ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ФЕДЕРАЛЬНАЯ ГИДРОГЕНЕРИРУЮЩАЯ КОМПАНИЯ-
РУСГИДРО»
(ПАО «РУСГИДРО»)

СТАНДАРТ ОРГАНИЗА-ЦИИ

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫБОРУ РЕЖИМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НАПРЯЖЕНИЕМ 6 – 35 кВ

СТО РусГидро 01.01.157-2025

Настоящий стандарт не подлежит применению
до его утверждения

Красноярск – 2025

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации», а правила применения стандартов организаций – ГОСТ Р 1.4-2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения».

Сведения о стандарте

1 РАЗРАБОТАН	ООО «Болид»
2 ВНЕСЕН	Департаментом технического регулирования в соответствии с рекомендацией Комиссии по техническому регулированию ПАО «РусГидро» (протокол от 22.12.2025 № 79)
3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ	приказом ПАО «РусГидро» от 12.02.2026 № 109
4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ	

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения ПАО «РусГидро»

Содержание

1.Область применения 1
2.Нормативные ссылки 2
3.Термины и определения 5
4.Сокращения 8
5.Методология применения различных режимов нейтрали и принципы защиты от перенапряжений 9
6.Заземление нейтрали электроустановок через ДГР для компенсации емкостного тока 19
7.Высокоомное заземление нейтрали 22
8.Комбинированное заземление нейтрали 25
9.Низкоомное заземление нейтрали 28
10.Выбор нейтралеобразующих устройств 33
11.Схемы включения дугогасящих реакторов и резисторов в нейтраль электроустановок 37
12.Технические требования к силовому оборудованию для заземления нейтрали и автоматике управления устройствами компенсации ёмкостного тока 45
13.Принципы организации релейной защиты от замыканий на землю в электрических сетях с различными режимами заземления нейтрали 51
Приложение А (справочное) Способы определения тока замыкания на землю в электроустановках 6-35 кВ 61
Приложение Б (справочное) Методика расчета тока замыкания на землю в электроустановках 6-35 кВ 66
Приложение В (рекомендуемое) Выбор уставок токовых защит от ОЗЗ 69
Приложение Г (справочное) Централизованные устройства защиты от ОЗЗ (системы ОПФ) 77
Библиография 85

Введение

Стандарт организации ПАО «РусГидро» «Руководящие указания по выбору режима заземления нейтрали электроустановок напряжением 6 – 35 кВ» (далее – Стандарт) разработан в соответствии с требованиями Федерального закона от 29.06.2016 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».

Настоящий Стандарт является локальным нормативным актом (документом) ПАО «РусГидро», устанавливающим рекомендации в виде руководящих указаний по выбору режима заземления нейтрали электроустановок напряжением 6 – 35 кВ с целью обеспечения их надежной, безопасной и экономически эффективной эксплуатации.

Настоящий Стандарт разработан с целью установления единого подхода к выбору режима заземления нейтрали, критериям выбора типа резистивного заземления нейтрали, выбора оборудования заземления нейтрали электроустановок напряжением 6-35 кВ организаций ПАО «РусГидро».

Стандарт разработан в соответствии с требованиями действующих нормативных правовых актов, нормативно-технических документов, относящихся к области применения Стандарта.

С Т А Н Д А Р Т П А О « Р у с Г и д р о »

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫБОРУ РЕЖИМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НАПРЯЖЕНИЕМ 6 – 35 кВ

Дата введения –

1 Область применения

1.1 Стандарт является руководящим документом, разработанным для методологического обеспечения технических служб, административного и управленческого персонала ПАО «РусГидро».

1.2 Настоящий Стандарт устанавливает основные положения, требования и указания по выбору и реализации режима заземления нейтрали сетей 6-35 кВ электрических станций (ГЭС/ГАЭС, ТЭС, ТЭЦ), блоков генератор-трансформатор, распределительных электрических сетей и объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВЭС, ПЭС, ГеоЭС, СЭС и др.) ПАО «РусГидро».

1.3 Стандарт определяет требования, способы и средства по повышению надежности энергоснабжения электроустановок 6-35 кВ для создания эффективной системы защиты от перенапряжений и организации селективной и чувствительной работы релейной защиты при всех видах замыканий на землю, а также служит для решения задач, связанных с необходимостью снижения затрат на текущий и капитальный ремонт кабельных линий (КЛ), силовых и измерительных трансформаторов и другого оборудования.

1.4 Настоящий Стандарт обязателен к применению в качестве актуальных норм и правил при разработке технической документации (конструкторской, технологической, проектной, рабочей), в том числе технических условий, для целей технического перевооружения, модернизации, реконструкции и нового строительства в электроустановках 6-35 кВ ПАО «РусГидро».

1.5 Стандарт предназначен для обязательного применения в ПАО «РусГидро».

Подконтрольные организации ПАО «РусГидро» применяют требования Стандарта после присоединения к Стандарту и всем последующим изменениям к нему и признания Стандарта в качестве локального нормативного акта (документа).

1.6 Требования Стандарта обязательны для выполнения сторонними организациями и физическими лицами, выполняющими работы (оказывающими услуги) в области его применения по договорам с ПАО «РусГидро» и (или) с его филиалами, подконтрольными организациями, если такое обязательство закреплено в заключаемых с ними договорах.

1.7 Обязательность применения требований Стандарта ограничена их деятельностью на объектах, расположенных в Российской Федерации, владельцами или инвесторами (застройщиками) которых являются ПАО «РусГидро» и (или) его подконтрольные организации.

1.8 Применение требований Стандарта для целей зарубежной экономической деятельности определяется соответствующим международным соглашением.

1.9 При расхождении требований настоящего СТО с требованиями других изданных до его утверждения СТО организации и (или) иных локальных нормативных документов Общества в области, регламентируемой настоящим Стандартом, следует руководствоваться требованиями настоящего Стандарта.

При введении в действие (внесении изменений) в нормативные правовые и (или) нормативные технические акты, а также при внесении организацией-изготовителем оборудования изменений в конструкторскую документацию, требования которых отличаются от приведенных в Стандарте, следует руководствоваться требованиями вновь введенных (измененных) документов до внесения в Стандарт соответствующих изменений.

2 Нормативные ссылки

Настоящий Стандарт разработан на основе следующих нормативных правовых актов, нормативно-технической документации и документов по стандартизации:

- Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике»;
- Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации»;
- Требования к релейной защите и автоматике различных видов и ее функционированию в составе энергосистемы (утверждены приказом Минэнерго России от 10.07.2020 № 546);
- Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (ПТЭ ЭСиС) (утверждены приказом Минэнерго России от 04.10.2022 № 1070);

- Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Издание седьмое (утверждены приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204);
- ГОСТ Р 12.1.038-2024. Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 22.05.2024 № 629-ст);
- ГОСТ 8024-90. Государственный стандарт СССР. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний (утвержден и введен в действие постановлением Госстандарта СССР от 27.03.1990 № 611) с Изменением № 1 (введено в действие приказом Росстандарта от 20.09.2022 № 956-ст);
- ГОСТ 8865-93 (МЭК 85-84). Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация (введен в действие постановлением Госстандарта Российской Федерации от 02.06.1994 № 160);
- ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013). Межгосударственный стандарт. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP) (введен в действие приказом Росстандарта от 10.06.2016 № 604-ст);
- ГОСТ 15150-69. Межгосударственный стандарт. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды (утвержден постановлением Госстандарта СССР от 29.12.1969 № 1394) с Изменением № 5 (введено в действие приказом Росстандарта от 27.11.2012 № 1231-ст);
- ГОСТ 19431-2023. Межгосударственный стандарт. Энергетика и электрификация. Термины и определения (введен в действие приказом Росстандарта от 24.10.2023 № 1218-ст);
- ГОСТ 20911-89. Государственный стандарт СССР. Техническая диагностика. Термины и определения (утвержден постановлением Госстандарта СССР от 26.12.1989 № 4143);
- ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (введен в действие приказом Росстандарта от 22.07.2013 № 400-ст) с Изменением № 1 (введено в действие приказом Росстандарта от 25.10.2023 № 1224-ст);

- ГОСТ Р 50571.4.44-2019 (МЭК 60364-4-44:2007). Национальный стандарт Российской Федерации. Электроустановки низковольтные. Часть 4.44. Защита для обеспечения безопасности. Защита от резких отклонений напряжения и электромагнитных возмущений (утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 09.04.2019 № 126ст);
- ГОСТ Р 57114-2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электроэнергетические системы. Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике и оперативно-технологическое управление. Термины и определения (утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 29.12.2022 № 1683-ст);
- ГОСТ Р 54130-2010. Национальный стандарт Российской Федерации. Качество электрической энергии. Термины и определения (утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 21.12.2010 № 840-ст).

