$$

где  $f_U$  – погрешность ТН.

Существует ещё одна составляющая токов небаланса, вызванная угловыми погрешностями измерительных трансформаторов и датчиков защиты. На рисунке Д.1 приведена векторная диаграмма, иллюстрирующая рассматриваемый вопрос.



**Рисунок Д.1 – Появление тока небаланса при наличии угловой погрешности**

Предположим, что мы хотим построить направленную защиту от ОЗЗ, реагирующую на активный ток. В рассматриваемом случае рабочий сигнал в такой защите отсутствует, поскольку протекающий по защите ток – чисто емкостный. Однако если за счет угловых погрешностей измерительных трансформаторов тока, напряжения, а также соответствующих датчиков защиты вторичное значение тока нулевой последовательности  $3I'_0$  окажется повернутым относительно первоначального положения на угол  $\alpha$ , как это показано на рисунке Д.1, то появится соответствующий небаланс. При этом защита будет ощущать активный ток  $I_{\text{нб.угл}}$ , равный проекции вектора тока  $3I'_0$  на вектор напряжения  $3U_0$ . При этом модуль тока небаланса  $I_{\text{нб.угл}}$  составит:

$$I_{\text{нб.угл}} = 3 \cdot I_0 \cdot \sin \alpha, \text{ А}, \quad (\text{Д.4})$$

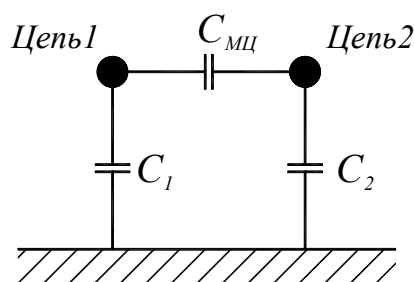
где  $\alpha$  – суммарная угловая погрешность измерительных трансформаторов тока, напряжения и датчиков защиты.

Рассматриваемая составляющая тока небаланса появляется в защите в режиме внешнего ОЗЗ, и её необходимо учитывать при расчете тока срабатывания направленных токовых защит нулевой последовательности, реагирующих на активный ток.

**Д.3 Небаланс, вызванный явлением феррорезонанса**, появляется в сети при отключении ОЗЗ из-за взаимодействия индуктивности измерительных трансформаторов напряжения и емкости сети.

Отстроиться от данного вида небаланса можно при помощи выдержки времени или заземления нейтрали сети через резистор. Следовательно, небаланс, вызванный явлением феррорезонанса, при расчете уставок защит от ОЗЗ в сети с резистивно заземленной нейтралью можно не учитывать.

**Д.4 Небаланс, вызванный влиянием параллельных линий** могут возникать в сети из-за смещения потенциала нейтрали при взаимодействии цепей двухцепной ВЛ, в случае если на линии, размещенной на общих опорах с рассматриваемой линией, возникает ОЗЗ. Учитываемые при расчете емкости показаны на рисунке Д.2.



C<sub>1</sub> – емкость относительно земли трех фаз влияющей линии;

C<sub>2</sub> – емкость относительно земли всех трех фаз рассматриваемой линии;

C<sub>МЦ</sub> – межцепная емкость.

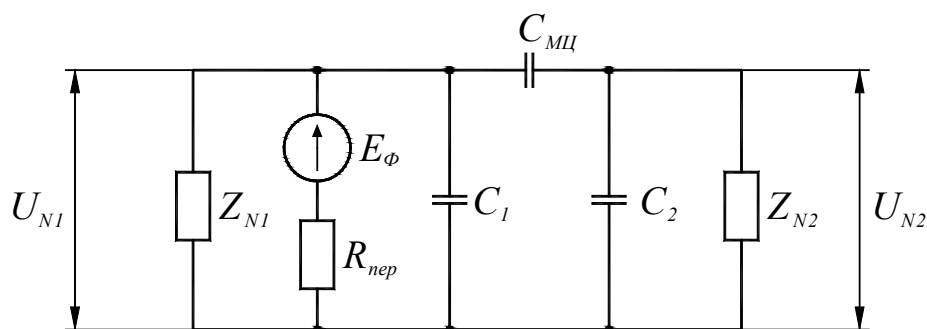
**Рисунок Д.2 – Схема емкостной связи параллельных линий**

