

**Методические указания по заземлению нейтрали сетей 6-35 кВ
Белорусской энергосистемы через резистор**



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

Предисловие

Методические указания по заземлению нейтрали сетей 6-35 кВ Белорусской энергосистемы через резистор.

1 РАЗРАБОТАН НИиПИ РУП «Белэнергосетьпроект»

2 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ указанием Государственного производственного объединения «Белэнерго» от 01.03.2010 г.

3 ВВЕДЕН ВЗАМЕН Временных методических указаний по переводу сетей 6-35 кВ Белорусской энергосистемы с режима изолированной нейтрали на режим заземления нейтрали через резистор. – Минэнерго РБ, 2005 г.

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

Издан на русском языке

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	1
1 Область применения	2
2 Нормативные ссылки	2
3 Принятые основные обозначения и сокращения.....	2
4 Основные положения	3
5 Выбор режима резистивного заземления нейтрали и величины сопротивления резистора.....	5
5.1 Режимы резистивного заземления нейтрали.....	5
5.2 Критерии выбора режима резистивного заземления нейтрали.....	6
5.3 Выбор величины сопротивления резистора по критерию обеспечения электробезопасности.....	8
5.4 Выбор величины сопротивления резистора по критерию снижения уровня перенапряжений	8
5.5 Выбор величины сопротивления резистора по критерию эффективной работы релейной защиты	9
5.6 Выбор типа резистора и проверка его термической стойкости	9
6 Способы включения резистора в нейтраль сети 6-35 кВ	10
6.1 Принципиальные схемы включения резистора в нейтраль сети.....	10
6.2 Определение мощности трансформатора присоединения резистора.....	12
7 Выбор средств защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали	13
7.1 Общие принципы организации работы релейной защиты и автоматики.....	13
7.2 Релейная защита отходящих присоединений.....	14
7.3 Релейная защита шин и присоединения резистора	16
7.4 Требования к релейной защите от замыканий на землю	18
7.5 Рекомендации по выбору типов релейной защиты	18
7.6 Схемы подключения реле тока.....	20
8 Особенности организации работы сетей 6-35 кВ при заземлении нейтрали через резистор.....	22
8.1 Подстанция без связей по сети 6-35 кВ с другими подстанциями	22
8.2 Подстанция, имеющая связь по сети 6-35 кВ с другими подстанциями.....	24
8.3 Защита от замыканий на землю параллельных кабельных линий.....	27
8.4 Питание двух секций шин от одной обмотки силового трансформатора.....	29
9 Техно-экономическое обоснование целесообразности резистивного заземления нейтрали сетей 6-35 кВ.....	34
9.1 Основные положения	34
9.2 Аргументы по технико-экономическому обоснованию целесообразности резистивного заземления нейтрали сетей 6-35 кВ.....	34
Приложение А (справочное) Технические характеристики резисторов и трансформаторов заземления нейтрали	37

А.1 Резисторы для заземления нейтрали	37
А.2 Трансформаторы для подключения резисторов	39
А.3 Сетевые фильтры нулевой последовательности (ФМЗО).....	40
Приложение Б (рекомендуемое) Методика расчета токов для выбора параметров срабатывания релейной защиты	42
Приложение В (рекомендуемое) Методика выбора уставок релейной защиты.....	48
В.1 Выбор уставок защиты отходящего присоединения	48
В.2 Выбор уставок защиты резистора и шин	53
В.3 Выбор уставок защиты кабеля заземляющего резистора.....	54
Приложение Г (справочное) Рекомендации по определению емкостного тока замыкания на землю.....	56
Приложение Д (справочное) Рекомендации по определению токов и напряжений небаланса	59
Библиография	69

Введение

Методические указания (далее Указания) представляют собой второе издание «Временных Методических указаний по переводу сетей 6-35 кВ Белорусской энергосистемы с режима изолированной нейтрали на режим заземления нейтрали через резистор» (СО 09110.20.172-04, ГПО «Белэнерго», 2005 г.) переработанное и дополненное.

В Указаниях обобщен положительный опыт применения Временных Указаний в Белорусской энергосистеме, применены новые концепции выбора типа резисторов по критерию перенапряжений, условиям работы РЗА и электробезопасности, основанных на новых разработках в Республике Беларусь, Российской Федерации и других странах по проблеме защиты сетей и электрооборудования при однофазных замыканиях на землю.

В работе в качестве электроустановок рассматриваются распределительные устройства напряжением 6-35 кВ подстанций.

СТАНДАРТ ГПО «БЕЛЭНЕРГО»

Методические указания по заземлению нейтрали сетей 6-35 кВ Белорусской энергосистемы через резистор

Дата введения _____

1 Область применения

Методические Указания предназначены для применения проектными организациями ГПО «Белэнерго» при проектировании резистивного заземления нейтрали 6-35 кВ на подстанциях, а также эксплуатационными организациями при наладке и эксплуатации резистивного заземления нейтрали.

Другими ведомствами и организациями республики СТП 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:

ГОСТ 12.1.038-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Система стандартов безопасности труда. Часть 3. – М.: ИПК "Издательство стандартов", 1996 г.;

Правила устройства электроустановок, 6 издание, переработанное и дополненное, 1985 г.;

СО 09110.20.361-04. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрической сети 6-35 кВ. – Мн., Белэнерго, 2004 г.

3 Принятые основные обозначения и сокращения

- АВР – автоматическое включение резерва;
- АПВ – автоматическое повторное включение;
- ВЛ – воздушная линия;
- ДГР – дугогасящий реактор;
- ЗУ – заземляющее устройство;
- КЗ – короткое замыкание;
- ЛЭП – линия электропередачи;
- ОЗЗ – однофазное замыкание на землю;
- ОПН – нелинейный ограничитель перенапряжений;
- ПС – подстанция;
- ПУЭ – правила устройства электроустановок;

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;
ТТНП	– трансформатор тока нулевой последовательности;
ФМЗО	– силовой фильтр нулевой последовательности;
ФННП	– фильтр напряжения нулевой последовательности;
ФТНП	– фильтр тока нулевой последовательности;
Y_0/Δ	– соединение обмоток трансформатора по схеме звезда с нулем – треугольник .

4 Основные положения

4.1 В Республике Беларусь, странах СНГ и многих других странах мира до настоящего времени широкое распространение получила система изолированной нейтрали и система компенсированной через дугогасящий реактор нейтрали сетей 6-35 кВ.

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 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 с учетом опыта эксплуатации признано целесообразным проводить модернизацию системы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ путем заземления её через резистор, т.е. переходить на резистивную систему заземления нейтрали.

При ОЗЗ в сетях с заземлённой через резистор нейтралью во всех присоединениях протекают собственные ёмкостные токи, однако в повреждённом присоединении, кроме суммарного ёмкостного тока, протекает активный ток, обусловленный включением в цепь тока нулевой последовательности активного сопротивления резистора.

Это принципиальное положение и обуславливает физическую сущность способа заземления нейтрали через резистор, который позволяет наиболее просто решить две важные технологические задачи:

во-первых, представляется возможным определить повреждённое присоединение и незамедлительно принять меры по устранению повреждения;

во-вторых, создаются предпосылки для выбора простой токовой релейной защиты, действующей либо на сигнал, либо на отключение повреждённого присоединения.

Кроме того, заземление нейтрали через резистор позволяет снижать уровень дуговых, феррорезонансных и коммутационных перенапряжений. При этом появляется возможность защиты оборудования ПС с помощью ОПН с более низким остаточным напряжением при коммутационном импульсе.

Заземление нейтрали через резистор способствует повышению уровня электробезопасности для людей и животных в результате быстрого отключения повреждённого присоединения.

4.3 Режим заземления нейтрали сетей 6-35 кВ через резистор по своей сущности должен обеспечивать:

- 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;
- исключить или снизить вероятность повреждения людей и животных при ОЗЗ;
- при всех рабочих и защитных функциях обеспечивать экономическую целесообразность принимаемых мероприятий.

4.4 В Белорусской энергосистеме низкоомное резистивное заземление нейтрали впервые было осуществлено на ПС 110/10 кВ Сухарево по инициативе РУП “Минскэнерго” при проектной реализации РУП “Белэнергопроект” (1999 г.). Основанием для принятия такого решения по заземлению нейтрали послужил тот факт, что на этой подстанции устанавливалось импортное оборудова-

ние с пониженным уровнем изоляции, вероятность повреждения которого была велика при применении изолированной или компенсированной нейтрали.

Впоследствии резистивная система заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ осуществлялась на основе «Временных Методических указаний по переводу сетей 6-35 кВ Белорусской энергосистемы с режима изолированной нейтрали на режим заземления нейтрали через резистор» (СО 09110.20.172–04, ГПО «Белэнерго», 2005г.), разработанных РУП «Белэнергосетьпроект», которые прошли успешную апробацию во всех подразделениях ГПО «Белэнерго». Настоящие Указания являются новой редакцией Временных указаний.

При разработке настоящих Указаний использовались литературные источники [1-38].

5 Выбор режима резистивного заземления нейтрали и величины сопротивления резистора

5.1 Режимы резистивного заземления нейтрали

5.1.1 Применяются два режима резистивного заземления нейтрали сетей 6-35 кВ:

- низкоомное резистивное заземление нейтрали;
- высокоомное резистивное заземление нейтрали.

5.1.2 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.

5.1.3 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 или имеются ограничения по величине тока повреждения. При этом ток в нейтрали должен быть такой величины, чтобы исключить появление опасных негативных явлений, связанных с перенапряжениями и электробезопасностью, но быть достаточным для определения повреждённого присоединения и работы релейной защиты на сигнал.

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.

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

5.1.5 Признаком режима резистивного заземления нейтрали является соотношение величины сопротивления резистора R_N и величины емкостного тока сети X_C .

В зависимости от соотношения сопротивлений резистора R_N и емкостного сопротивления сети X_C принято условное разделение резистивного заземления нейтрали на низкоомное и высокоомное:

– для низкоомного резистивного заземления

$$R_N \leq X_C; \quad (5.1)$$

– для высокоомного резистивного заземления

$$R_N > X_C. \quad (5.2)$$

Емкостное сопротивление сети X_C определяется по выражению

$$X_C = \frac{U_\phi}{I_C}, \text{ Ом}; \quad (5.3)$$

где I_C – емкостной ток сети, А.

5.2 Критерии выбора режима резистивного заземления нейтрали

5.2.1 Задача определения типа резистивного заземления нейтрали сети является многокритериальной и включает в себя следующие составляющие:

- обеспечение электробезопасности;
- надежность электроснабжения потребителей;
- снижение уровня перенапряжений в сети;
- организация эффективной защиты от ОЗЗ.

5.2.2 Критерий обеспечения электробезопасности заключается в соблюдении условий электробезопасности для людей при ОЗЗ на ПС с учетом существующего нормирования величин допустимого сопротивления ЗУ или напряжения прикосновения.

Методика выбора величины резистора по критерию обеспечения электробезопасности приведена в п.5.3.

5.2.3 Критерий надежности электроснабжения потребителей определяется возможностью обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей. При длительном существовании режима ОЗЗ в сети возможны как переход ОЗЗ в многофазное повреждение, так и переход ОЗЗ в многоместные повреждения изоляции, приводящие к двойным замыканиям на землю с отключением поврежденных элементов.

Для потребителей первой высшей, первой и второй категорий необходимо использовать режим резистивного заземления нейтрали с действием релейной защиты на отключение поврежденного элемента.

Для потребителей второй категории с временным питанием от одного независимого источника и для потребителей третьей категории необходимо рассматривать вопрос целесообразности сохранения режима ОЗЗ. При необходимости сохранения работы сети в режиме ОЗЗ необходимо использовать высокоомное резистивное заземление нейтрали с действие релейной защиты от ОЗЗ на сигнал.

5.2.4 Критерий снижения уровня перенапряжений определяется необходимой величиной снижения уровня перенапряжений и характеризуется коэффициентом кратности перенапряжений k_{II} , который представляет отношение величин максимального напряжения на фазах при ОЗЗ U_{\max} к фазному напряжению U_{ϕ} :

$$k_{II} = \frac{U_{\max}}{U_{\phi}} = 1 \div 3,4, \quad (5.4)$$

где $k_{II} = 3,4$ – максимальный коэффициент кратности дуговых перенапряжений в сети с изолированной нейтралью.

В качестве базовой степени защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений принимается степень защиты $k_{II} = 2,6$, соответствующая норме на профилактические испытания вращающихся машин (генераторов, высоковольтных двигателей).

При резистивном заземлении нейтрали степень защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений должна соответствовать условию

$$k_{II} \leq 2,6, \quad (5.5)$$

Выбор степени защиты $k_{II} > 2,6$ должен иметь соответствующее обоснование.

Методика выбора величины резистора по критерию ограничения перенапряжений приведена в п.5.4.

5.2.5 Критерий организации эффективной защиты от ОЗЗ заключается в определении необходимого вида защиты, обладающей требуемой селективностью и чувствительностью.

При низкоомном резистивном заземлении нейтрали в режиме ОЗЗ по поврежденному присоединению протекает ток величиной десятки и сотни ампер, что позволяет организовать простую токовую защиту с действием на отключение поврежденного присоединения.