П р и м е ч а н и е – При пользовании настоящим Стандартом целесообразно проверить действие указанных ссылочных документов по стандартизации в информационной системе общего пользования – на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет или по ежегодно издаваемому этим органом информационному указателю национальных стандартов, который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, а также по соответствующим ежемесячно издаваемым информационным указателям, которые опубликованы в текущем году. Если ссылочный документ по стандартизации заменен (изменен), то при пользовании настоящим Стандартом следует руководствоваться замененным (измененным) документом. Если ссылочный документ по стандартизации отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем Стандарте применены следующие термины в соответствии с ГОСТ Р 57114-2022, ГОСТ 19431-2023, ГОСТ Р 54130-2010, ГОСТ 32144-2013, ГОСТ 20911-89, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 Аварийный режим работы: режим работы, сопровождающийся отклонением рабочих параметров от предельно-допустимых значений, характеризующийся повреждением, выходом из строя энергооборудования, возможным длительным перерывом энергоснабжения или представляющий угрозу жизни людей.

3.2 Бесперебойное электроснабжение: режим, при котором возможные кратковременные перерывы питания по своей продолжительности не приводят к расстройству технологического процесса и существенному ущербу производства.

3.3 Высокоомное резистивное заземление нейтрали электроустановки: резистивное заземление нейтрали, выполняемое преимущественно с целью обеспечения длительной работы электроустановок с однофазным замыканием на землю (на время поиска и отключения поврежденного присоединения оперативным персоналом) без перенапряжений и феррорезонансных явлений.

3.4 Высокоомный резистор заземления нейтрали: резистор заземления нейтрали, применяемый, как правило, для обеспечения длительной работы электроустановок в режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) с ограничением перенапряжений и подавлением феррорезонансных явлений.

3.5 Длительно-допустимый ток низкоомного резистора заземления нейтрали: максимально допустимая величина тока, которая протекает через низкоомный резистор заземления нейтрали без риска его термического разрушения в течение длительного времени.

3.6 Дуговое однофазное замыкание на землю: замыкание на землю, сопровождающееся неустойчивым горением дуги в месте повреждения.

3.7 Дуговое перенапряжение: перенапряжение, возникающее при горении дуги в месте повреждения изоляции между фазой и заземленным элементом.

3.8 Заземляющее устройство: совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

3.9 Кабельная линия электропередачи: линия для передачи электроэнергии или отдельных ее импульсов, состоящая из одного или нескольких параллельных кабелей с соединительными, стопорными и концевыми муфтами (заделками) и крепежными деталями.

3.10 Комбинированное заземление нейтрали: заземление нейтрали через ДГР и резистор.

3.11 Направленная токовая защита от однофазных замыканий на землю: защита, реагирующая на ток и напряжение нулевой последовательности, а также электрический угол между ними. Защита подключается к фильтру токов и фильтру напряжения нулевой последовательности.

3.12 Напряжение несимметрии сети: напряжение на нейтрали относительно земли в сети, работающей с изолированной нейтралью, при отсутствии замыкания на землю.

3.13 Напряжение смещение нейтрали сети – напряжение на нейтрали относительно земли в сети, работающей с компенсацией емкостного тока, при отсутствии замыкания на землю.

3.14 Ненаправленная токовая защита от однофазных замыканий на землю: защита, реагирующая на ток нулевой последовательности. Защита подключается к трансформатору (фильтру) токов нулевой последовательности.

3.15 Низкоомное резистивное заземление нейтрали электроустановки: резистивное заземление нейтрали, выполняемое с целью ограничения дуговых перенапряжений, быстрого и селективного отключения однофазного замыкания на землю и максимального охвата обмоток электрических машин защитой от однофазного замыкания на землю.

3.16 Низкоомный резистор заземления нейтрали: резистор заземления нейтрали, основной целью которого является обеспечение необходимой величины тока ОЗЗ для селективного срабатывания РЗ на отключение в течение минимально возможного времени, а также ограничение перенапряжений при дуговых ОЗЗ и подавление феррорезонансных явлений.

3.17 Номинальный ток резистора заземления нейтрали: максимально допустимая величина тока, протекающего через резистор заземления нейтрали, при номинальном напряжении резистора. Номинальный ток высокоомного резистора заземления нейтрали определяется при длительном (не менее 6 часов) замыкании на землю. Номинальный ток низкоомного резистора определяется при кратковременном (как правило, 10 секунд) замыкании на землю.

3.18 Потребитель электрической энергии: электроприемник или группа электроприемников, объединенных технологическим процессом и размещающихся на определенной территории.

3.19 Перенапряжение: повышение напряжения между фазным проводником и землей или между фазными проводниками с амплитудой, превышающей соответствующую амплитуду наибольшего рабочего напряжения для оборудования.

3.20 Режим заземления нейтрали электроустановок 6-35 кВ: способ устройства нейтрали, при котором в нейтрали отсутствует какое-либо оборудование, либо в нейтраль включено оборудование (дугогасящий реактор, резистор, или их комбинация), влияющее на величину тока однофазного замыкания на землю.

3.21 Резистивное заземление нейтрали электроустановки: преднамеренное электрическое соединение нейтрали специального заземляющего трансформатора или генератора с заземляющим устройством через активное сопротивление.

3.22 Релейная защита от замыканий на землю: разновидность релейной защиты, способная фиксировать факт возникновения однофазных замыканий на землю, выявлять и при необходимости отключать повреждённое присоединение.

3.23 Сшитый полиэтилен: изоляционный материал, получаемый путем применения пероксидной или силановой технологии для улучшения технических характеристик полиэтиленовой изоляции, используется при производстве современных силовых кабелей.

3.24 Средний класс напряжения: класс напряжения, при котором значение номинального напряжения превышает 1 кВ, но не превышает 35 кВ.

3.25 Твердая полимерная изоляция (далее по тексту – «полимерная изоляция»): это материалы на основе полимеров, которые используются для изоляции кабелей. К полимерной изоляции в данном Стандарте относятся следующие виды изоляции: из поливинилхлорида (ПВХ), сшитого полиэтилена (СПЭ) и этиленпропиленовой резины (ЭПР).

3.26 Феррорезонансные явления: процессы, сопровождающиеся перенапряжениями и сверхтоками в обмотках измерительных трансформаторов напряжения, в результате насыщения стали сердечника трансформатора и резонанса в схеме емкость электрооборудования – индуктивность намагничивания трансформатора.

3.27 Эксплуатация: стадия жизненного цикла энергетического оборудования или энергетических сооружений, на которой реализуется, поддерживается или восстанавливается его качество.