Схема замещения в общем виде представлена на рисунке Д.3

Ток в рассматриваемой цепи (небаланс) будет равен

$$I_{\text{нб.нар}} = j\omega \left[ (\dot{U}_{N1} - \dot{U}_{N2}) C_{\text{МЦ}} - \dot{U}_{N2} C_3 \right], \text{ А}, \quad (\text{Д.5})$$

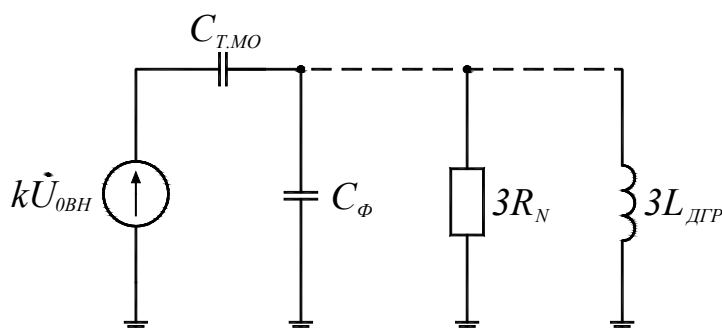
$$\text{где } \dot{U}_{N2} = \dot{U}_{N1} \cdot \frac{j\omega C_2 Z_{N2}}{1 + j\omega Z_{N2} (C_2 + C_3)}, \text{ В.}$$



$Z_{N1}$  – сопротивление заземления нейтрали сети влияющей линии;  
 $Z_{N2}$  – сопротивление заземления нейтрали сети рассматриваемой линии;  
 $U_{N1}$  – напряжение смещения нейтрали сети влияющей линии;  
 $U_{N2}$  – напряжение смещения нейтрали сети рассматриваемой линии;  
 $R_{пер}$  – переходное сопротивление в месте ОЗЗ.

Рисунок Д.3 – Расчетная схема замещения

**Д.5 Небаланс, вызванный влиянием сетей смежных напряжений через силовые трансформаторы**, возникает за счет того, что, при КЗ на землю или ОЗЗ в сети смежного напряжения (например, со стороны обмотки высшего напряжения понижающего трансформатора, от обмотки низшего напряжения которого питается рассматриваемая сеть) напряжение нулевой последовательности через межобмоточную емкость этого трансформатора поступает в сеть. Это может иметь место в том случае, если сеть низшего напряжения работает с изолированной нейтралью или подключена со стороны обмотки силового трансформатора, соединенной в треугольник. Величину возникающего при этом напряжения нулевой последовательности можно определить по схеме замещения, приведенной на рисунке Д.4. Предполагаем, что в рассматриваемом случае в сети установлен дугогасящий реактор и заземляющий резистор.



$C_{Т,МО}$  – межобмоточная емкость трансформатора (для одной фазы);  
 $C_{\phi}$  – суммарная емкость нулевой последовательности в сети низшего напряжения (для одной фазы);

Рисунок Д.4 – Расчетная схема замещения

Значения межобмоточной емкости могут быть взяты из [36].

Если нейтраль сети низшего напряжения заземлена через высокоомный резистор и дугогасящий реактор (как на рисунке Д.3), то можно получить вы-

ражение (Д.39) для определения значения напряжения смещения нейтрали (небаланса) сети низшего напряжения  $U_{0Н}$ . Если какой-то из элементов (дугогасящий реактор или заземляющий резистор) в сети отсутствует, то его исключают из рисунка Д.3 и соответствующие параметры в выражении (Д.39) приравнивают к бесконечности.

$$\dot{U}_{нб.Т} = \frac{kU_{0ВН}}{\sqrt{\left(1 + \frac{C_{\Phi}}{C_{Т.МО}} + \frac{1}{3\omega^2 L_{ДГР} C_{Т.МО}}\right)^2 + \left(\frac{1}{3R_N \omega C_{Т.МО}}\right)^2}}, \text{ В}, \quad (\text{Д.6})$$

где  $U_{0ВН}$  – напряжение нулевой последовательности со стороны высшего напряжения при КЗ на землю (для сетей 110 кВ и выше) или ОЗЗ (для сетей 35 кВ);