При высокоомном резистивном заземлении нейтрали определение поврежденного присоединения производится по наличию активной составляющей тока ОЗЗ, которая имеет достаточно малую величину, что в свою очередь ведет к усложнению и удорожанию релейной защиты от ОЗЗ.

Методика выбора величины резистора по критерию организации эффективной защиты от ОЗЗ приведена в п.5.5.

5.3 Выбор величины сопротивления резистора по критерию обеспечения электробезопасности

5.3.1 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.

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

$$R_{ЗУ\text{дон}} \leq \frac{R_{ЗУ(ПУЭ)} \cdot R_N}{\sqrt{R_N^2 + X_C^2}}, \text{ Ом.} \quad (5.6)$$

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

Из (5.6) следует, что по сравнению с принятой в соответствии с ПУЭ допустимой величиной сопротивления ЗУ при заземлении нейтрали сети через резистор всегда ухудшаются условия электробезопасности. В этом случае электробезопасность обеспечивается двумя способами: либо путем выбора допустимого сопротивления ЗУ по (5.6), либо путем выполнения на ПС специальных защитных мероприятий, связанных с отключением поврежденного присоединения, или устройством специального выравнивания потенциалов в соответствии с [21,22].

5.4 Выбор величины сопротивления резистора по критерию снижения уровня перенапряжений

5.4.1 Выбор величины резистора по критерию снижения уровня перенапряжений производится по требуемой степени защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений, которая определяется допустимым коэффициентом кратности перенапряжений k_{II} .

Величина допустимого коэффициента кратности перенапряжений определяется оборудованием и уровнем изоляции сети. Если такого требования не выносятся, то в соответствии с п.5.2.4 принимается

$$k_{II} \leq 2,6. \quad (5.7)$$

При этом коэффициент кратности перенапряжений составляет:

– для низкоомного резистивного заземления нейтрали

$$k_I = 1,0 \div 2,2; \quad (5.8)$$

– для высокоомного резистивного заземления нейтрали

$$k_{II} = 2,2 \div 2,6. \quad (5.9)$$

5.4.2 Сопротивление резистора по заданной кратности уровня перенапряжений k_{II} определяется по выражению

$$R_N = X_C \frac{k_{II} - 1}{3,4 - k_{II}}, \text{ Ом.} \quad (5.10)$$

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

$$k_{II} = \frac{2,4 \cdot R_N}{R_N + X_C} + 1. \quad (5.11)$$

5.5 Выбор величины сопротивления резистора по критерию эффективной работы релейной защиты

5.5.1 Защита от ОЗЗ в сети организуется на всех присоединениях. При низкоомном резистивном заземлении нейтрали устанавливается максимальная токовая защита нулевой последовательности с действием на отключение поврежденного присоединения. При высокоомном резистивном заземлении нейтрали могут устанавливаться как простые токовые защиты, так и более сложные виды защит с действием на отключение или сигнал.

5.5.2 Допустимое сопротивление резистора по критерию эффективной работы РЗА определяется по выражению

$$R_N \leq \frac{U_{\phi}}{I_{CЗ}}, \text{ Ом.} \quad (5.12)$$

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

5.6 Выбор типа резистора и проверка его термической стойкости

5.6.1 Величина сопротивления резистора должна выбираться при условии наибольшего рабочего напряжения на шинах $U_{н,раб}$, которое составляет:

$$\begin{aligned} U_{н,раб} &= 7,2 \text{ кВ} && \text{– для сети напряжением 6 кВ;} \\ U_{н,раб} &= 12 \text{ кВ} && \text{– для сети напряжением 10 кВ;} \\ U_{н,раб} &= 40,5 \text{ кВ} && \text{– для сети напряжением 35 кВ.} \end{aligned}$$

5.6.2 Термическая стойкость низкоомного резистора оценивается по допустимому кратковременному току $I_{Pдоп}$ и времени его протекания $t_{Pдоп}$, которые должны удовлетворять условиям

$$I_{Pдоп} \geq I_P; \quad (5.13)$$

$$t_{Pдоп} \geq t_{CЗрез}, \text{ но не менее 3 с,} \quad (5.14)$$

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

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

5.6.3 Термическая стойкость высокоомного резистора оценивается по допустимому длительному току $I_{Pдоп}$ или по номинальной мощности резистора $S_{Pном}$, которые должны удовлетворять условиям

$$I_{Pдоп} \geq I_P; \quad (5.15)$$

$$S_{Pном} \geq I_P^2 \cdot R_N. \quad (5.16)$$

5.6.4 Рекомендуется при расчетах выбирать величину сопротивления резистора из данных, представленных в приложении А и предложениях заводоизготовителей 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 Способы включения резистора в нейтраль сети 6-35 кВ

6.1 Принципиальные схемы включения резистора в нейтраль сети

6.1.1 Нейтрали сетей 6-35 кВ заземляются через резистор на питающих ПС. Резисторы для заземления нейтрали сети устанавливаются на каждой секции шин 6-35 кВ.

6.1.2 Резистивное заземление нейтрали может осуществляться одним из следующих способов:

– включение резистора в нейтраль обмотки силового трансформатора соединенной по схеме «звезда с нулем» (см. рисунок 6.1);

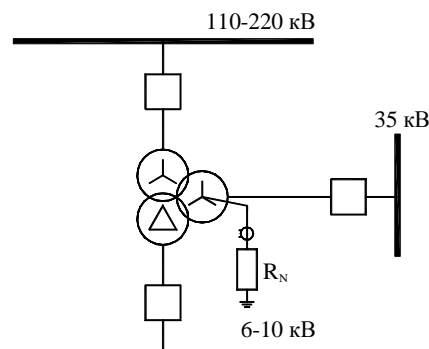


Рисунок 6.1 – Принципиальная схема заземления нейтрали сети 35 кВ при включении резистора в нейтраль обмотки среднего напряжения силового трансформатора

– включение резистора в нейтраль обмотки высшего напряжения специально устанавливаемого трансформатора заземления нейтрали (ТЗН) со схемой соединения обмоток Y_0/Δ (см. рисунки 6.2, 6.3а);

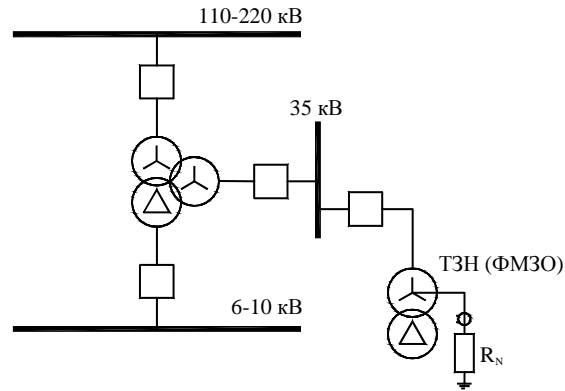
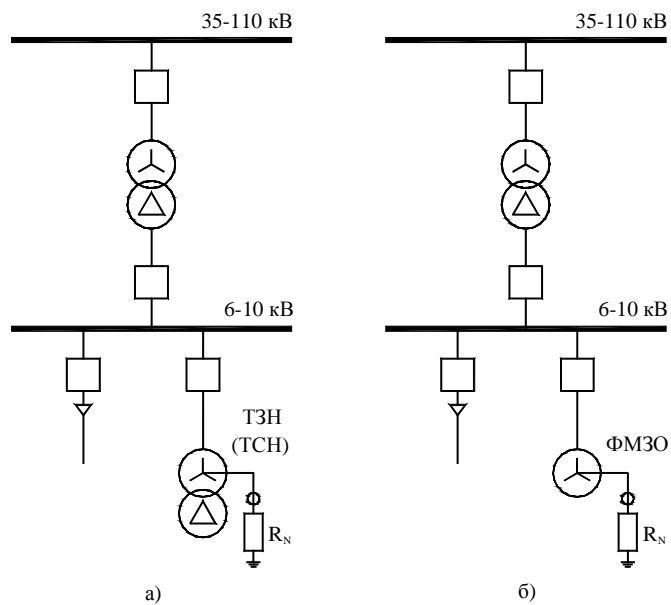


Рисунок 6.2 – Принципиальная схема заземления нейтрали сети 35 кВ при включении резистора в нейтраль ТЗН (ФМЗО)



- а) включение резистора в нейтраль ТЗН (ТСН);
 б) включение резистора в нейтраль ФМЗО

Рисунок 6.3 – Принципиальные схемы заземления нейтрали сети 6-10 кВ при включении резистора в нейтраль ТЗН, ТСН или ФМЗО

– включение резистора в нейтраль обмотки высшего напряжения трансформатора собственных нужд (ТСН) со схемой соединения обмоток Y_0/Δ (см. рисунок 6.3а);

– подключение резистора через силовой фильтр нулевой последовательности ФМЗО (см. рисунок 6.2, 6.3б, 6.4).

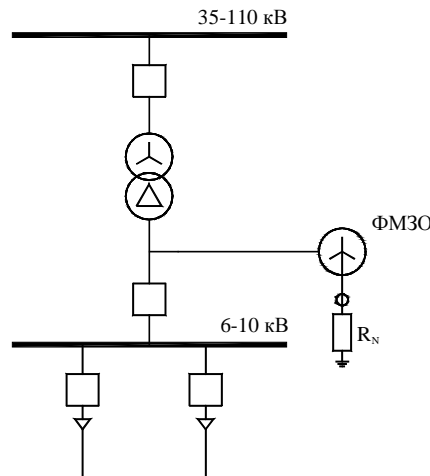


Рисунок 6.4 – Принципиальная схема заземления нейтрали сети 6-10 кВ при подключении ФМЗО к выводам обмотки силового трансформатора

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

6.2 Определение мощности трансформатора присоединения резистора

6.2.1 Наиболее простым и недорогим решением является включение резистора в нейтраль обмотки силового трансформатора, соединенной по схеме «звезда с нулем» (см. рисунок 6.1). 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.

6.2.2 Наиболее распространенным способом включения резистора в нейтраль сети является установка специального трансформатора ТЗН со схемой соединения обмоток Y_0/Δ -11 (см. рисунки 6.2, 6.3а), мощность которого выбирается по условию:

$$S_{\dot{o}} \geq \frac{U^2}{3 \cdot k_{пер} \cdot R_N}, \text{ кВА}, \quad (6.1)$$

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

6.2.3 При наличии ТСН со схемой соединения обмоток Y_0/Δ допускается включение резистора в нейтраль обмотки высшего напряжения (см. рисунок 6.3а) при условии проверки термической стойкости ТСН в режиме ОЗЗ по условию:

$$I_{\dot{o}он} = \sqrt{(1,1 \cdot I_{ном})^2 - \left(\frac{I_P}{3}\right)^2}, \quad (6.2)$$

где I_p – ток через резистор в режиме ОЗЗ (см. п.5.6.2), А;

$$I_{iii} = \frac{S_{iii}}{\sqrt{3} \cdot U} \text{ – номинальный ток ТСН, А;}$$

$S_{ном}$ – номинальная мощность ТСН, кВА.

6.2.4 Также для включения резистора в нейтраль сети может использоваться специальный сетевой фильтр нулевой последовательности ФМЗО (см. рисунки 6.2, 6.3б, 6.4), мощность которого выбирается по выражению (6.1).

6.2.5 При установке резистора вместо ДГР с использованием существующего ТЗН, ТСН или ФМЗО, необходимо выполнять проверку на термическую стойкость ТЗН и ФМЗО по выражению (6.1) и ТСН по выражению (6.2).

7 Выбор средств защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали

7.1 Общие принципы организации работы релейной защиты и автоматики

7.1.1 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 либо есть ограничения по величине тока ОЗЗ. 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.

7.1.2 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 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.

7.1.3 При отказе защит по отключению повреждённого присоединения должно быть выполнено резервное действие защит от ОЗЗ по отключению секции (ввода), к которой присоединено повреждённое присоединение, с целью защиты резистора от термического повреждения и предотвращению работы сети в режиме ОЗЗ с большим током повреждения. Должен быть выполнен запрет АВР.

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

7.1.5 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.

7.1.5 При повреждении на присоединении резистора допускается действие защиты на отключение присоединения резистора с переводом сети в режим изолированной нейтрали в случае, если это допустимо. При этом на присоединении резистора должна быть установлена защита от ОЗЗ.

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

7.2 Релейная защита отходящих присоединений

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

7.2.2 **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 заземлением нейтрали. Такая защита реагирует на значение полного тока нулевой последовательности промышленной частоты ($3I_0$). Селективность и чувствительность этой защиты обеспечивается схемой сети и выбором соответствующих параметров резистивного

заземления и уставок РЗ. Время срабатывания защиты не зависит от величины тока замыкания, как показано на рисунке 7.1.



Рисунок 7.1 – Независимая характеристика времени срабатывания защиты от ОЗЗ

7.2.3 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 7.2.

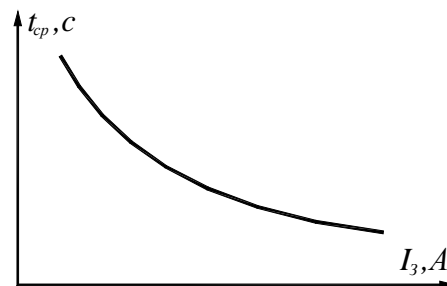


Рисунок 7.2 – Зависимая характеристика времени срабатывания защиты от ОЗЗ

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

7.2.4 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 присоедине-

ний к сборным шинам (например, при двух присоединениях). При большом же количестве присоединениях защита работает весьма эффективно.