3.28 Электрическая сеть: совокупность электроустановок для передачи и распределения электрической энергии, состоящая из подстанций, распределительных устройств, токопроводов, воздушных и кабельных линий электропередачи, работающих на определенной территории.

3.29 Электроснабжение: обеспечение потребителей электрической энергией.

3.30 Электроустановка: энергоустановка, предназначенная для производства или преобразования, передачи, распределения и потребления электрической энергии.

3.31 Энергоустановка: комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, предназначенный для производства, преобразования, передачи, накопления, распределения или потребления электрической энергии.

4 Сокращения

В настоящим Стандарте применены следующие обозначения и сокращения:

АВР	-	автоматическое включение резерва
АПВ	-	автоматическое повторное включение
БПИ	-	бумажная пропитанная изоляция
ВЛ	-	воздушная линия электропередач
ГРУ	-	главное распределительное устройство
ДГР	-	дугогасящий реактор
ДН	-	делитель напряжения
ЗРУ	-	закрытое распределительное устройство
ЗУ	-	заземляющее устройство
КЗ	-	короткое замыкание
КЛ	-	кабельная линия
КНП	-	контур нулевой последовательности
КРУ	-	комплектное распределительное устройство
МЭК	-	международная электротехническая комиссия
НП	-	нулевая последовательность
ОЗЗ	-	однофазное замыкание на землю (дуговое или «металлическое»)
ОПН	-	ограничитель перенапряжений нелинейный
ОПФ	-	определение поврежденного фидера

ОРУ	-	открытое распределительное устройство
ПС	-	подстанция
ПТЭ ЭСиС	-	Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ
ПВХ	-	поливинилхлорид
РЗА	-	релейная защита и автоматика
РП	-	распределительный пункт
РТП	-	распределительная трансформаторная подстанция
СПЭ	-	сшитый полиэтилен
ТЗН	-	трансформатор для заземления нейтрали
ТН	-	трансформатор напряжения
ТП	-	трансформаторная подстанция
ТСН	-	трансформатор собственных нужд
ТТ	-	трансформатор тока
ТТНП	-	трансформатор тока нулевой последовательности
ТЭЦ	-	теплоэлектроцентраль
ФНП	-	фильтр нулевой последовательности
ЦП	-	центр питания
ЭПР	-	этиленпропиленовая резина

5 Методология применения различных режимов нейтрали и принципы защиты от перенапряжений

5.1 В электроустановках 6-35 кВ применяются следующие режимы заземления нейтрали:

- изолированная нейтраль;
- нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор;
- нейтраль, заземленная через резистор;
- нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор и резистор (комбинированное заземление нейтрали).

5.2 При модернизации, реконструкции, техническом перевооружении и новом строительстве электроустановок напряжением 6-35 кВ необходимо рассматривать применение схем с изолированной нейтралью, заземленной через ДГР с автоматической компенсацией емкостных токов; нейтралью, заземленной через резистор, а также с комбинированным заземлением нейтрали.

5.3 Режим изолированной нейтрали допускается применять в электрических сетях 6-35 кВ, в том числе схемах собственных нужд электростанций, гальванически отделенных от шин генераторного напряжения трансформатором собственных нужд (кроме схем с кабелями с полимерной изоляцией) при обосновании отсутствия необходимости мер по ограничению перенапряжений и демпфирования феррорезонансных процессов.

5.4 Заземление нейтрали через ДГР применятся для компенсации емкостных токов ОЗЗ, превышающих нормативно закрепленные для введения компенсации в ПТЭ ЭСиС, при длительной работе электроустановок в режиме ОЗЗ.

Перед вводом в работу ДГР на конкретной ЭС или ПС требуется разработать инструкцию по ведению режима компенсации емкостных токов замыкания на землю для конкретного распределительного устройства, в которой будут отражены особенности настройки и контроля параметров ДГР и КНП в вероятных режимах эксплуатации, а также процедуры вывода в ремонт оборудования для заземления нейтрали.

Для электроустановок с заземленной через ДГР нейтралью не исключается возможность возникновения дуговых перенапряжений, опасных для изоляции электрооборудования, в случае возникновения расстройки компенсации. Для снижения перенапряжений при дуговых ОЗЗ необходимо применять комбинированное заземление нейтрали через ДГР и высокоомный резистор.

Основными нарушениями, которых следует избегать в сетях с компенсацией емкостных токов замыкания на землю, являются:

- ведение режима с недокомпенсацией;
- отыскание места повреждения поочередным отключением линий (из-за отсутствия селективных защит), что приводит к значительным расстройкам компенсации;
- оперирование сначала выключателями трансформаторов, к которым подключены ДГР, а потом уже разъединителями самих ДГР (рекомендуется применение блокировки выключателя трансформатора при включенном разъединителе ДГР);
- включение в работу поврежденного фидера в режиме ОЗЗ для поиска абонентами у себя поврежденного фидера аналогичными методами.

5.5 Высокоомное резистивное и комбинированное заземление нейтрали применяются, если допускается длительная работа в режиме ОЗЗ для поиска и отключения поврежденного присоединения оперативным персоналом.

Высокоомное резистивное заземление нейтрали применяется при емкостных токах ОЗЗ, не превышающих нормативно закрепленные для

введения компенсации в ПТЭ ЭСиС значения, приведённые в п.6.1 настоящего Стандарта.

Комбинированное заземление нейтрали через ДГР и высокоомный резистор применяется при емкостных токах ОЗЗ, превышающих нормативно закрепленные для введения компенсации в ПТЭ ЭСиС и приведённые в п.6.1 настоящего Стандарта.

При этом номинал резистора выбирается по условию ограничения перенапряжений и предотвращения развития резонансных явлений.

Данные режимы нейтрали предполагают действие релейной защиты от ОЗЗ, как правило, на сигнал, но по решению владельца объекта электроэнергетики действие релейной защиты на отключение может быть реализовано как повсеместно, так и лишь на некоторых присоединениях РУ ЭС, ПС и РП (РТП) при наличии технической возможности (резервирования или допустимости перерыва электроснабжения), наличия кабелей с полимерной изоляцией, а также необходимости отключения ОЗЗ до перехода в КЗ (например, в случае высокой повреждаемости сетей, когда длительное удержание ОЗЗ приводит к переходу в КЗ с тяжелыми последствиями для оборудования).

5.6 Комбинированное заземление нейтрали через высокоомный резистор на объектах электросетевых предприятий показывает наибольшую эффективность в воздушных и воздушно-кабельных сетях, особенно при значительной емкостной несимметрии, обусловленной различным расположением проводов фаз на ВЛ, и/или применении ступенчатых ДГР, из-за сложности обеспечить точную настройку компенсации в определенных случаях, что приводит к высоким перенапряжениям при ОЗЗ [1]. В таких сетях, как правило, быстрое отключение ОЗЗ не предусмотрено.

5.7 Низкоомное резистивное заземление нейтрали применяется в случаях, когда ОЗЗ должно быть селективно отключено в течение минимально возможного времени (доли и единицы секунд). Суммарный ток ОЗЗ, определяемый с учетом активного тока от резистора, должен быть достаточным для обеспечения устойчивого горения заземляющей дуги и обеспечения требуемой чувствительности релейной защиты на отключение фидера с ОЗЗ. При этом обеспечивается глубокое ограничение перенапряжений и нарушение условий существования резонансных явлений, приводящих к повышению фазных напряжений.

5.8 Комбинированное заземление нейтрали через ДГР и коммутируемый резистор применяется для организации селективного определения поврежденного присоединения с действием релейной защиты на сигнал или отключение.