$k$  – коэффициент, учитывающий распределение напряжения  $U_{0ВН}$  по обмотке высшего напряжения трансформатора (приблизительно  $k = 1$  при изолированной нейтрали со стороны высшего напряжения силового трансформатора,  $k = 0,5$  при эффективно заземленной нейтрали [14]. При заземлении нейтрали через дугогасящий реактор и (или) высокоомный резистор необходимо принимать  $k = 0,5 \div 1$  в зависимости от суммарного значения сопротивления в цепи нейтрали);

$L_{ДГР}$  – индуктивность ДГР;

Обычно суммарная емкость нулевой последовательности в сети низшего напряжения  $C_{\Phi}$  во много раз больше межобмоточной емкости  $C_{Т.МО}$  силового трансформатора и напряжение  $U_{нб.Т}$  не превышает нескольких процентов от фазного напряжения. Ситуация усложняется при появлении в сети низшего напряжения дугогасящих реакторов. При этом суммарное сопротивление фаз сети низшего напряжения относительно земли возрастает, и напряжение на нейтрали может существенно увеличиться.

При действии защиты от ОЗЗ в сети низшего напряжения с выдержкой времени и согласовании её со временем срабатывания резервных защит от КЗ на землю линий со стороны высшего напряжения, рассматриваемую составляющую небаланса можно не учитывать при расчете уставок защиты от ОЗЗ. Если же защита от ОЗЗ в сети низшего напряжения не имеет выдержки времени, то при наличии в этой сети дугогасящего реактора отстройка от рассматриваемой составляющей небаланса может представить серьезные трудности.

Не только сеть высшего напряжения может влиять на смещение нейтрали в сети низшего напряжения, но и наоборот – ОЗЗ в сети низшего напряжения (например, 10 кВ) может привести к смещению нейтрали сети более высокого напряжения (например, 35 кВ). В принципе расчет в этом случае ведется так же, как это описано выше.

Ещё один случай появления напряжения нулевой последовательности возможен при заземлении питающего силового трансформатора с двух сторон. Практически это может иметь место, например, при питании сети 35 кВ, работающей с высокоомным заземлением нейтрали, от сети 110–220 кВ, нейтраль которой эффективно заземлена. В этом случае главной причиной возникновения напряжения нулевой последовательности в сети среднего напряжения при КЗ на землю в сети высшего напряжения является трансформация напряжений и токов нулевой последовательности. Величину напряжения  $U_{нб.Т}$  смещения нейтрали сети среднего напряжения в этом случае можно определить из схемы замещения нулевой последовательности, приведенной на рисунке Д.5. В схеме предполагается, что все сопротивления и токи приведены к одному напряжению.

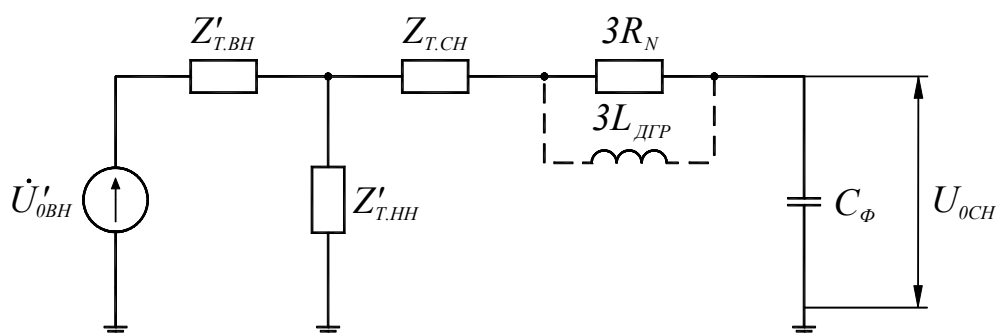


Рисунок Д.5 – Расчетная схема замещения

Выражение для определения напряжения нулевой последовательности со стороны системы среднего напряжения [4] выглядит следующим образом:

$$U_{нб.Т} = \frac{U'_{0ВН} \cdot |Z'_{Т.СН}|}{|Z'_{Т.НН} + Z'_{Т.ВН}|}, \text{ В}, \quad (\text{Д.7})$$

где  $Z'_{Т.НН}$ ,  $Z'_{Т.ВН}$  – сопротивления обмоток трансформатора соответственно со стороны низшего и высшего напряжений, приведенные к одному напряжению.