7.2.5 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 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.

7.2.6 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.

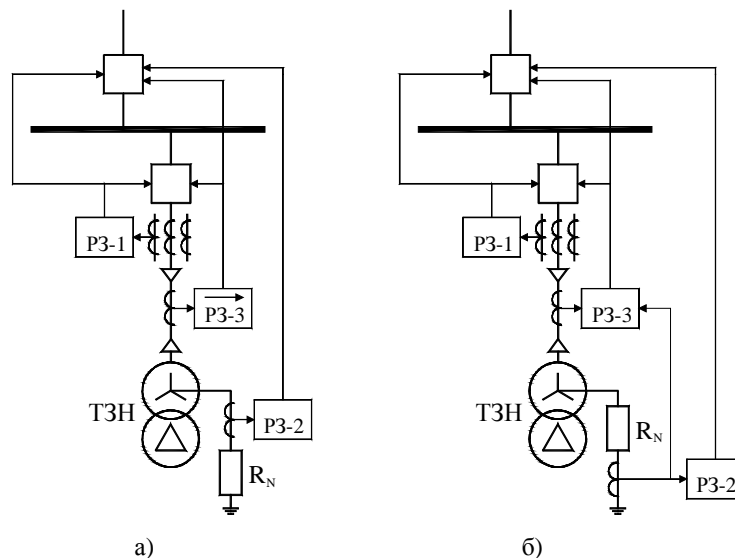
7.3 Релейная защита шин и присоединения резистора

7.3.1 Для защиты присоединения резистора от междуфазных КЗ необходимо устанавливать комплект максимальной токовой защиты (РЗ-1, рисунки 7.3а, 7.3б) 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 резистора, если работа сети в режиме изолированной нейтрали допустима.

7.3.2 Защита шин и присоединения резистора от замыканий на землю (РЗ-2, рисунки 7.3а, 7.3б) 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 при-

соединении 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.

7.3.3 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 – составляющая тока резистора. С учетом отмеченного целесообразно применение направленной защиты, реагирующей на емкостную составляющую тока (РЗ-3, рисунок 7.3а).



- а) направленная токовая защита
б) дифференциальная защита

Рисунок 7.3 – 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 7.3б). При этом трансформатор тока в нейтрали должен быть установлен, как показано на рисунке 7.3б.

7.4 Требования к релейной защите от замыканий на землю

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

7.4.2 Должна быть предусмотрена защита самого резистора с действием на отключение секции (ввода) или присоединения резистора (если допускается работа сети в режиме изолированной нейтрали).

7.4.3 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.

7.4.4 При высокоомном резистивном заземлении нейтрали необходимо, по возможности, использовать наиболее простые токовые защиты нулевой последовательности с действием на отключение поврежденного присоединения или на сигнал.

7.4.5 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.

7.4.6 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.

7.4.7 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 заземлением нейтрали определяется максимальное значение переходного сопротивления при выполнении требований к чувствительности защит.

7.5 Рекомендации по выбору типов релейной защиты

7.5.1 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 базе терминала защиты отходящего присоединения, в котором предусмотрена соответствующая функция и вход для подключения ТТНП.

7.5.2 При низкоомном резистивном 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.

7.5.3 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.

7.5.4 Защиты на присоединениях, питающих РП, рекомендуется выполнять направленными.

7.5.5 Существенные сложности возникают в защите от ОЗЗ воздушных линий электропередачи. При обрыве провода такой ЛЭП в месте ОЗЗ иногда возникают переходные сопротивления порядка нескольких кОм. Напряжения и токи нулевой последовательности при этом сильно уменьшаются, причём степень снижения этих рабочих сигналов зависит от величины переходного сопротивления и основных характеристик сети (ёмкость относительно земли, параметры заземляющих резисторов и т.д.). При больших переходных сопротивлениях рабочие сигналы защиты от ОЗЗ становятся соизмеримыми с небалансами, существующими в сети, и от которых защита должна быть отстроена. Значения этих небалансов ограничивают минимальные ток и напряжение срабатывания защиты.

Для защиты ВЛ 6-35 кВ от ОЗЗ с высоким переходным сопротивлением при обрыве провода целесообразно использовать **комбинации защит, работающие на разных принципах**: направленная токовая защита нулевой последовательности в пределах своей чувствительности реагирует на ОЗЗ, токовая защита обратной последовательности отключает ВЛ при обрыве провода. При недостаточной чувствительности токовой защиты обратной последовательности, реагирующей на величину тока обратной последовательности, что может иметь место при малых токах нагрузки в нормальном режиме, в качестве входного сигнала защиты можно использовать отношение токов обратной последовательности и прямой последовательности (I_2/I_1), которое в нормальном режиме остается практически неизменным.

7.5.6 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 сек-

цию 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.

7.5.7 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 7.6, 7.7).

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.

7.6 Схемы подключения реле тока

7.6.1 Наиболее распространенной является схема подключения реле тока к трансформатору тока нулевой последовательности (ТТНП), как показано на рисунке 7.4.

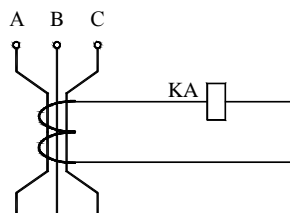


Рисунок 7.4 – Схема подключения реле тока к ТТНП

Обязательным условием правильной работы защиты нулевой последовательности является пропускание заземляющего шлейфа экрана и оболочки кабеля через ТТНП, как показано на рисунке 7.5.



Рисунок 7.5 – Схема заземления экрана и оболочки кабеля

Подробнее про особенности монтажа ТТНП в [28].

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

7.6.2 В большинстве случаев в сетях 35 кВ, а также в сетях 6-10 кВ при невозможности установки ТТНП допускается подключение реле тока к трехтрансформаторному фильтру тока нулевой последовательности, выполненному на трех фазных трансформаторах тока (рисунок 7.6) или при включении реле тока в нулевой провод трехрелейной схемы соединения трансформаторов тока, т.е. по четырехрелейной схеме (рисунок 7.7).

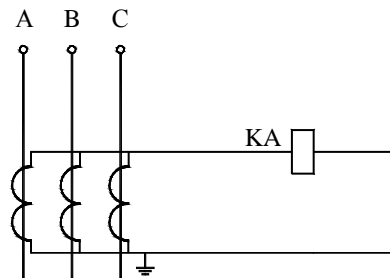


Рисунок 7.6 – Схема подключения реле тока через фильтр нулевой последовательности, выполненный на трех фазных трансформаторах тока

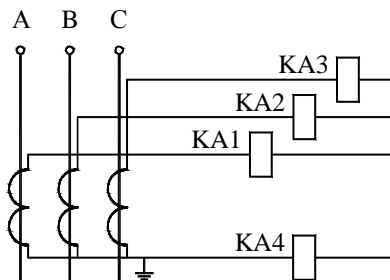


Рисунок 7.7 – Схема подключения реле тока по четырехрелейной схеме

Достоинствами этих схем являются простота и низкая стоимость (при подключении реле как на рисунке 7.7); недостатком – низкая чувствительность из-за больших значений небаланса фильтра.

8 Особенности организации работы сетей 6-35 кВ при заземлении нейтрали через резистор

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

8.1.1 На вновь проектируемых ПС, как правило, используются кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, и присутствует необходимая степень резервирования и автоматизации распределительных электрических сетей, систем электропитания 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 не возможно, то применяется высокоомное резистивное заземление нейтрали при величинах токов замыкания меньше нормируемых ПУЭ.

Типовая схема сети 6-35 кВ строящейся или реконструируемой (с реконструкцией РУ 6-10 кВ) ПС представлена на рисунке 8.1.

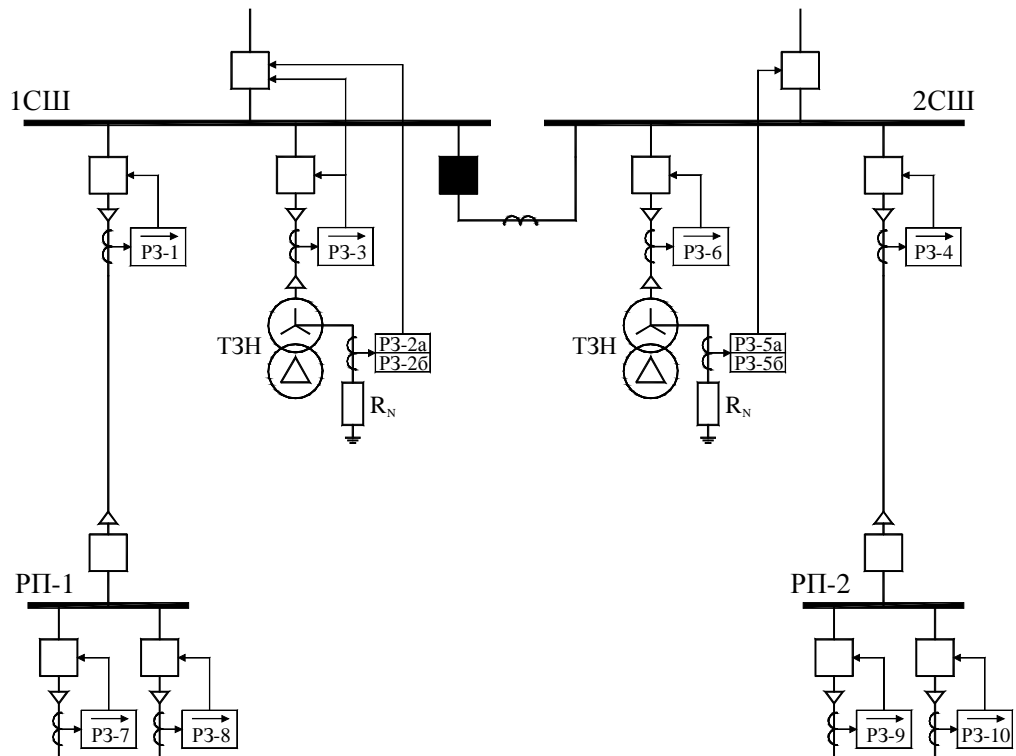


Рисунок 8.1 – Схема ПС в нормальном режиме

На каждой секции устанавливается ячейка заземляющего резистора.

8.1.2 В нормальном режиме работы секционный выключатель отключен, и заземление нейтрали на каждой секции шин осуществляется через свой резистор (см. рисунок 8.1). При ОЗЗ в сети, например, на отходящих присоединениях РП-1, оно отключается защитами отходящих присоединений РП-1 P3-7 и P3-8 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 запитывается 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 8.1 (далее по аналогии) обозначено: основная защита РЗ-2а, резервная защита – РЗ-2б.

При ОЗЗ на присоединении резистора комплект РЗ-2 отключает вводной выключатель с запретов АВР, или 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.

8.1.3 В аварийном или ремонтном режиме при питании обеих секций 6-35 кВ от одного трансформатора (см. рисунок 8.2) 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.

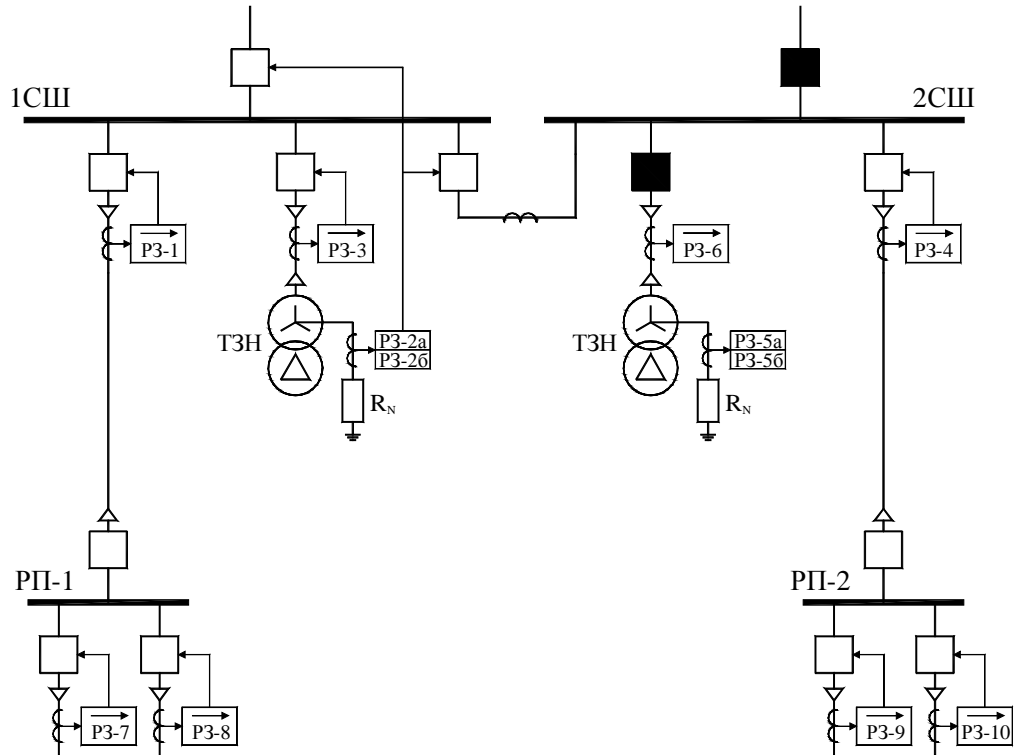


Рисунок 8.2 – Схема ПС в аварийном и ремонтном режиме

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.