5.9 Применение резисторов для заземления нейтрали электроустановок 6-35 кВ позволяет [2-5]:

- снизить перенапряжения при дуговых ОЗЗ до уровня, неопасного для изоляции оборудования, испытанного по нормам [6];
- снизить вероятность развития аварий с многоместными повреждениями;
- ликвидировать опасные феррорезонансные явления, приводящие к повреждениям трансформаторов напряжения;
- снизить напряжение смещения нейтрали до допустимого уровня в соответствии с требованиями ПТЭ ЭСиС (длительно – не более 15% от фазного напряжения в сети с ДГР);
- устранить биения фазных напряжений с амплитудой до (1,8– 2,0)$U_{фmax}$, возникающих после погасания дуги при существенных расстройках компенсации ДГР;
- снизить накопление дефектов в изоляции и, как следствие, уменьшить вероятность и количество возникновения повреждений;
- снизить апериодические составляющие в токах и напряжениях при ОЗЗ;
- улучшить условия для быстрой самоликвидации ОЗЗ (в кабельных сетях с кабелями БПИ);
- создать условия для улучшения селективности защит от замыканий на землю с действием на сигнализацию или отключение;
- реализовать определение поврежденного фидера с контролем активной составляющей тока от резистора, протекающей только в поврежденном присоединении;
- использовать ОПН для ограничения коммутационных перенапряжений с более глубоким уровнем ограничения (с меньшими значениями наибольшего рабочего и остающегося напряжения).

5.10 Ликвидация феррорезонансных перенапряжений в электроустановках 6-35 кВ гарантированно достигается при использовании ДГР и/или резисторов.

Антирезонансные трансформаторы напряжения не подвержены явлению феррорезонанса, но не исключают возможность развития таких процессов при наличии в электрически связанной сети электромагнитных ТН, в конструкции которых не предусмотрены меры против феррорезонанса.

5.11 Уровень ограничения перенапряжений характеризуется коэффициентом K_U, который представляет отношение максимального напряжения (перенапряжения) на неповрежденных фазах в переходном режиме ОЗЗ $U_{ПЕР}$ к амплитудному значению наибольшего фазного напряжения $U_{Фmax}$:

$$K_U = \frac{U_{\text{ПЕР}}}{U_{\Phi max}}, \quad (5.1)$$

В электроустановках с изолированной нейтралью и заземлённых через ДГР при наличии расстройки компенсации в режиме дугового ОЗЗ уровень перенапряжений достигает K_U = 3,0÷3,4. Длительное воздействие перенапряжений при удержании режима ОЗЗ в электроустановках с изолированной нейтралью приводит к возникновению многоместных повреждений, междуфазных КЗ, сокращению ресурса изоляции и уменьшению срока службы электрооборудования.

В качестве значения, определяющего безопасный уровень перенапряжений при ОЗЗ для изоляции электрооборудования, принимается значение $K_U \leq 2,6$ (определяется электрооборудованием с наименьшим уровнем электрической прочности высоковольтной изоляции – вращающимися машинами, исходя из уровней испытательных напряжений).

Требуемая степень защиты изоляции электроустановок от дуговых перенапряжений при однофазном замыкании на землю наиболее эффективно обеспечивается применением резистивного заземления нейтрали. При низкоомном резистивном заземлении нейтрали достигается глубокое ограничение перенапряжений $K_U \leq 1,8÷2,2$; в электроустановках с высокоомным и комбинированным (высокоомный резистор параллельно ДГР) – $K_U \leq 2,4÷2,6$.

В ремонтных и нормальном режимах работы в распределительных сетях 6-35 кВ без вращающихся машин допускается принимать уровень ограничения перенапряжений при дуговых ОЗЗ $K_U \leq 2,8$ для режима удержания ОЗЗ при сложности реализации уровня ограничения перенапряжений $K_U \leq 2,6$.

5.12 Объединение сети 6-35 кВ ПС с низкоомным заземлением нейтрали и сети, где в нормальном режиме нейтраль изолирована, заземлена через ДГР и/или высокоомный резистор, допустимо, если обеспечивается селективность и быстродействие устройств РЗА на отключение присоединений при ОЗЗ в той части сети, где в нормальном режиме работы нейтраль изолирована, заземлена через ДГР и/или высокоомный резистор. Селективность и быстродействие защит от ОЗЗ для присоединяемой сети могут быть обеспечены за счет реализации дополнительной группы уставок на терминалах РЗА или установки дополнительных токовых реле для эксплуатации присоединяемой сети в режиме низкоомного заземления нейтрали [7].

5.13 Выбор количества устройств заземления нейтрали сети в зависимости от схемного решения ПС или ЭС (количество секций шин, наличие АВР) осуществляется при проектировании, исходя из общего правила: в нейтраль сети 6-35 кВ каждой секции шин, которая хотя бы в одном из режимов работы может длительно эксплуатироваться без связи с другими секциями шин, должен быть установлен свой резистор и/или ДГР.

5.14 Для защиты кабельных линий 6-35 кВ с полимерной изоляцией от ОЗЗ, ввиду отсутствия эффекта самовосстановления электрической прочности изоляции при пробое, необходимо предусматривать быстрое отключение присоединений с однофазным повреждением при наличии технической возможности. Удержание режима ОЗЗ приведет к увеличению области повреждения и повышению вероятности перехода ОЗЗ в КЗ. Поэтому в сетях с кабелями с полимерной изоляцией технически целесообразно применять низкоомное резистивное заземление нейтрали.

5.15 При проектировании подключения присоединений с кабелями или кабельными вставками с полимерной изоляцией в действующую сеть необходимо пересмотреть при наличии технической возможности существующий режим заземления нейтрали:

- если нейтраль сети изолирована или заземлена через ДГР, необходимо выполнить расчет, выбор и установку в нейтраль сети (в центре питания) низкоомных резисторов с демонтажом ДГР;
- если нейтраль сети заземлена через низкоомный резистор, следует выполнить расчет уставок защит от ОЗЗ и проверить их селективность и чувствительность для тех присоединений, на которых вводятся в эксплуатацию кабели с полимерной изоляцией. При необходимости следует настроить или заменить устройства РЗА на указанных присоединениях;
- если перевод всей сети на отключение ОЗЗ невозможен, то следует рассмотреть возможность отключения отдельных присоединений с кабелями с полимерной изоляцией.

5.16 Определение способа заземления нейтрали электроустановок должно производиться на основании следующих факторов:

- величина емкостного тока ОЗЗ;
- наличие вращающихся электрических машин;
- способ организации релейной защиты от ОЗЗ (на сигнал или на отключение);
- снижение уровня перенапряжений в сети;
- минимизация изменений состава существующего оборудования при изменении режима нейтрали действующей электроустановки.

5.17 Требования к режимам заземления нейтрали и принципам исполнения релейной защиты от ОЗЗ на вновь вводимых и реконструируемых электроустановках 6-35 кВ приведены в Таблице 5.1. Решения для случаев, не рассмотренных в таблице 5.1, принимаются при проектном технико-экономическом обосновании с учетом технических характеристик существующего оборудования и устройств РЗА.

5.18 Способы натурного измерения тока замыкания на землю в соответствии с требованиями ПТЭ ЭСиС и методика расчета емкостного тока приведены в Приложении А и Б, соответственно.

5.19 Оптимальная схема заземления нейтрали электроустановок определяется на этапе проектирования, с выполнением при необходимости технико-экономического обоснования.

В целях сокращении затрат на внедрение или модернизацию режима заземления нейтрали необходимо максимально использовать существующее электрооборудование, а именно:

- нейтралеобразующие устройства (трансформаторы $Y_н/\Delta$, фильтры со схемой $Z_н$);
- силовые трансформаторы с выведенной нейтралью 20 кВ и 35 кВ, генераторов;
- резервные ячейки (укомплектованные или требующие доукомплектования);
- установленные разъединители;
- оборудование для организации на РП источников оперативного тока (ТТ, ТН);
- устройства релейной защиты от ОЗЗ.