Следует отметить, что в рассматриваемом случае в схеме замещения индуктивность дугогасящего реактора и емкость сети включены последовательно. При отсутствии заземляющего резистора и настройке ДГР в режим полной компенсации, в сети среднего напряжения может возникнуть резонанс напряжений, в результате чего напряжение в сети среднего напряжения может недопустимо повыситься. Заземляющий резистор «срывает» резонанс и снижает напряжение в сети среднего напряжения. При действии защиты с выдержкой времени и согласовании ее с временем срабатывания резервных защит от КЗ на землю линий со стороны высшего напряжения, рассматриваемую составляющую небаланса можно не учитывать при расчете уставок защиты. В этом случае необходимо учитывать лишь длительно существующие ОЗЗ со стороны смежной сети с малыми токами замыкания на землю, так как КЗ на землю в



сети с эффективно заземленной нейтралью отключаются защитой от данного вида повреждений быстрее, чем успеет сработать защита от ОЗЗ.

### Д.6 Небалансы токов и напряжений, вызванные несимметрией фазных сопротивлений сети, имеющих в нормальном режиме.

В любой системе имеются включенные между каждым из фазных проводов и землей, как это показано на рисунке Д.6, индуктивность  $L_i$ , емкость  $C_i$  и активное сопротивление утечки по изоляции  $R_i$ .

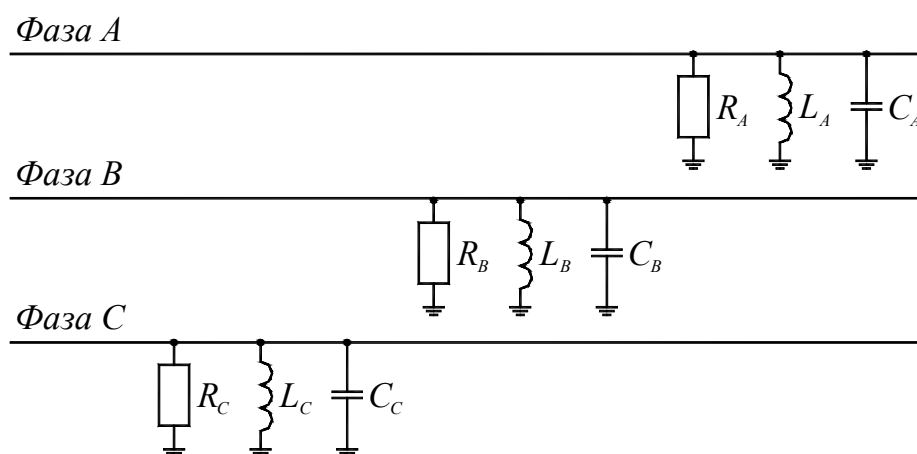


Рисунок Д.6 – Элементы расчетной схемы сети

Индуктивности можно считать сосредоточенными в трансформаторах напряжения, трансформаторах заземления нейтрали и т.д. Емкости и активные сопротивления утечки по изоляции имеются практически во всех силовых элементах схемы, но наибольшие емкостные токи сосредоточены в линиях (кабельных и воздушных) и двигателях.

Не во всех режимах работы сети соответствующие параметры схемы рисунок Д.5 одинаковы во всех фазах. Причины появления несимметрии и соответствующих небалансов по току и напряжению  $I_{нб.нес}$  и  $U_{нб.нес}$ :

- сгорание предохранителя в одной фазе трансформатора напряжения приводит к исчезновению из расчетной схемы индуктивности его фазы. «Недовключение» контактов в одной фазе выключателя, установленного в цепи трансформатора заземления нейтрали, приводит к исключению из схемы индуктивности соответствующей обмотки;

- нарушение цикла транспозиции фазных проводов ВЛ;

- обрыв шлейфа на ВЛ, не приводящий к соприкосновению провода с заземленной конструкцией;

- обрыв фазного изолированного провода, которым в последнее время монтируются некоторые ВЛ;

- недовключение контактов в одной фазе выключателя;

– увлажнение слоистой фазной изоляции кабелей и других элементов силовой схемы;

– несимметричная схема подключения конденсаторов связи высокочастотных каналов (такие иногда встречаются на практике, например на линиях 35 кВ) и так далее;

– прикосновения веток деревьев к фазным проводам;

– увлажнение изоляции кабелей;

– неравномерное загрязнение изоляторов на ВЛ.