8.1.3 При поэтапной реконструкции ПС (см. рисунок 8.3) допускается кратковременная работа секций с различными режимами заземления нейтрали только на период реконструкции при этом преимущество имеет режим с отключением поврежденного присоединения.

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

8.2.1 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 8.4), при ОЗЗ в сети ПС-2 должна в случае отсутствия или несрабатывания защит на ПС-2 срабатывать защита РЗ-8 при

наличии защит на РП-2 или защита РЗ-6 при их отсутствии. При этом ПС-1 возвращается в нормальный режим работы, а ПС-2 теряет питание.

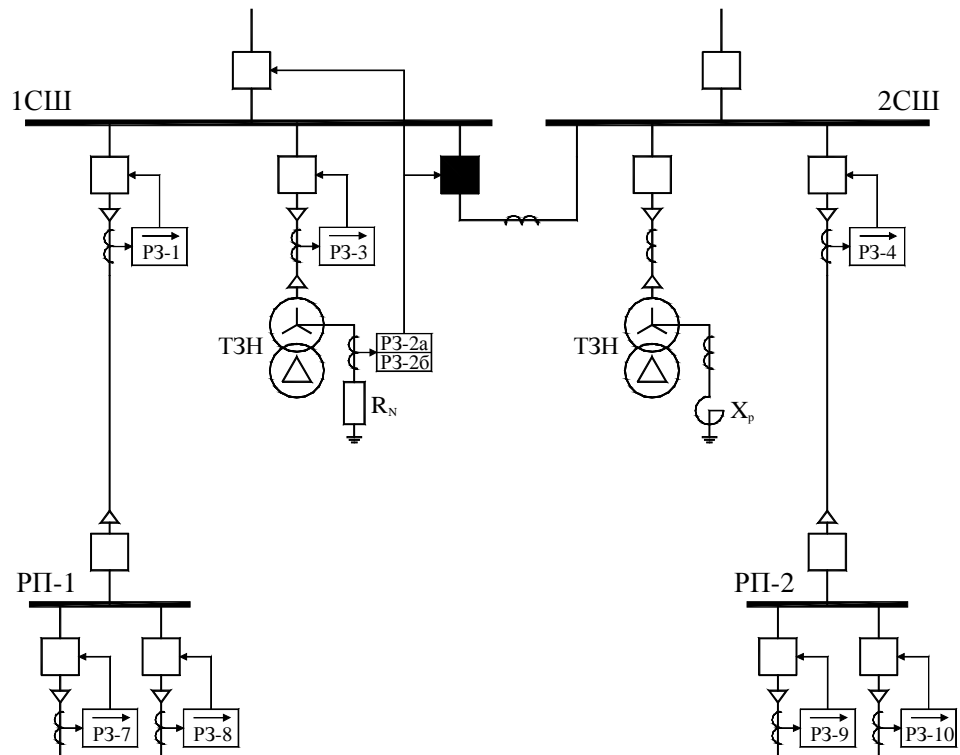


Рисунок 8.3 – Схема ПС при поэтапной реконструкции

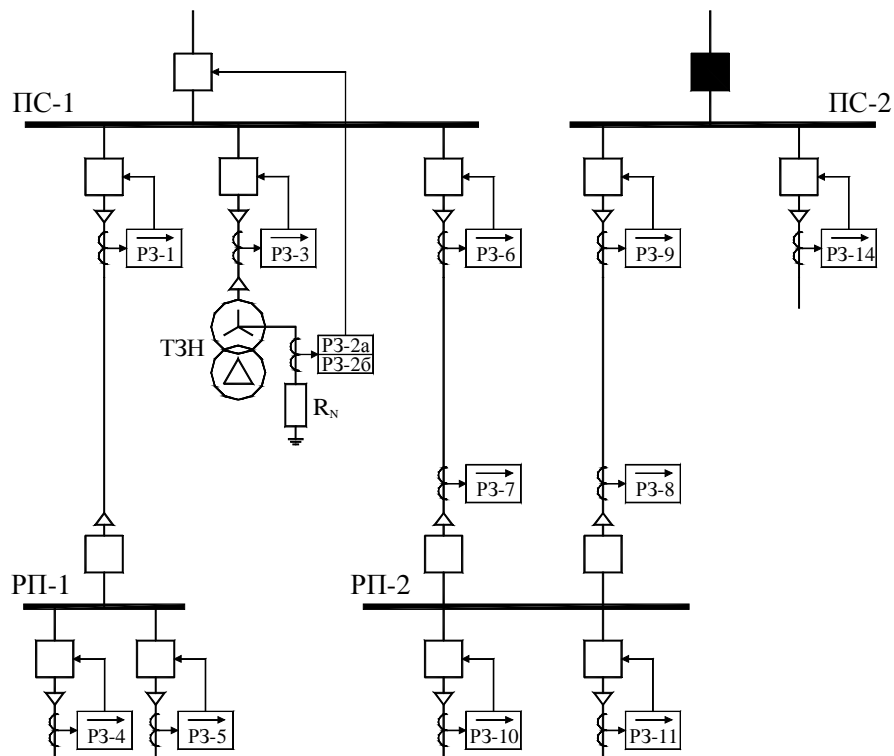


Рисунок 8.4 – Схема питания ПС-2 от ПС-1

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

8.2.2 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 8.5), то необходима установка на линии связи направленных токовых защит. Расчет уставок РЗ-6, РЗ-7, РЗ-8 и РЗ-9 выполняется как для линий с двухсторонним питанием.

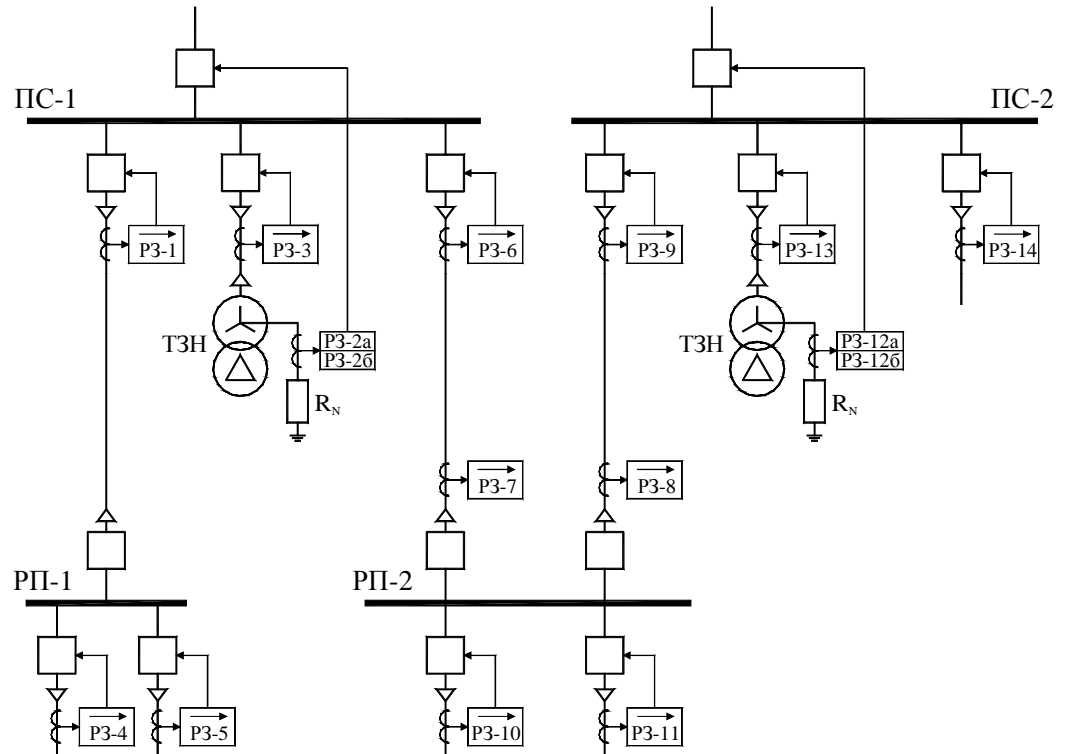


Рисунок 8.5 – Схема параллельной работы ПС-1 и ПС-2 с одинаковым режимом заземления нейтрали

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

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

8.2.3 При объединении на параллельную работу ПС-1 с низкоомным резистивным заземлением нейтрали и ПС-2 с высокоомным резистивным или резонансным заземлением нейтрали (см. рисунок 8.6) 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 (РЗ-7, РЗ-8) она остается в работе при ОЗЗ на одной из ПС, при отсутствии защит – отключается защитами РЗ-6 и РЗ-9.

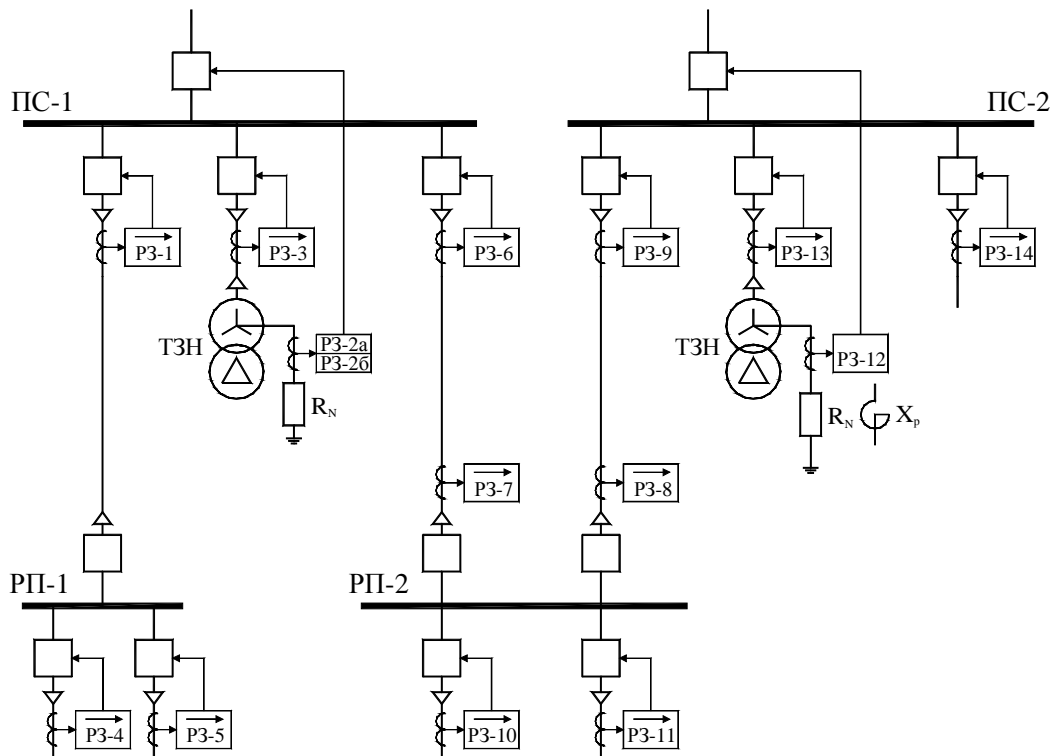


Рисунок 8.6 – Схема параллельной работы ПС-1 и ПС-2 с разными режимами заземления нейтралей

8.3 Защита от замыканий на землю параллельных кабельных линий

8.2.1 Для электроснабжения ряда ответственных потребителей (метрополи-тен, 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 [29].

Схема питания для данного случая приведена на рисунке 8.7.

8.3.2 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 РЗ-3, РЗ-4, РЗ-5 и РЗ-6. При небольших емкостных токах сети допускается применение ненаправленных защит со стороны питания (РЗ-3 и РЗ-4), что должно обосновываться расчетом. Кроме того, со стороны источника питания выполняется резервная защита от замыканий на землю (РЗ-7), реагирующая на сумму токов трансформаторов тока каждой линии.