Таблица 5.1 – Режимы заземления нейтрали в зависимости от характеристики электроустановки и емкостного тока ОЗЗ при модернизации, реконструкции, техническом перевооружении и новом строительстве электроустановок 6 - 35 кВ

Характеристика электроустановки	**Значение I_C**	**Режим заземления нейтрали электроустановки и условия применения**	**Действие релейной защиты**
Электрическая сеть 6-35 кВ, в том числе схемы собственных нужд электростанций, гальванически отделенные от шин генераторного напряжения трансформатором собственных нужд (кроме схем с кабелями с полимерной изоляцией)	I_C < 30А при 6кВ; I_C < 20А при 10кВ; I_C < 10А при 35кВ; I_C < 10А с ВЛ, КВЛ на железных и ж/б опорах	Изолированная Условия (обязательное выполнение всех пунктов): 1. Обоснованное отсутствие необходимости мер по ограничению перенапряжений и ликвидации феррорезонансных процессов. 2. Допустимость работы без отключения присоединений с замыканием на землю на время ликвидации нарушения нормального режима оперативным персоналом.	Сигнализация о наличии замыкания на шинах и присоединениях секции шин.
		Высокоомное резистивное Условия (обязательное выполнение всех пунктов): 1. Наличие обоснованной необходимости мер по ограничению от перенапряжений. 2. Допустимость работы без отключения присоединений с замыканием на землю на время ликвидации нарушения нормального режима оперативным персоналом.	1. По решению владельца объекта электроэнергетики: указание присоединения с замыканием на землю или отключение при достаточной чувствительности РЗА присоединения с ОЗЗ и допустимости отключения присоединения. 2. Сигнализация о наличии замыкания на шинах и присоединениях секции шин.
		Низкоомное резистивное Условие (обязательное выполнение): 1. Допустимость отключения всех присоединений с замыканием на землю.	1. На отключение присоединения с замыканием на землю. 2. Сигнализация о наличии замыкания на шинах и присоединениях секции шин.

Продолжение Таблицы 5.1

Характеристика электроустановки	**Значение I_C**	**Режим заземления нейтрали электроустановки и условия применения**	**Действие релейной защиты**
	$I_C \geq$ 30А при 6кВ $I_C \geq$ 20А при 10кВ $I_C \geq$ 10А при 35кВ $I_C \geq$ 10А с ВЛ, КВЛ на железных и ж/б опорах	Компенсированное (ДГР) Условия (обязательное выполнение всех пунктов): 1. Допустимость работы без отключения присоединений с замыканием на землю на время ликвидации нарушения нормального режима оперативным персоналом. 2. Допустимые уровни перенапряжений и напряжения смещения нейтрали. 3. Допустимая точность настройки автоматики управления ДГР в процессе эксплуатации. 4. Запрет на определение поврежденного присоединения методом поочередного отключения (предусмотреть альтернативные способы селективного определения поврежденного присоединения устройствами РЗА).	1. Селективное определение поврежденного присоединения при ОЗЗ. 2. Сигнализация о наличии замыкания на шинах и присоединениях секции шин.
		Комбинированное (ДГР и высокоомный резистор) Условия (обязательное выполнение всех пунктов): 1. Допустимость работы без отключения присоединений с замыканием на землю на время ликвидации нарушения нормального режима оперативным персоналом. 2. Необходимость ограничения перенапряжения и напряжения смещения нейтрали.	1. По решению владельца объекта электроэнергетики: указание присоединения с замыканием на землю или отключение при достаточной чувствительности РЗА присоединения с ОЗЗ и допустимости отключения присоединения. 2. Сигнализация о наличии замыкания на шинах и присоединениях секции шин.

Продолжение Таблицы 5.1

Характеристика электроустановки	**Значение I_C**	**Режим заземления нейтрали электроустановки и условия применения**	**Действие релейной защиты**
		Комбинированное (ДГР и коммутируемый резистор) Условия (обязательное выполнение всех пунктов): 1. Необходимость отключения некоторых присоединений с замыканием на землю с сохранением в работе прочих присоединений. 2. Допустимые уровни перенапряжений и напряжения смещения нейтрали. 3. Допустимая точность настройки автоматики управления ДГР в процессе эксплуатации. 4. Невозможность обеспечить чувствительность или селективность РЗА при применении высокоомного резистора.	1. Селективное определение присоединения с замыканием на землю или отключение по решению владельца объекта электроэнергетики. 2. Включение резистора в схему, отключение присоединения с замыканием на землю релейной защитой за интервал времени с подключенным резистором, отключение резистора от схемы. 3. Сигнализация о наличии замыкания на шинах и присоединениях секции шин.
Электрическая сеть с КЛ, КВЛ 6-35 кВ с кабелями с полимерной изоляцией (кроме схем собственных нужд электростанций)	При любых значениях Iс	Низкоомное резистивное	На отключение присоединения с замыканием на землю. Сигнализация о наличии замыкания на шинах и присоединениях секции шин.
Цепи 6 - 20 кВ генераторного напряжения генераторов, работающих без ответвлений на генераторном напряжении и с ответвлениями к трансформаторам СН	При любых значениях Iс	Изолированная нейтраль	На отключение генератора (ПТЭ п.424)
Цепи 6 - 20 кВ генераторного напряжения, имеющие гальваническую связь с СН	I_C < 5А	Изолированная нейтраль	Сигнализация о наличии замыкания на шинах и присоединениях секции шин. На отключение генератора при наличии селективной защиты генератора и ее достаточной чувствительности (ПТЭ п.425)
	$I_C \geq$ 5А	Изолированная нейтраль или компенсированное (ДГР)	На отключение генератора (ПТЭ п.424). Сигнализация о наличии замыкания на присоединениях секции шин.

6 Заземление нейтрали электроустановок через ДГР для компенсации емкостного тока

6.1 При выборе ДГР необходимо опираться на следующие предельные значения емкостных токов ОЗЗ, при достижении которых вводится их компенсация (по нормам ПТЭ ЭСиС):

- в воздушных сетях 6 – 20 кВ на железобетонных или металлических опорах и во всех сетях 35 кВ – при токе более 10 А;
- в воздушных сетях, не имеющих железобетонных или металлических опор: при напряжении 6 кВ – при токе более 30 А, при напряжении 10 кВ – более 20 А, при напряжении 15, 20 кВ – более 15 А;
- в схемах генераторного напряжения 6 – 20 кВ блоков генератор-трансформатор – более 5 А.

6.2 Указанные значения предельных емкостных токов ОЗЗ целесообразно использовать, если в перспективе 5–10 лет ожидается увеличение емкостного тока сети 6-35 кВ до значений, указанных в ПТЭ ЭСиС. В противном случае (перспектива развития сети не определена) следует реализовать резистивное заземление нейтрали, предусмотрев возможность последующей замены нейтралеобразующих трансформаторов на более мощные и включение параллельно резисторам ДГР.

6.3 В сетях 6-35 кВ, на 100% выполненных кабелями с полимерной изоляцией, режим с длительным удержанием ОЗЗ не применяется, поскольку в таких сетях требуется селективное выявление и быстрое отключение замыкания на землю (п.5.14). Применение компенсации емкостного тока в таких сетях являются исключительным случаем и требует специального обоснования (например, недопустимость отключения ОЗЗ вследствие недостаточного резервирования, технологических особенностей производства с недопустимыми перерывами электроснабжения и т.п.).