Напряжение смещения нейтрали (небаланса) определяется по выражению

$$\dot{U}_{\text{нб.нес.}Z} = \frac{\dot{U}_A \dot{Y}_A + \dot{U}_B \dot{Y}_B + \dot{U}_C \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_N}, \text{ В}, \quad (\text{Д.8})$$

$$\text{где } \dot{Y}_A = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{j\omega L_A} + j\omega C_A; \quad \dot{Y}_B = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{j\omega L_B} + j\omega C_B;$$

$$\dot{Y}_C = \frac{1}{R_C} + \frac{1}{j\omega L_C} + j\omega C_C; \quad \dot{Y}_N = \frac{1}{Z_N}.$$

Ток небаланса, протекающий в нейтрали может быть найден по выражению

$$\dot{I}_{\text{нб.нес.}Z} = \frac{\dot{U}_{\text{нб.нес.}Z}}{\dot{Z}_N}, \text{ А}. \quad (\text{Д.9})$$

#### **Д.5 Небаланс, вызванный несимметрией фазных ЭДС источника питания.**

Из-за несимметрии фазных напряжений на шинах питающей подстанции на изолированной (резистивно-заземленной, компенсированной) нейтрали сети может появиться напряжение несимметрии.

Напряжение и ток нулевой последовательности (небаланса) можно определить по выражениям:

$$\dot{U}_{\text{нб.нес.}E} = \dot{U}_0 = \frac{\dot{E}_{\text{нес}} \dot{Y}_\Phi \dot{Z}_N}{1 + 3\dot{Y}_\Phi \dot{Z}_N}, \text{ В}, \quad (\text{Д.10})$$

$$\dot{I}_{\text{нб.нес.}E.N} = 3\dot{I}_0 = \frac{\dot{E}_{\text{нес}} \dot{Y}_\Phi}{1 + 3\dot{Y}_\Phi \dot{Z}_N}, \text{ А}, \quad (\text{Д.11})$$

где  $\dot{Y}_\Phi = j\omega C_\Phi$  – фазная емкостная проводимость;

$\dot{E}_{нес} = \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C$  – эквивалентная ЭДС при наличии несимметрии.

Из полученных выражений (Д.39) и (Д.40) видно, что в рассматриваемом случае, при наличии несимметрии в фазных напряжениях, в линии будет протекать активный ток (т.к., как правило,  $R_N \gg X_N$ ), величина которого равна отношению напряжения  $U_0$  в нейтрали, вызванного этой несимметрией, к сопротивлению заземления нейтрали  $Z_N$ . С учетом того, что активный ток резистора совпадает по фазе с приложенным к нему напряжением  $U_0$ , направление активного тока в линии противоположно этому напряжению (этот ток протекает по направлению к шинам).

При наличии нескольких ЛЭП, питающихся от одной секции шин, активный ток резистора будет распределяться по линиям пропорционально величинам их емкостей, то есть величина тока в каждой из ЛЭП составит:

$$\dot{I}_{нб.нес.Е.ЛЭП} = 3\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_0 C_{\Phi i}}{\dot{Z}_N C_{\Phi \Sigma}}, \text{ А}, \quad (\text{Д.12})$$

где  $C_{\Phi i}$  – фазная емкость  $i$ -ой линии;

$C_{\Phi \Sigma}$  – суммарная фазная емкость сети.

Таким образом, ток небаланса, вызванный несимметрией в фазных напряжениях на шинах питающей подстанции, попадает в зону действия направленных токовых защит нулевой последовательности, реагирующих на активный ток, и должен учитываться при расчете их уставок. Следует отметить, что при отсутствии в нейтрали сети заземляющего резистора токи нулевой последовательности в линиях в рассматриваемом случае протекать не будут, несмотря на наличие напряжения небаланса на шинах (нет пути для протекания этих токов).