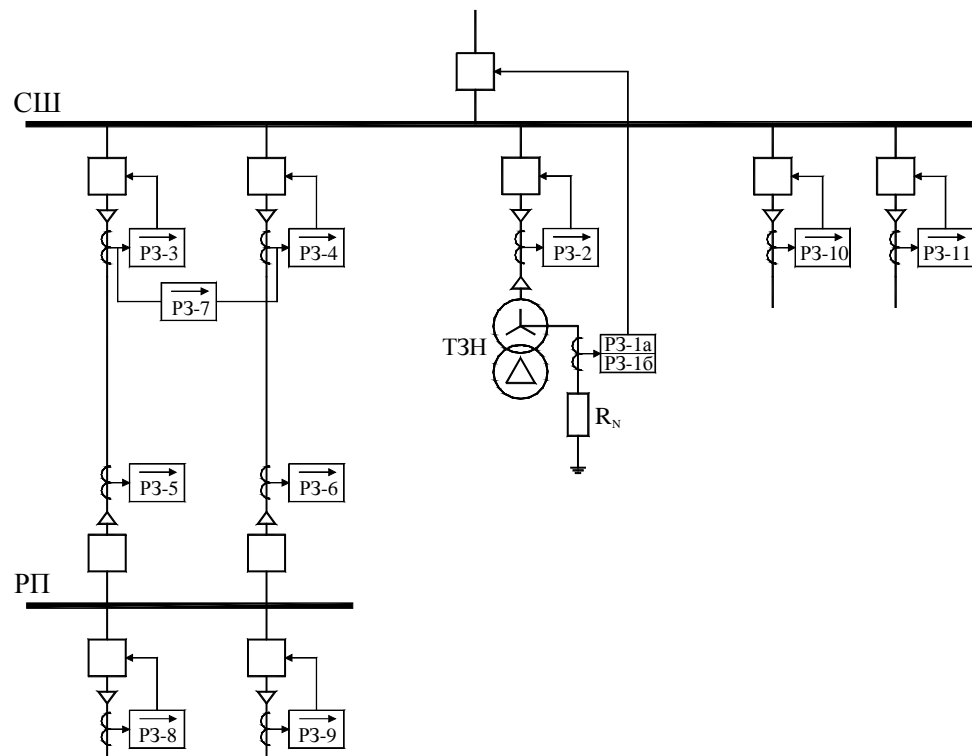


Рисунок 8.7 – Схема питания по параллельным кабельным линиям

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

8.3.4 Со стороны источника питания защиты кабельных линий P3-3 и P3-4 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.

8.3.5 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).

8.3.6 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.

8.4 Питание двух секций шин от одной обмотки силового трансформатора

8.4.1 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 8.8.

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 8.9);
- установка резисторов на каждой секции шин 6-10 кВ с одновременной работой одного резистора на две секции шин (рисунок 8.10);
- установка одного резистора на выводах обмотки силового трансформатора (рисунок 8.11).

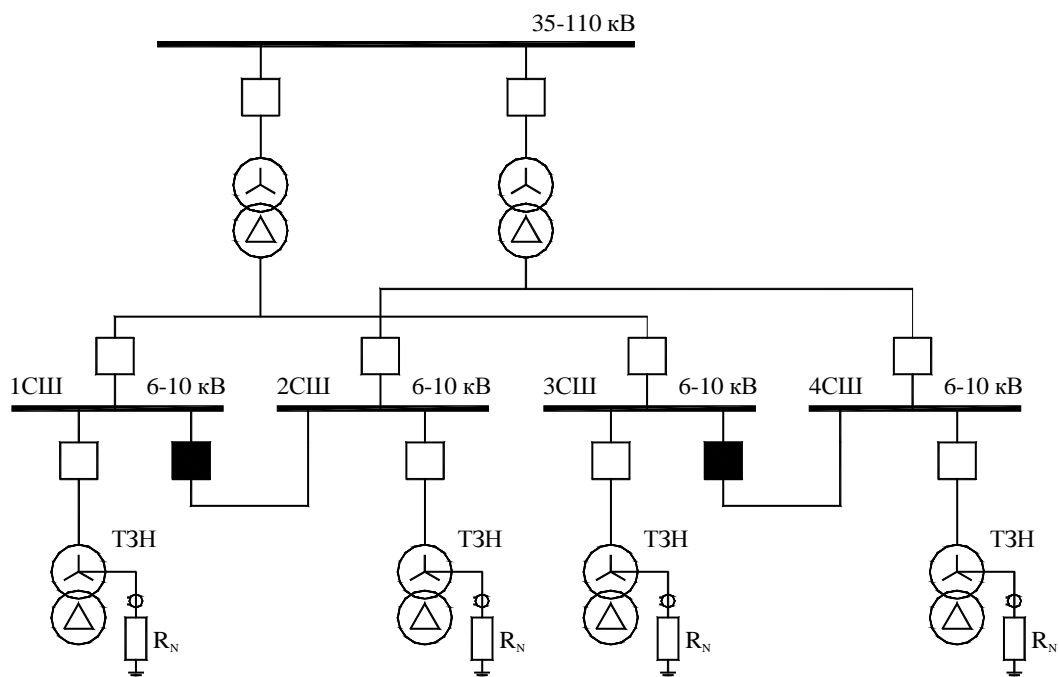


Рисунок 8.8 – Схема питания двух секций от одной обмотки силового трансформатора

8.4.2 Одновременная работа резисторов на обеих секциях шин (см. рисунок 8.9).

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.

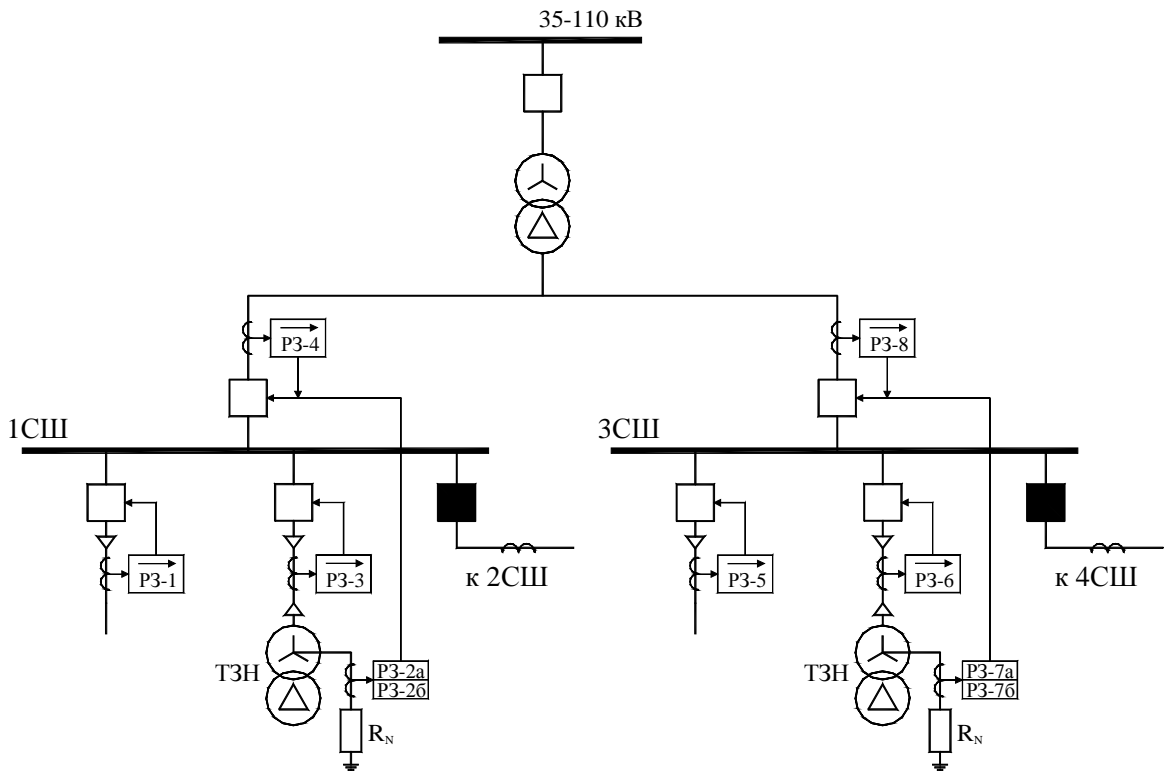


Рисунок 8.9 – Схема питания двух секций от одной обмотки силового трансформатора с одновременной работой резисторов на обеих секциях

При ОЗЗ на присоединении 1СШ должна действовать защита присоединения РЗ-1. При отказе выключателя или защиты РЗ-1 поврежденного присоединения и при повреждении на 1СШ или присоединении резистора 1 СШ отключается ввод 1СШ защитой РЗ-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 РЗ-4 и РЗ-8 не действуют, и повреждение отключается защитами РЗ-2 и РЗ-7, которые действуют на отключение вводных выключателей (секционных выключателей) своих секций, 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.

8.4.3 Одновременная работа одного резистора на две секции шин (см. рисунок 8.10).

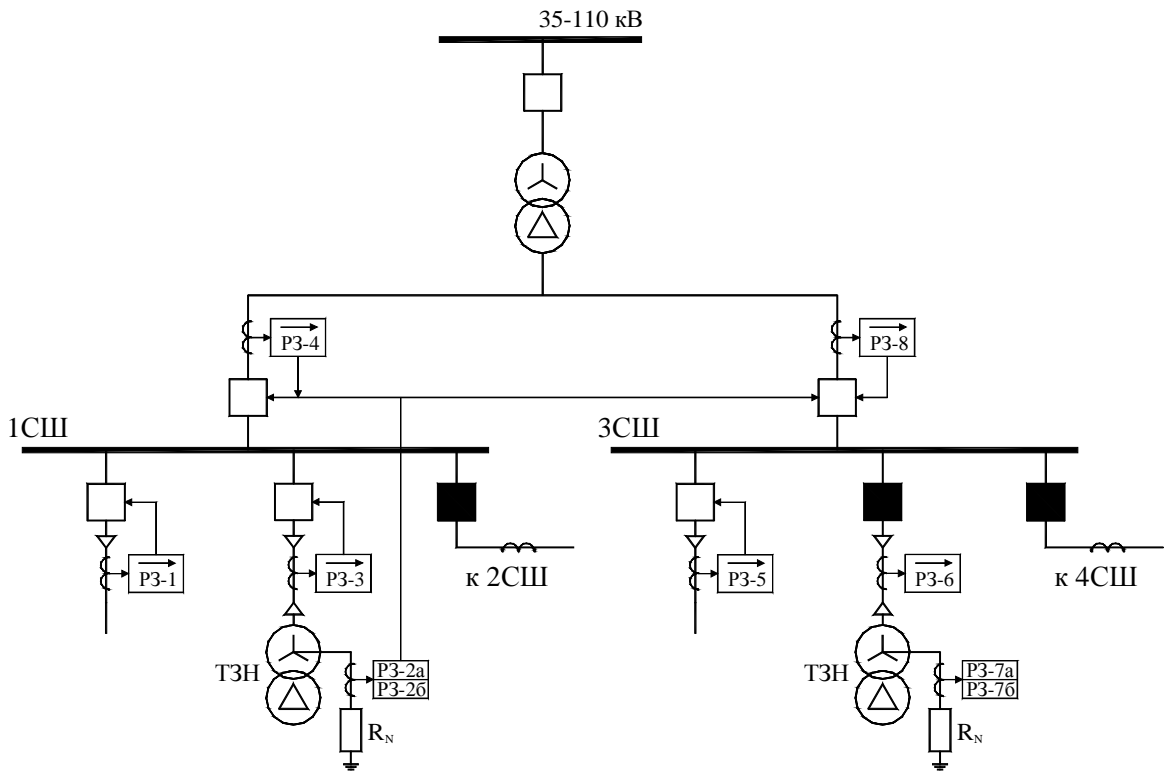


Рисунок 8.10 – Схема питания двух секций от одной обмотки силового трансформатора с работой одного резистора на две секции шин

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 P3-5. При отказе выключателя или защиты P3-5 поврежденного присоединения и при повреждении на 3СШ отключается ввод 3СШ защитой P3-8, 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 P3-1. При отказе выключателя или защиты P3-1 поврежденного присоединения и при повреждении на 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. После отключения ввода 1СШ должен быть выполнен АВР резистора 3СШ.

При ОЗЗ на ошиновке силового трансформатора защиты P3-4 и P3-8 не действуют, и повреждение отключается защитой P3-2, которая действует на отключение вводных выключателей 1СШ и 3СШ, с выдержкой времени на ступень селек-

тивности 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.

8.4.4 Установка резистора на выводах обмотки силового трансформатора (см. рисунок 8.11).

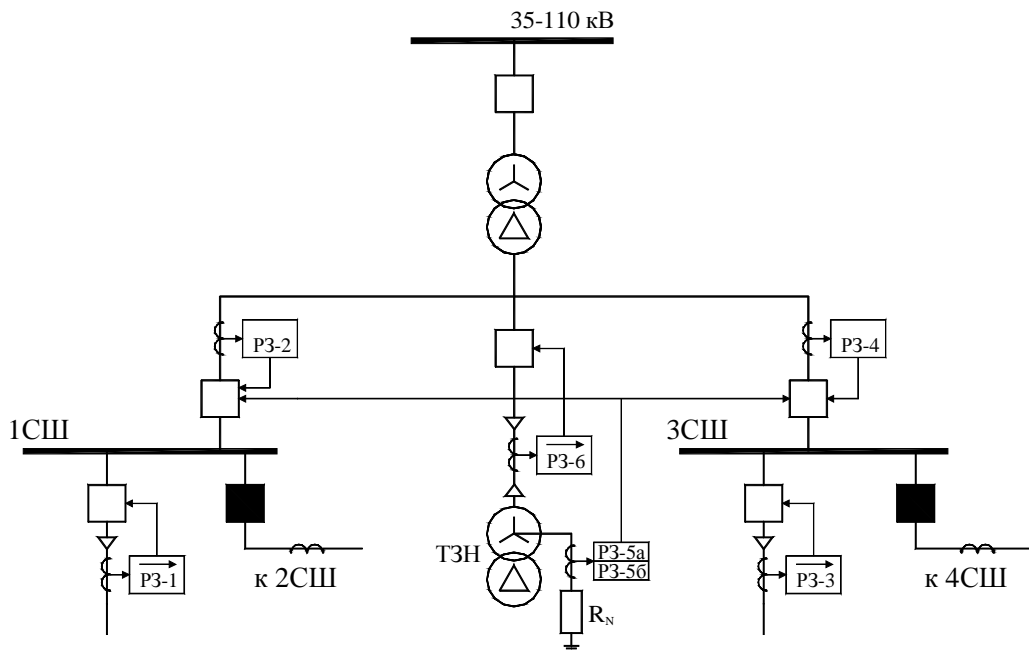


Рисунок 8.11 – Схема питания двух секций от одной обмотки силового трансформатора с установкой резистора на выводах обмотки силового трансформатора

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

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.