6.4 При выборе типа и мощности ДГР для электрически связанной сети необходимо руководствоваться следующими положениями [8]:

- реакторы должны устанавливаться на шинах РУ ЭС или питающих ПС, связанных с электрической сетью не менее чем двумя линиями электропередачи; установка реакторов на тупиковых подстанциях не допускается;
- выбор подстанций для установки реакторов должен производиться с учетом возможного разделения сети в аварийном или ремонтном режимах на отдельно работающие участки;

- реакторы должны размещаться таким образом, чтобы в каждой части сети после ее разделения сохранялась возможность настройки компенсации емкостного тока, близкой к резонансной; расстройка компенсации в режимах отсутствия ОЗЗ должна контролироваться и поддерживаться автоматически с точностью до 1%;
- учитывая широкий ряд номинальных мощностей и диапазонов регулирования выпускаемых в настоящее время реакторов, на каждой секции питающей ПС по возможности следует устанавливать только один ДГР, независимо от емкостного тока ОЗЗ конкретной сети.

6.5 При новом строительстве, реконструкции и модернизации ЭС или ПС необходимо применять ДГР с плавным регулированием индуктивности.

6.6 В действующих электроустановках 6-35 кВ, в рамках программ модернизации и реконструкции ЭС или ПС, целесообразно предусмотреть поэтапную замену ДГР ступенчатого типа на плавнорегулируемые ДГР, мощность которых выбирается с учетом перспективного развития.

6.7 В сетях 6-35 кВ с большим по модулю и/или нестабильным вектором несимметрии следует использовать исключительно автоматические регуляторы ДГР, работающие на принципах контроля параметров КНП и не требующие искусственного смещения нейтрали.

6.8 В сетях 6-35 кВ с нейтралью, заземлённой через ДГР, степень несимметрии фазных напряжений не должна превышать 0,75% фазного напряжения, напряжение смещения нейтрали 15% фазного напряжения.

Допускается напряжение смещения нейтрали в течение 1 ч до 30% и в течение времени поиска места замыкания на землю – 100% фазного напряжения.

При превышении напряжения смещения нейтрали 15% фазного напряжения должны проводиться работы, связанные с симметрированием этих сетей. В сетях 6-35 кВ выравнивание емкостей фаз относительно земли выполняется транспозицией проводов, а также распределением конденсаторов высокочастотной связи [8]. Однако, наиболее эффективным вариантом снижения смещения нейтрали является установка высокоомных резисторов в нейтраль сети параллельно ДГР.

6.9 Определять значение емкостного тока электроустановок для выбора мощности дугогасящих реакторов следует расчетным путем или по результатам натурных экспериментов.

6.10 Мощность реакторов в электроустановках должна выбираться по значению емкостного тока ОЗЗ с учетом ее перспективного развития в ближайшие 5–10 лет. При отсутствии данных о развитии мощность реакторов следует определять по наибольшему значению емкостного тока ОЗЗ, увеличенному на 25% [8].

Мощность ДГР в электроустановках 6 – 35 кВ выбирается по величине емкостного тока замыкания на землю и рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{расчДГР}} = \text{nI}_C U_{\text{ф}} \leq Q_{\text{ДГР}}, \quad (6.1)$$

где $Q_{\text{расчДГР}}$ – расчетная мощность ДГР, кВА;

n – коэффициент, учитывающий развитие;

I_C – емкостный ток ОЗЗ, А;

$U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение, кВ;

$Q_{ДГР}$ – мощность выбранного ДГР, кВА.

6.11 Диапазон регулирования компенсации емкостного тока ДГР должен перекрывать диапазон возможных значений емкостного тока электрической сети при различных оперативных схемах.

6.12 При проектировании системы компенсации емкостных токов должно учитываться влияние сопротивления нейтралеобразующего трансформатора на выбор величины тока ДГР. Истинное значение тока реактора рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{ДГР}} = I_L \frac{X_L}{X_L + 0.33 X_{\text{TN}}}, \quad (6.2)$$

где I_{L} – максимальное паспортное значение тока реактора, А;

X_L – минимальное значение индуктивного сопротивления ДГР в заданном диапазоне регулирования;

X_{TN} – эквивалентное сопротивление трансформатора токам нулевой последовательности:

$$X_{\text{TN}} = \frac{U_K U_{\text{НОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}}, \quad (6.3)$$

где U_K – напряжение КЗ нейтралеобразующего трансформатора (паспортное значение), %;

$U_{НОМ}$ – номинальное напряжение трансформатора, кВ;

$S_{НОМ}$ – мощность трансформатора, кВА.

6.13 Требования к сопротивлению ЗУ в электроустановках с заземлением нейтрали через ДГР:

– наибольшее сопротивление заземляющего устройства определяется согласно п.3.2 ГОСТ 12.1.030-81:

$R_{ЗУ} \leq 250/I_{ОЗЗ}$ (не более 10 Ом) – для электроустановок выше 1 кВ; (6.4)

$R_{ЗУ} \leq 125/I_{ОЗЗ}$ – при использовании заземляющего устройства одновременно и для электроустановки до 1 кВ. (6.5)

– в качестве расчетного тока $I_{ОЗЗ}$ принимается ток, равный 125% от номинального тока ДГР.

6.14 Проектирование оборудования должно выполняться с использованием технических характеристик, полученных от завода-изготовителя данного оборудования.

7 Высокоомное заземление нейтрали

7.1 При выборе резистора для заземления нейтрали учитывается возможность развития кабельной или кабельно-воздушной сети 6-35 кВ с прогнозируемым увеличением емкостного тока ОЗЗ (25% либо иное значение – по согласованию с владельцем объекта электроэнергетики).

7.2 При увеличении емкостного тока ОЗЗ в процессе эксплуатации на величину более чем на 25% либо иное значение, согласованное владельцем объекта электроэнергетики при проектировании (п.7.1), следует выполнить расчет требуемого сопротивления резистора для проверки соответствия номинала установленного резистора и при необходимости скорректировать сопротивление резистора.

7.3 Сопротивление высокоомного резистора выбирается таким, чтобы напряжение на нейтрали за время между погасанием дуги и ее повторным зажиганием снижалось до $(0 \div 0{,}2)U_{ф}$. При этом условие ограничения перенапряжений при ОЗЗ до уровня $K_U = (2{,}4 \div 2{,}6)U_{Фmax}$, характеризующего оптимальный номинал резистора R_N, достигается при выполнении равенства:

$$R_N \leq \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot (0{,}5 \div 1{,}0) I_C}, \quad (7.1)$$

При снижении напряжения на нейтрали за время бестоковой паузы до нуля активная составляющая I_R тока ОЗЗ близка к емкостной составляющей I_C, уровень перенапряжений при ОЗЗ равен уровню первого пробоя.

7.4 В распределительных сетях 6-35 кВ в ремонтных и нормальном режимах работы сети 6-35 кВ без вращающихся машин допустимо принимать уровень ограничения перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю $K_U \leq 2,8$. В этом случае для определения номинала резистора и инженерной оценки уровня ограничения перенапряжений при дуговых ОЗЗ при различных соотношениях I_R/I_C и характерных коэффициентах успокоения сети d=0,05÷0,10 удобно пользоваться графиком, полученным на основании экспериментально-теоретических исследований [9] (рисунок 7.1).