### **Д.8 Небаланс, вызванный несимметрией фазных нагрузок.**

Как правило, в сетях 6–35 кВ отсутствуют нагрузки, имеющие непосредственную связь с землей, поэтому небаланс, вызванный неравенством фазных токов таких нагрузок, не рассматриваем.

Из-за несимметрии нагрузок в сети 0,4 кВ могут возникнуть разные токи в фазах сети высшего напряжения, которые могут привести к смещению нейтрали понижающих трансформаторов.

Если нейтраль понижающего трансформатора не заземлена, то такое смещение не приводит к небалансу по напряжениям и токам нулевой последовательности в сети 6–35 кВ. Однако установка заземляющих резисторов в нейтральных понижающих трансформаторов приводит к тому, что смещение их нейтралей вызывает появление дополнительного небаланса токов  $I_{нб.нагр}$  и напряжений  $U_{нб.нагр}$  нулевой последовательности.

**Д.9 Выражения для определения суммарных небалансов** записываются следующим образом:

- небаланс напряжения на нейтрали

$$\dot{U}_{нб.N} = \dot{U}_{нб.ТН} + \dot{U}_{нб.Т} + \dot{U}_{нб.нес.Z} + \dot{U}_{нб.нес.E} + \dot{U}_{нб.нагр}, \text{ В}; \quad (\text{Д.13})$$

- небаланс тока в нейтрали

$$\dot{I}_{нб.N} = \dot{I}_{нб.ТТНП} \left( \dot{I}_{нб.ФТНП} \right) + \dot{I}_{нб.угл} + \dot{I}_{нб.пар} + \dot{I}_{нб.нес.E.N} + \dot{I}_{нб.нагр}, \text{ А}; \quad (\text{Д.14})$$

- небаланс тока в линии

$$\begin{aligned} \dot{I}_{нб.ЛЭП} = \dot{I}_{нб.ТТНП} \left( \dot{I}_{нб.ФТНП} \right) + \dot{I}_{нб.угл} + \dot{I}_{нб.пар} + \dot{I}_{нб.нес.Z} + \\ + \dot{I}_{нб.нес.E.ЛЭП} + \dot{I}_{нб.нагр}, \text{ А}. \end{aligned} \quad (\text{Д.15})$$

**Библиография**

- [1] Правила устройства электроустановок (ПУЭ), 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986
- [2] Сиротинский Л. Л. Перенапряжения и защита от перенапряжений в электрических установках.—М., Госэнергоиздат, 1932 г.
- [3] Кадомская К.П., Виштибеев А.Б. О резистивном заземлении нейтрали в сетях 6-35 кВ различного назначения. – Доклады научно-технической конференции "Режимы заземления нейтрали сетей 3-6-10-35 кВ". Новосибирск, 2000г.
- [4] Алексей Шалин. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит. – СПб. Новости Электротехники, №3(33) 2005 г.
- [5] Анатолий Щеглов, Вячеслав Горюнов. Защиты от замыканий на землю в сетях 6(10) кВ. Особенности монтажа трансформаторов тока нулевой последовательности. – СПб. Новости Электротехники, №5(53) 2008 г.
- [6] Вопросы обеспечения защиты от замыканий на землю в распределительных сетях с резистивно заземленной нейтралью. – Материалы семинара, Минск, 2007 г.
- [7] Реле микропроцессорные МР700, МР730. Защиты и автоматики ввода, отходящей линии, двигателя, секционного выключателя. Руководство по эксплуатации. Редакция 7.3 от 21.03.2023 г.
- [8] Методика расчета уставок защит Sepam. – Техническая коллекция Schneider Electric, №3, 2006 г.
- [9] Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. – Киев: Наукова Думка, 1983 г.
- [10] Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 5. Защита блоков генератор-трансформатор и генератор-автотрансформатор. – М.-Л.: Энергия, 1963 г.
- [11] Александр Назарычев, Сергей Титенков, Андрей Пугачев. О формировании технических требований к конструкции и параметрам резисторов заземления нейтрали 6-35 кВ. //ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2022 №6(75).