9 Технико-экономическое обоснование целесообразности резистивного заземления нейтрали сетей 6-35 кВ

9.1 Основные положения

9.1.1 В странах мира, где внедрена система резистивного заземления нейтрали сетей, основным критерием её внедрения является возможность осуществления резервного питания потребителей при ОЗЗ на данном присоединении.

9.1.2 На данном начальном этапе перевода сетей 6-35 кВ Белорусской энергосистемы с изолированной нейтралью на заземлённую через резистор нейтраль решение о целесообразности резистивной системы заземления нейтрали должно приниматься организациями ГПО «Белэнерго», в ведении которых находятся сети 6-35 кВ.

Для принятия такого решения могут быть использованы аргументы, которые приведены в п.9.2.

9.2 Аргументы по технико-экономическому обоснованию целесообразности резистивного заземления нейтрали сетей 6-35 кВ

9.2.1 При технико-экономическом обосновании целесообразности резистивного заземления нейтрали сетей 6-35 кВ необходимо исходить из следующих основных факторов:

- изменение технических параметров сетей 6-35 кВ;
- повышение срока службы изоляции;
- дополнительные затраты на заземление нейтрали сетей 6-35 кВ через резистор;

– электробезопасность.

9.2.2 Фактор изменения технических параметров сетей 6-35 кВ

При заземлении нейтрали сетей 6-35 кВ через резистор по сравнению с изолированной нейтралью изменяются технические параметры сети:

- увеличивается ток однофазного замыкания на землю;
- снижается уровень перенапряжений как минимум в 1,5-2,0 раза;
- уменьшается продолжительность воздействия перенапряжений на изоляцию с нескольких часов до нескольких секунд.

9.2.3 Фактор повышения срока службы изоляции сетей 6-35 кВ

9.2.3.1 При заземлении нейтрали сетей 6-35 кВ через низкоомный резистор в случаях ОЗЗ повреждённое присоединение отключается при номинальных параметрах резисторов в течение 2 с, что ограничивает продолжительность воздействия перенапряжений на изоляцию.

В связи с этим, при ОЗЗ в условиях резистивного заземления нейтрали снижается вероятность пробоя изоляции на неповреждённых присоединениях и, как прямое следствие, общее число ОЗЗ. При этом следует учитывать, что при изолированной нейтрали сетей 6-35 кВ с воздушными сетями доля повреждений изоляции от дуговых и феррорезонансных перенапряжений составляет $\approx 15\%$, а в сетях с кабельными линиями $\approx 90\%$.

9.2.3.2 Из литературных источников следует, что расход внутреннего ресурса изоляции при воздействии импульсов перенапряжений в сети при резистивном заземлении нейтрали сети 6-35 кВ не менее, чем в 2 раза ниже, чем в сети с изолированной нейтралью.

При этом исключение возможности феррорезонансных перенапряжений повышает надёжность работы измерительных трансформаторов напряжения и снижает не только простой сети из-за их повреждений по указанной причине, но и вероятность несрабатывания релейных защит при повреждениях элементов сети.

9.2.4 Фактор дополнительных затрат на заземление нейтрали сетей 6-35 кВ

9.2.4.1 Для включения резистора в нейтрали сетей 6-35 кВ необходимы капитальные затраты на:

- проектирование перехода сети на режим заземлённой через резистор нейтрали;
- приобретение специального трансформатора для включения резистора, резистора, трансформаторов тока для нейтрали и всех отходящих линий, реле защиты, блоков питания схем защиты и автоматики;
- монтаж ячейки с трансформатором для подключения резистора;
- установку ТТНП либо монтаж третьего трансформатора тока на каждой из отходящих линий напряжением 6-10 кВ;
- монтаж и наладка релейной защиты и автоматики.

9.2.4.2 Отмеченные дополнительные капитальные затраты на установку резистора оправдываются:

– снижением расходов на изготовление фазной изоляции (в существующей сети напряжением 6-35 кВ данный эффект не может быть реализован);

– увеличением долговечности изоляции за счёт снижения уровней и продолжительностей воздействия на неё перенапряжений; необходимо иметь в виду, что дуговые перенапряжения распространяются по всей сети, подключённой к данной секции шин, что увеличивает вероятность пробоя ослабленных участков изоляции на других линиях;

– повышением надёжности работы измерительных трансформаторов напряжения в результате исключения возможности феррорезонансных перенапряжений.

9.2.5 Фактор электробезопасности

Быстрое отключение линий при однофазных замыканиях на землю снижает степень опасности поражения электрическим током людей и животных, оказавшихся вблизи места ОЗЗ.

Приложение А

(справочное)

Технические характеристики резисторов и трансформаторов 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).

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
Сопротивление 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	
	Rp=500 Ом	Rp=1000 Ом		Rp=500 Ом	Rp=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 (ВхLхН)	1000 x 800 x 1800 мм

Резисторы типа РЗ рассчитаны на время воздействия наибольшего фазного напряжения до 6 часов, что позволяет обходиться без автоматики и защит 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

А.2 Трансформаторы для подключения резисторов

В качестве трансформаторов заземления нейтрали используются ненагруженные силовые трансформаторы (ТЗН) или трансформаторы собственных нужд (ТСН) со схемой соединения обмоток Y_0/Δ (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.

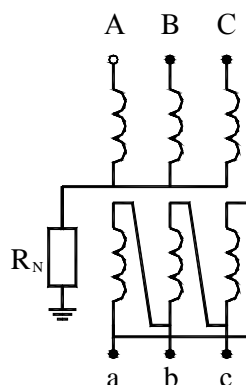


Рисунок А.1 – Схема подключения резистора в нейтраль ТЗН и ТСН

Параметры трансформаторов, необходимые для выбора ТЗН (ТСН) приведены в таблице А.6.

Таблица А.6 – 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.6

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
ТМ-100/10	100	10	5,8	4,5	19,7	40,7
ТМ-160/10	160	10	9,2	4,5	10,9	28,1
ТМ-250/10	250	10	14,4	4,5	5,92	17,0
ТМ-320/10	320	10	18,5	5,5	6,05	16,1
ТМ-400/10	400	10	23,1	4,5	3,44	10,7
ТМ-400/10	400	10	23,1	5,5	3,44	13,3
ТМ-630/10	630	10	36,4	5,5	1,91	8,73
ТМ-1000/10	1000	10	57,7	5,5	1,22	5,36
ТМ-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 маслонаполненный трехфазный трансформатор, не имеющий низковольтной вторичной обмотки и с обмоткой высшего напряжения выполненной по схеме «зиг-заг» (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.

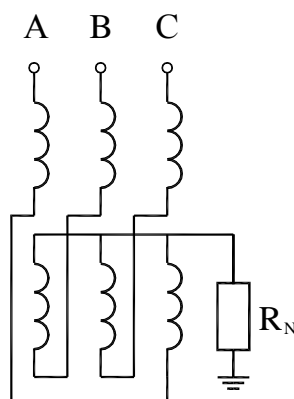


Рисунок А.2 – Схема подключения резистора через ФМЗО

Параметры, необходимые для выбора ФМЗО приведены в таблице А.7.

Таблица А.7 – 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 %).							

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).

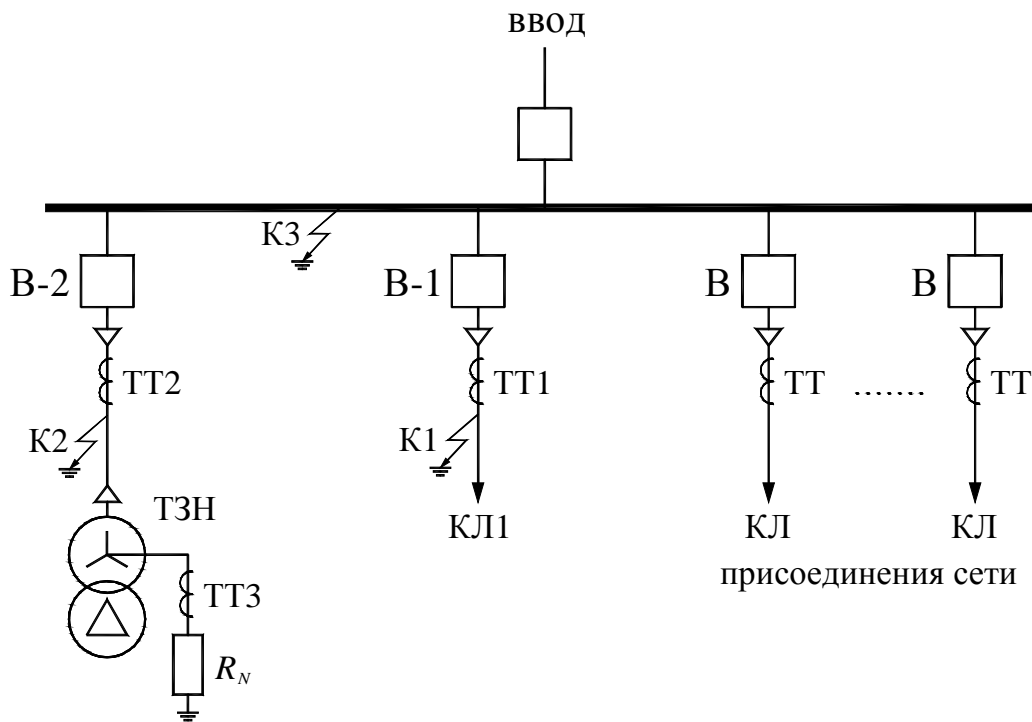


Рисунок 3.1 – Расчетная схема сети

Полный ток в точке повреждения будет равен

$$I_{\Sigma}^{(1)} = \frac{3U_0}{z_{0\Sigma}}, \text{ А}, \quad (\text{Б.1})$$

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.

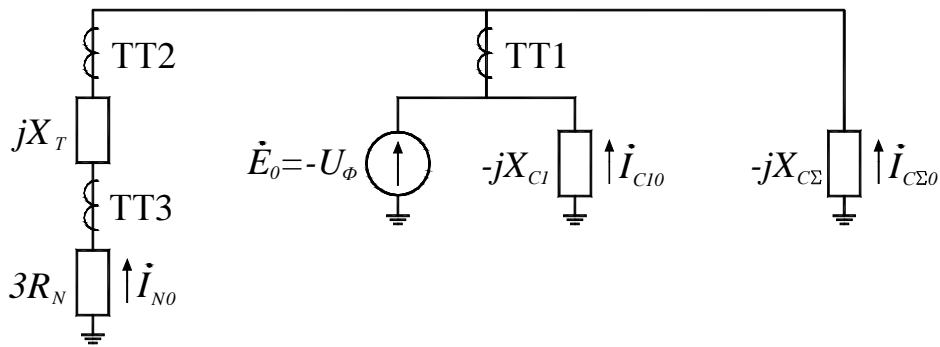


Рисунок Б.2 – Схема замещения при замыкании на землю на отходящем присоединении

Полный ток замыкания на землю для этого случая будет:

$$I_{\zeta}^{(1)} = 3I_0 = 3(I_{N0} + I_{N\Sigma 0} + I_{N10}) = I_N + I_{N\Sigma} + I_{N1}, \text{ А}, \quad (\text{Б.2})$$

где I_N , $I_{C\Sigma}$, 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:

$$I_{\text{оо1}} = I_N + I_{N\Sigma}, \text{ А}; \quad (\text{Б.3})$$

$$I_{\text{оо2}} = I_{\text{оо3}} = I_N, \text{ А}. \quad (\text{Б.4})$$

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

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

где R_N – активное сопротивление заземляющего резистора, Ом;

X_T – индуктивное сопротивление трансформатора заземления нейтрали, Ом;

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

Значение сопротивления трансформатора определяется формулой:

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

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 сопротив-

лением 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:

$$\mathbf{I}_D = \frac{U_\phi}{Z_N}, \text{ А.} \quad (\text{Б.7})$$

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

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

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

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

где X_{C1} – емкостное сопротивление поврежденного присоединения;
 C_1 – емкость поврежденного присоединения.