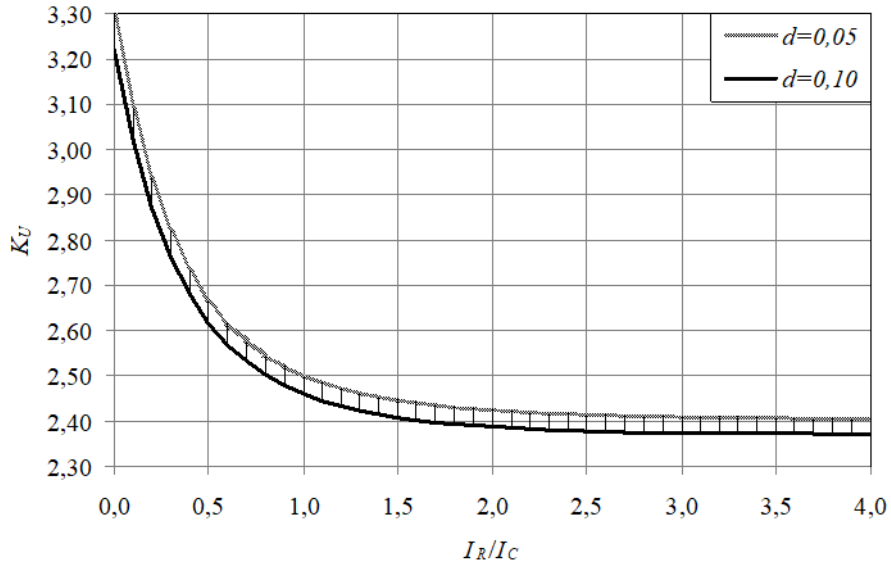


Рисунок 7.1 – Зависимость уровня перенапряжений при дуговых ОЗЗ в кабельной сети с резистивным заземлением нейтрали в зависимости от I_R/I_C для различных значений коэффициента успокоения сети d

7.5 При необходимости уточнения сопротивления резистора рекомендуется провести уточняющие расчеты с использованием специализированных компьютерных программ (EMTP, VMAES, NRAST и др.), с целью моделирования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ и определения уровней ограничения перенапряжений для конкретной схемы электроустановок 6 -35 кВ при подключении резистора.

7.6 Величина сопротивления высокоомного резистора выбирается из номинального ряда:

- для сетей 6 кВ – 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1500, 1700, 2000 Ом;
- для сетей 10 кВ – 300, 350, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1500, 1700, 2000 Ом;
- для сетей 20 кВ – 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000 Ом;
- для сетей 35 кВ – 2700, 3000, 3500, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000 Ом.

Приведенные ряды номинальных сопротивлений не ограничивают возможность выбора других сопротивлений резисторов. При необходимости выбора резистора другого номинала и другого класса напряжения следует руководствоваться рекомендациями завода-изготовителя.

7.7 Значение номинального активного тока резистора I_{R}, вычисляют по выражению:

$$I_R = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot R_N} \quad (7.3)$$

7.8 Результирующий ток $I_{\text{ОЗЗ}}$ в месте замыкания равен геометрической сумме емкостного тока сети и активного тока, создаваемого резистором для заземления нейтрали:

$$I_{\text{ОЗЗ}} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (7.4)$$

7.9 Ток ОЗЗ в сетях 6-35 кВ при высокоомном заземлении нейтрали, как правило, не должен превышать значений токов, установленных для применения компенсации (п. 6.1).

7.10 Требования к сопротивлению ЗУ в сети с высокоомным заземлением нейтрали аналогичны регламентированным для сети с изолированной нейтралью п.6.13. В качестве расчетного тока $I_{ОЗЗ}$ принимается полный ток замыкания на землю с учетом тока резистора, вычисленный по формуле (7.4).

7.11 Обеспечение электробезопасности с точки зрения допустимого напряжения прикосновения является более рациональным и справедливым, чем сопротивления ЗУ, поскольку позволяет оценить реальную опасность для эксплуатационного персонала случаев повреждения изоляции и появления потенциала на доступных для прикосновения заземленных частях электроустановок. Для режима высокоомного заземления нейтрали нормирование напряжения прикосновения выполняется по ГОСТ Р 12.1.038-2024.

7.12 Более 80% тока ОЗЗ растекается по оболочкам кабелей [10], заземленных с двух сторон и связанных с главными контурами заземления ($R_{ЗУ} \leq 0{,}5$ Ом) на питающих подстанциях класса 110-220 кВ. До 20% тока ОЗЗ растекается по PEN-проводникам низковольтной сети, а на долю непосредственно ЗУ приходится не более 2–3% тока однофазного замыкания в сети среднего напряжения. Учитывая растекание основной доли суммарного тока ОЗЗ по оболочкам кабелей, а также возможность применения высокоомных резисторов только в сети 6, 10, 15, 35 кВ с малым емкостным током ОЗЗ (не более 30, 20, 15, 10 А, соответственно), вопрос обеспечения электробезопасности решается в полном объеме при параметрах существующих ЗУ согласно действующим НТД.

7.13 Наибольшую эффективность высокоомное заземление нейтрали показывает в воздушных сетях 35 кВ и кабельных сетях 6 (10) кВ с кабелями с бумажно-пропитанной изоляцией, которые эксплуатируются продолжительное время, а зачастую с превышением нормативного срока службы.

7.14 Проектирование оборудования должно выполняться с использованием технических характеристик, полученных от завода-изготовителя данного оборудования.

8 Комбинированное заземление нейтрали

8.1 Комбинированное заземление нейтрали через ДГР и высокоомный резистор

8.1.1 Выбор ДГР для компенсации емкостного тока при комбинированном заземлении нейтрали через ДГР и высокоомный резистор производится согласно указаниям раздела 6.

8.1.2 Критерием выбора сопротивления высокоомного резистора для установки параллельно ДГР служит вероятная степень раскомпенсации ДГР в режиме ОЗЗ. Возникновение расстроек компенсации обусловлено следующими факторами:

- блокировка автоматики настройки ДГР для исключения повреждение механической системы регулирования воздушного зазора в баке реактора при возникновении в сети ОЗЗ и невозможность дальнейшей подстройки плунжерного реактора, вплоть до устранения замыкания;
- неточная настройка ДГР до возникновения ОЗЗ из-за не корректной работы автоматики или установленных ступенчатых ДГР (регулирование ДГР со ступенчатой настройкой происходит путем переключения ступеней регулирования персоналом в ручном режиме в соответствии с местными инструкциями по компенсации и в ряде случаев не обеспечивает требуемую точность настройки);
- вероятные изменения конфигурации сети, вызванные оперативными переключениями, а также неконтролируемыми переключениями в потребительских сетях;
- ложные срабатывания защит от ОЗЗ.

8.1.3 Выбор резистора, устанавливаемого параллельно ДГР, производится по значению вероятной степени раскомпенсации (емкостному току раскомпенсации ΔI):

$$R_N \geq \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\cdot(0{,}5\div 1{,}0)\cdot \Delta I}, \quad (8.1)$$

Ток раскомпенсации ΔI принимается равным емкостному току наибольшего присоединения или соответствующему значению тока при расстройке компенсации не менее 10%.

8.1.4 При выборе резистора по выражению (8.1) обеспечивается ограничение перенапряжений при дуговых ОЗЗ до уровня $K_U \leq (2{,}4 \div 2{,}6) U_{Фmax.}$

8.1.5 При необходимости уточнения сопротивления резистора или определения сопротивления резистора, обеспечивающего уровень ограничения $K_U \leq 2{,}8$, необходимо провести расчеты с использованием специализированных компьютерных программ (EMTP, VMAES, NRAST и др.), с целью моделирования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ и определения уровней ограничения перенапряжений для конкретной схемы сети при подключении резистора.

8.1.6 В сети, где осуществляется комбинированное заземление нейтрали, допускается длительное существование смещения нейтрали с уровнем, ограниченным за счет снижения добротности контура до значений не более 15% от $U_Ф$.