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

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

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

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

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

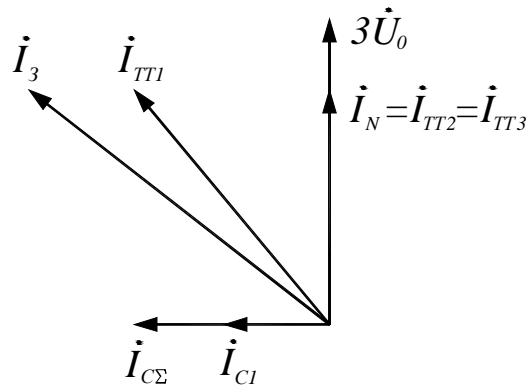


Рисунок Б.3 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю на отходящем присоединении

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:

$$\dot{I}_{\text{CT}1} = -\dot{I}_{N1} = -j3U_{\text{O}}\omega C_1, \text{ A}; \quad (\text{Б.13})$$

$$\dot{I}_{\text{CT}2} = \dot{I}_{N\Sigma} + \dot{I}_{N1} = j3U_{\text{O}}\omega(C_{\Sigma} + C_1), \text{ A}; \quad (\text{Б.14})$$

$$\dot{I}_{\text{CT}3} = \dot{I}_N = \frac{U_{\text{O}}}{Z_N}, \text{ A}. \quad (\text{Б.15})$$

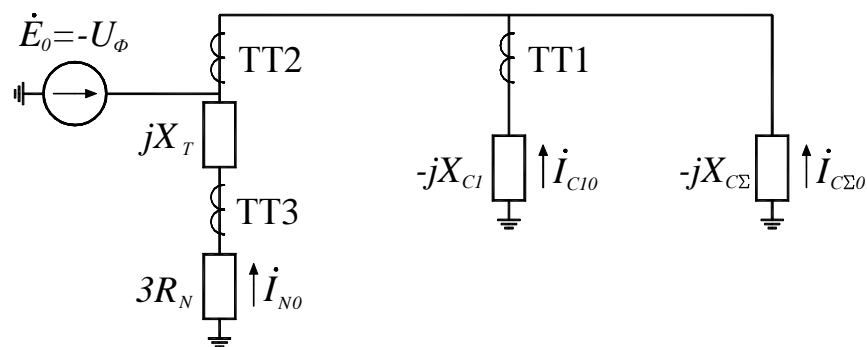


Рисунок Б.4 – Схема замещения при замыкании на землю на кабеле заземляющего резистора

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

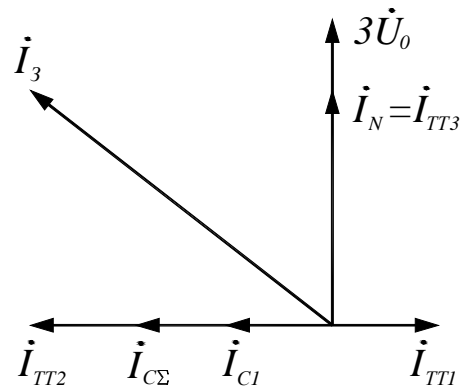


Рисунок Б.5 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю на кабеле заземляющего резистора

Б.4 Повреждение на шинах (точка К3).

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

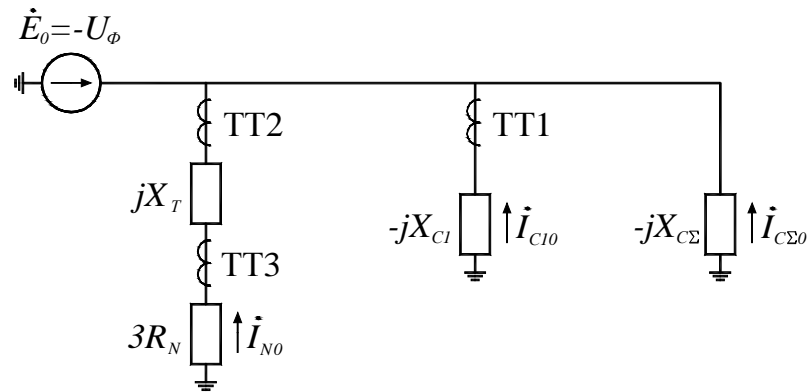


Рисунок Б.6 – Схема замещения при замыкании на землю на шинах

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

$$\dot{I}_{C01} = -\dot{I}_{N1} = -j3U_{\phi} \omega C_1, \text{ А}; \quad (\text{Б.16})$$

$$\dot{I}_{C02} = \dot{I}_{C03} = \dot{I}_N = \frac{U_{\phi}}{Z_N}, \text{ А}. \quad (\text{Б.17})$$

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

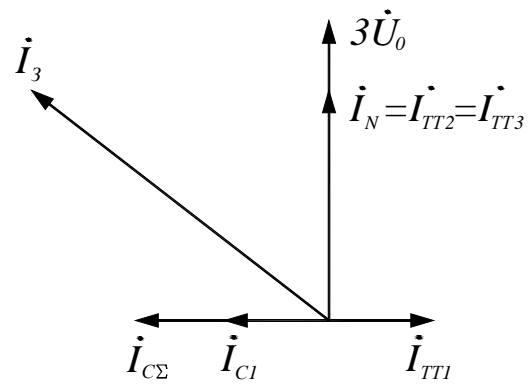


Рисунок Б.7 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю на шинах

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 использованием источников [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

$$I_{\tilde{N}\zeta} \geq k_i \cdot k_{\dot{\alpha}\delta} \cdot I_{C10\max}, \text{ А.} \quad (\text{В.1})$$

где k_n – коэффициент надежности;

$k_{\dot{\sigma}p}$ – 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:

$$k_n = 1,2;$$

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

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

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

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

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

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

$$k_{\cdot} = \frac{I_C}{I_{\tilde{N}\zeta}}, \quad (\text{В.2})$$

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:

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

$k_{\psi} \geq 2$ – 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

$$I_{\tilde{N}\zeta} \geq k_i \cdot (k_{\dot{a}\delta} \cdot I_{C10\max} + I_{i\dot{a}}), \text{ А}, \quad (\text{В.3})$$

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

На практике выбор уставки срабатывания защиты отходящего присоединения целесообразно осуществлять по требуемому коэффициенту чувствительности k_{ψ} . Тогда ток срабатывания защиты определяется по выражению

$$I_{\tilde{N}\zeta} = \frac{I_{\min}}{k_{\psi}}, \text{ А}. \quad (\text{В.4})$$

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

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

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

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

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:

$$k_{\pm} = \frac{I_C}{I_{\tilde{N}\zeta}}, \quad (\text{В.7})$$

где I_3 – 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:

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

$k_{\pm} \geq 2$ – 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 $I_{ТТ1}$ (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 $I_{C\Sigma}$. Угол между напряжением нулевой последовательности и током $I_{ТТ1}$ находится в диапазоне

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

На рисунке $I'_{ТТ1}$ обозначен ток, протекающий через защиту при ОЗЗ вне защищаемого присоединения.

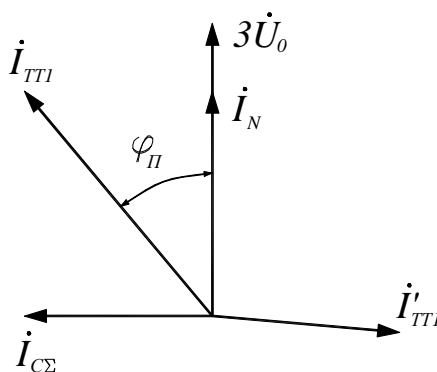


Рисунок В.1 – Векторная диаграмма токов и напряжений при ОЗЗ в сети

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

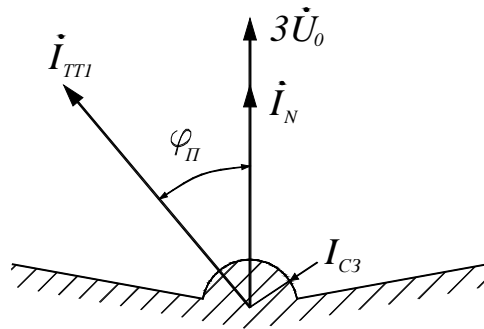


Рисунок В.2 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю на отходящем присоединении и область срабатывания защиты, реагирующей на активную составляющую тока нулевой последовательности

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.

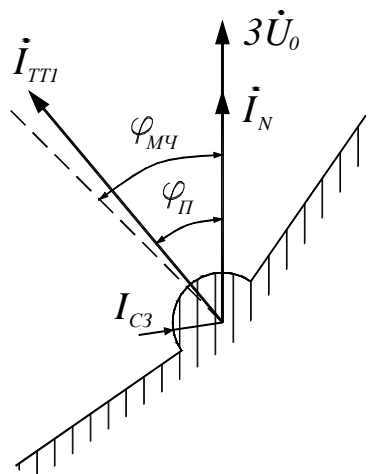


Рисунок В.3 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю на отходящем присоединении и область срабатывания защиты, реагирующей на полный ток нулевой последовательности

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 длительно

тельное 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.

$$t_{C3} = t_{C3.РП\max} + \Delta t, \text{ с,} \quad (\text{В.10})$$

где Δt – 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 целесообразным введение небольшой выдержки времени порядка 0,3÷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:

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

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 Δt – 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.

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:

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

где t_D – 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).

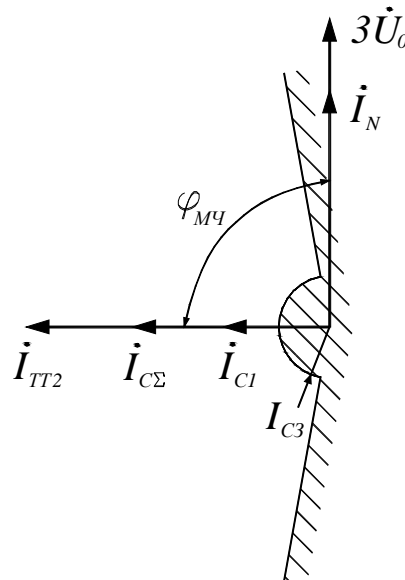


Рисунок В.4 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю в кабеле заземляющего резистора

В.3.2 Определение тока срабатывания защиты.

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

В.3.4 Определение времени срабатывания защиты.

Время срабатывания защиты принимается равным нулю:

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

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 [8].

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 ²	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 ²	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 ²	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 ²	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, использованы источники [16,33-36].

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

$$I_{i \dot{a}.0\ddot{a}} \dot{I} = k_{i \ddot{a}i} \cdot \varepsilon \cdot I_{\dot{E}C_{max}}, \text{ А,} \quad (\text{Д.1})$$

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

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

I_{K3max} – максимальный ток междуфазного КЗ, который будет протекать по фильтру.

Ток небаланса ТТНП определяется в соответствии по выражению

$$I_{i \dot{a}.0\ddot{a}} \dot{I} = I_{i \dot{a}.300} \cdot \frac{I_{\dot{E}C_{max}}}{300}, \text{ А,} \quad (\text{Д.2})$$

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 ФНП 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 [35]:

$$U_{i\dot{a}\dot{o}\dot{f}} = \frac{U_{\dot{o}} \cdot f_U}{2}, \text{ В}, \quad (\text{Д.3})$$

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.

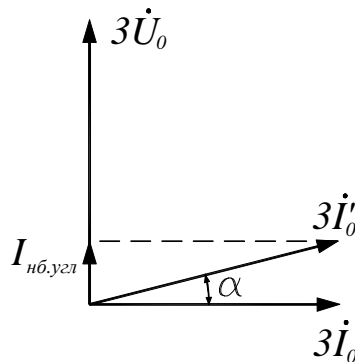


Рисунок Д.1 – Появление тока небаланса при наличии угловой погрешности

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 α , как это показано на рисунке Д.1, то появится соответствующий небаланс. При этом защита будет ощущать активный ток $I_{нб,угл}$, равный проекции вектора тока $3I'_0$ на вектор напряжения $3U_0$. При этом модуль тока небаланса $I_{нб,угл}$ составит:

$$I_{i\dot{a}\dot{o}\dot{f}} = 3 \cdot I_0 \cdot \sin \alpha, \text{ А}, \quad (\text{Д.4})$$

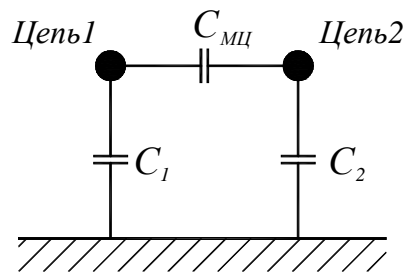
где α – суммарная угловая погрешность измерительных трансформаторов тока, напряжения и датчиков защиты.

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_1 – емкость относительно земли трех фаз влияющей линии;
 C_2 – емкость относительно земли всех трех фаз рассматриваемой линии;
 $C_{мц}$ – межцепная емкость.

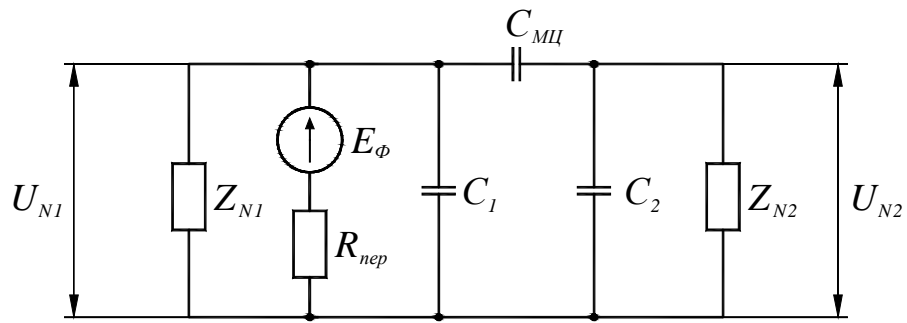
Рисунок Д.2 – Схема емкостной связи параллельных линий

Схема замещения в общем виде представлена на рисунке Д.3

Ток в рассматриваемой цепи (небаланса) будет равен

$$I_{i \dot{a} \dot{a} \dot{a}} = jw \left[(U_{N1} - U_{N2}) C_i \dot{\sigma} - U_{N2} C_3 \right], \text{ А}, \quad (\text{Д.5})$$

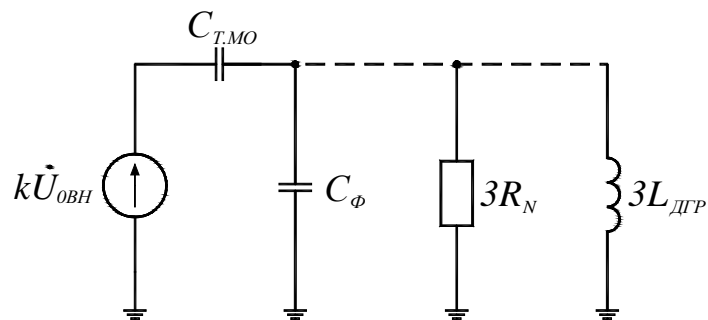
$$\text{где } U_{N2} = U_{N1} \cdot \frac{jw C_2 Z_{N2}}{1 + jw Z_{N2} (C_2 + C_3)}, \text{ В.}$$



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.



$C_{ТМО}$ – межобмоточная емкость трансформатора (для одной фазы);
 C_{ϕ} – 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 выражение (Д.39) для определения значения напряжения смещения нейтрали (небаланса) сети низшего напряжения U_{OH} . 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.

$$U_{i\dot{a}\dot{o}} = \frac{kU_{0\dot{A}\dot{i}}}{\sqrt{\left(1 + \frac{C_{\dot{o}}}{C_{\dot{o}\dot{i}\dot{i}}} + \frac{1}{3w^2L_{\dot{A}\dot{A}\dot{B}\dot{D}}C_{\dot{o}\dot{i}\dot{i}}\right)^2 + \left(\frac{1}{3R_NwC_{\dot{o}\dot{i}\dot{i}}}\right)^2}}, \text{ В,} \quad (\text{Д.6})$$

где U_{0BH} – 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_{0BH} по обмотке высшего напряжения трансформатора (приближенно $k = 1$ 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_{ϕ} 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 Д.5. В схеме предполагается, что все сопротивления и токи приведены к одному напряжению.

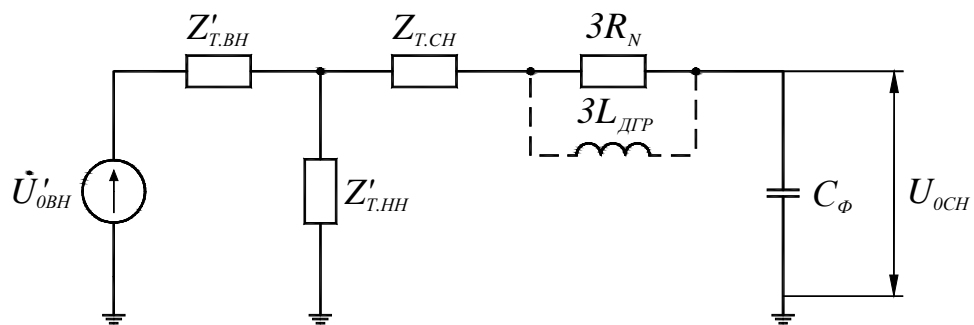


Рисунок Д.5 – Расчетная схема замещения

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 .

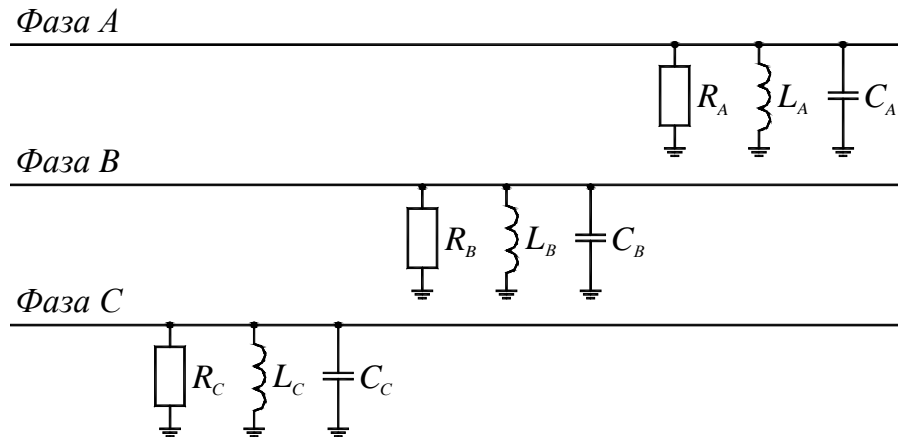


Рисунок Д.6 – Элементы расчетной схемы сети

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

$$U_{\text{нб.нес.}Z} = \frac{U_A Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N}, \text{ В}, \quad (\text{Д.8})$$

$$\text{где } Y_A = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{j\omega L_A} + j\omega C_A; \quad Y_B = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{j\omega L_B} + j\omega C_B;$$

$$Y_C = \frac{1}{R_C} + \frac{1}{j\omega L_C} + j\omega C_C; \quad Y_N = \frac{1}{Z_N}.$$

Ток небаланса, протекающий в нейтрали может быть найден по выражению

$$I_{\text{нб.нес.}Z} = \frac{U_{\text{нб.нес.}Z}}{Z_N}, \text{ А}. \quad (\text{Д.9})$$

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:

$$U_{\text{нб.нес.}E} = U_0 = \frac{E_{\text{нес}} Y_{\Phi} Z_N}{1 + 3Y_{\Phi} Z_N}, \text{ В}, \quad (\text{Д.10})$$

$$I_{\text{нб.нес.}E.N} = 3I_0 = \frac{E_{\text{нес}} Y_{\Phi}}{1 + 3Y_{\Phi} Z_N}, \text{ А}, \quad (\text{Д.11})$$

где $Y_{\Phi} = j\omega C_{\Phi}$ – фазная емкостная проводимость;

$E_{\text{нес}} = E_A + E_B + E_C$ – 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:

$$I_{\text{нб.нес.Е.ЛЭП}} = 3I_0 = \frac{U_0 C_{\Phi i}}{Z_N C_{\Phi \Sigma}}, \text{ А}, \quad (\text{Д.12})$$

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 нейтралях понижающих трансформаторов приводит к тому, что смещение их нейтралей вызывает появление дополнительного небаланса токов $I_{\text{нб.нагр}}$ и напряжений $U_{\text{нб.нагр}}$ нулевой последовательности.

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

- небаланс напряжения на нейтрали

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

- небаланс тока в нейтрали

$$I_{\text{нб.}N} = I_{\text{нб.}ТНП} (I_{\text{нб.}ФТНП}) + I_{\text{нб.угл}} + I_{\text{нб.нагр}} + I_{\text{нб.нес.}E.N} + I_{\text{нб.нагр}}, \text{ А}; \quad (\text{Д.14})$$

- небаланс тока в линии

$$\begin{aligned}
 I_{\text{нб.ЛЭП}} = I_{\text{нб.ТТП}} (I_{\text{нб.ФТП}}) + I_{\text{нб.угл}} + I_{\text{нб.пар}} + I_{\text{нб.нес.Z}} + \\
 + I_{\text{нб.нес.Е.ЛЭП}} + I_{\text{нб.нагр}}
 \end{aligned}
 \quad , \text{ А.} \quad (\text{Д.15})$$

Библиография

- [1] Правила устройства электроустановок, 6 издание, переработанное и дополненное, 1985 г.
- [2] Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах.—М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959 г.
- [3] Peters J.E., Slepian J. Voltage induced by arcing ground.-AIEE, 1923, № 42
- [4] Сиротинский Л. Л. Перенапряжения и защита от перенапряжений в электрических установках.—М., Госэнергоиздат, 1932 г.
- [5] Лихачев Ф. Л. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов.— М.: Энергия. 1971 г.
- [6] Сирота И.М., Кисленко С.П., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей. - Киев, Наук. думка, 1985 г.
- [7] Ульянов С. Л. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.—М.: Энергия, 1964 г.
- [8] СО 09110.20.361-04. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрической сети 6-35 кВ. – Мн., Белэнерго, 2004 г.
- [9] Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. М. - Энергоатомиздат, 1984 г.
- [10] Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. М. – Энергоатомиздат, 1987 г.
- [11] Короткевич М.А., Повышение надежности электрических сетей при внедрении современной техники. – Международная научно-техническая конференция «Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования», Выпуск 3, Минск, 2004 г.
- [12] Короткевич М.А., Окраменко А.Ю. Выбор мощности заземляющего трансформатора для подключения в нейтраль сети напряжением 10 кВ высокоомного резистора. – Труды третьей всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ», Новосибирск, 2004 г.
- [13] Ильиных М.В., Сарин Л.Н., Челазнов А.А. Основные положения по выбору номиналов резисторов для заземления нейтралей сетей 6-35 кВ. – Труды третьей всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ», Новосибирск, 2004 г.
- [14] 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.

- [15] Виштибеев А.Б. Эффективность резистивного заземления нейтрали в кабельных электрических сетях 6-10 кВ. – Труды второй всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ», Новосибирск, 2002 г.
- [16] Шабад М.А. Обзор режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ России. - Энергетик, 1999 г., №3
- [17] Целебровский Ю.В. Резисторы для заземления нейтрали сетей 6-35 кВ. – Доклады научно-технической конференции "Режимы заземления нейтрали сетей 3-6-10-35 кВ". Новосибирск, 2000 г.
- [18] Алексей Шалин. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит. – СПб. Новости Электротехники, №3(33) 2005 г.
- [19] Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Поляков В.С, Подпоркин Г.В., Таджибаев А.И. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений. – СПб: «Энергоатомиздат», 2002 г.
- [20] ГОСТ 12.1.038-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Система стандартов безопасности труда. Часть 3. – М.: ИПК "Издательство стандартов", 1996 г.
- [21] СТП 09110.47.203-07 Методические указания по выполнению заземления на электрических станциях и подстанциях напряжением 35-750 кВ, Минэнерго РБ, 2007 г.
- [22] СТП 09110.47.103-07 Методические указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 35-750 кВ, Минэнерго РБ, 2007 г.
- [23] В.И. Глушко, О.Е. Ямный, Э.П. Ковалев, Д.Н. Зайцев Системы заземления нейтрали электрических сетей 6-35 кВ и условия электробезопасности в сетях среднего и низкого напряжения. – Мн. Техника без опасности, №2 2004 г.
- [24] Виктор Глушко, Олег Ямный, Эдуард Ковалев, Николай Бохан. Белорусские сети 6-35 кВ переходят на режим заземления нейтрали через резистор. – СПб. Новости Электротехники, №3(39) 2006 г.
- [25] Шабад М. А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ. — М.: НТФ "Энергопрогресс", 2007 г.
- [26] Кискачи В.В. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях напряжением 6-10 кВ с различным режимом заземления нейтрали типа ЗЗН. – М.: ИПКГосслужбы, 2004 г.
- [27] Сирота И. М. Защита от замыканий на землю в электрических системах.— Киев: Изд-во АН УССР, 1955 г.
- [28] 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.

- [29] Вопросы обеспечения защиты от замыканий на землю в распределительных сетях с резистивно заземленной нейтралью. – Материалы семинара, Минск, 2007 г.
- [30] Реле микропроцессорные МР700, МР730, МР 740. Защиты и автоматики ввода, отходящей линии, двигателя, секционного выключателя. Руководство по эксплуатации. Версия 1.15 от 19.01.2009 г.
- [31] Методика расчета уставок защит Seram. – Техническая коллекция Schneider Electric, №3, 2006 г.
- [32] Алексей Шалин, Елена Кондранина. Защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ. Расчет уставок направленных защит. – СПб. Новости Электротехники, №6(42), 2006 г.
- [33] Алексей Шалин, Андрей Хабаров. Защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ. Небалансы. – СПб. Новости Электротехники, №3(39), №4(40), №5(41), 2006 г.
- [34] Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110–500 кВ. Расчеты. – М.: Энергия, 1980 г.
- [35] Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. – Киев: Наукова Думка, 1983 г.
- [36] Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 5. Защита блоков генератор-трансформатор и генератор-автотрансформатор. – М.-Л.: Энергия, 1963 г.
- [37] Андрей Ширковец, Леонид Сарин, Михаил Ильиных, Виктор Подъячев, Алексей Шалин. Резистивное заземление нейтрали в сетях 6-35 кВ с СПЭ-кабелями. Подходы к выбору резисторов и принципам построения защиты от ОЗЗ. – СПб. Новости Электротехники, №2(50), 2008 г.
- [38] Назаров В. В. Оптимизация режима нейтрали распределительных сетей с малыми токами замыканий на землю. - Энергетик, 1978 г., № 7