8.1.7 Требования к сопротивлению ЗУ в сети с комбинированным заземлением нейтрали через ДГР и высокоомный резистор аналогичны регламентированным для сети с ДГР в п.6.13.

8.1.8 Обеспечение электробезопасности с точки зрения допустимого напряжения прикосновения является более рациональным и справедливым, чем сопротивления ЗУ, поскольку позволяет оценить реальную опасность для эксплуатационного персонала случаев повреждения изоляции и появления потенциала на доступных для прикосновения заземленных частях электроустановок. Для режима комбинированного заземления нейтрали через ДГР и высокоомный резистор нормирование напряжения прикосновения выполняется по ГОСТ Р 12.1.038-2024.

8.1.9 При компенсации составляющей 50 Гц емкостного тока с помощью ДГР по оболочкам кабелей и через ЗУ пропорционально их сопротивлениям будет растекаться остаточный ток. Этот ток обусловлен:

- нескомпенсированным емкостным током;
- активной проводимостью изоляции сети относительно «земли» (расчетная проводимость принимается как 5% от емкостной);
- эквивалентным током искажения от высших гармоник, не компенсируемых плунжерными ДГР, который может достигать единиц и десятков ампер [11].

8.1.10 Условия электробезопасности для сетей с комбинированным заземлением нейтрали через ДГР и высокоомный резистор подобны тем, которые имеют место только при наличии ДГР, т.к. включение высокоомного резистора с малым током параллельно ДГР не приводит к перераспределению токов относительно ЗУ и оболочек кабелей.

8.1.11 Требования обеспечения электробезопасности в сети с комбинированным заземлением нейтрали выполняются, так как влияние тока от резистора на напряжение прикосновения (напряжение повреждения по ГОСТ Р 50571.4.44-2019) несущественно.

8.2 Комбинированное заземление нейтрали через ДГР и коммутируемый резистор

8.2.1 Выбор мощности ДГР для компенсации емкостного тока производится согласно указаниям раздела 6.

8.2.2 Основной задачей применения коммутируемого резистора является определение поврежденного фидера за счет дополнительного активного тока от резистора, протекающего при ОЗЗ только в поврежденном присоединении.

8.2.3 Комбинированное заземление нейтрали через ДГР и коммутируемый резистор реализуется одним из следующих способов:

- подключение низкоомного коммутируемого резистора параллельно ДГР;
- подключение коммутируемого резистора во вторичную обмотку ДГР.

8.2.4 Реализация режима с коммутируемым резистором, подключенным параллельно ДГР, предполагает автоматическое включение и отключение с заданными выдержками времени низкоомного резистора с помощью однополюсного выключателя в нейтрали силового питающего трансформатора 110(220)/35/6(10) кВ или ТЗН.

В цепи коммутируемого низкоомного резистора, подключаемого параллельно ДГР, устанавливается однополюсный выключатель. Коммутация резистора выполняется с помощью отдельного шкафа управления выключателем или отдельного микропроцессорного терминала РЗА. После возникновения ОЗЗ по сигналу с разомкнутой обмотки «треугольник» шинного ТН резистор автоматически включается однополюсным выключателем. После определения поврежденного присоединения коммутируемый резистор отключается, и схема возвращается в исходное положение: в нейтрали остается нормально подключенный ДГР для компенсации емкостного тока ОЗЗ промышленной частоты.

8.2.5 Выбор коммутируемого низкоомного резистора, подключаемого параллельно ДГР, выполняется исходя из обеспечения селективности и чувствительности релейных защит от ОЗЗ согласно указаниям раздела 9.

8.2.6 Критерием выбора сопротивления резистора, подключаемого во вторичную обмотку ДГР, является условие термической стойкости обмотки ДГР и возможность отвода тепла, которое выделится на резисторе при протекании тока в режиме ОЗЗ.

Резистор, подключаемый во вторичную обмотку ДГР, не всегда позволяет решить проблемы низкой чувствительности защит вследствие ограниченного диапазона возможных токов резистора, подключаемого во вторичную обмотку ДГР (ограничивается допустимой мощностью вторичной обмотки ДГР).

8.2.7 В режиме ОЗЗ коммутируемый резистор подключается по появлению напряжения $3U_0$ с установленной выдержкой времени, что обуславливает отсутствие его влияния на снижение уровня перенапряжений в начальный период возникновения ОЗЗ до подключения резистора и в период после отключения резистора.

9 Низкоомное заземление нейтрали

9.1 Сопротивление резистора при низкоомном заземлении нейтрали выбирают наименьшим, исходя из двух условий:

– *обеспечения устойчивого горения дуги при ОЗЗ, при котором ток резистора должен превышать емкостный ток ОЗЗ в 1,0÷5,0 раза [9, 12, 13]:*

$$I_R = (1{,}0 \ldots 5{,}0) \cdot I_C \Rightarrow$$
$$R_N = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot (1{,}0 \div 5{,}0) I_C}, \quad (9.1)$$

В зависимости от значения емкостного тока и класса напряжения сети 6-35 кВ предложены следующие условия устойчивого горения дуги для кабельных сетей:

$$\frac{I_R}{I_C} = \begin{cases} 4{,}0 \div 5{,}0 \text{ при } I_C \le I_{\text{норм}}; \\ 2{,}5 \div 4{,}0 \text{ при } I_{\text{норм}} < I_C < I_{\text{пред}}; \\ 1{,}0 \div 2{,}5 \text{ при } I_C > I_{\text{пред}}, \end{cases} \quad (9.2)$$

где $I_{норм}$ – нормативное значение емкостного тока, по достижении которого требуется введение компенсации согласно нормам ПТЭ ЭСиС;

I_C – суммарный емкостный ток сети;

I_R – активный ток резистора;

$I_{пред}$ = 100 А – значение тока ОЗЗ, выше которого, как правило,

обеспечивается устойчивое горение дуги.

Выражение (9.2) используется для первичной оценки требуемого сопротивления резистора.

При токах ОЗЗ до 10 А и действии защит на отключение номинал низкоомного резистора следует скорректировать так, чтобы активная составляющая тока была не менее 40 А.

В целях унификации сопротивления резисторов могут быть приняты равными меньшему значению, рассчитанному по (9.1), для разных секций одной подстанции.

– *обеспечение селективного срабатывания простых токовых защит на отключение ОЗЗ, при котором ток резистора должен превышать максимальный ток срабатывания защиты $I_{СЗmax}$ от ОЗЗ в соответствии с выражением:*

$$R_N \leq \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{СЗ}max} \cdot k_{\text{ч}}}, \quad (9.3)$$

где $I_{\text{СЗmax}}$ – максимальный ток срабатывания релейной защиты от ОЗЗ;

$k_Ч$ – коэффициент чувствительности, принимаемым равный 1,5 (согласно п.23 Требований к релейной защите и автоматике различных видов и ее функционированию в составе энергосистемы, утвержденных приказом Минэнерго России от 10.07.2020 № 546 (далее – Требования к РЗА).

9.2 Для выбора номинала низкоомного резистора в сети с емкостными токами замыкания на землю до 100 А приоритетным считается условие гарантированного перевода перемежающейся дуги в устойчивую (выражения (9.1), (9.2)), при емкостных токах замыкания более 100 А – условие гарантированной работы релейных защит от ОЗЗ (выражение (9.3)).

9.3 Величина сопротивления низкоомного резистора выбирается из номинального ряда:

- для сетей 6 кВ – 3.4, 6.9, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 55, 60, 70, 80, 85, 100 Ом;
- для сетей 10 кВ – 5.5, 10, 11.5, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 65, 70, 80, 85, 90, 95, 100, 150 Ом;
- для сетей 20 кВ – 11.5, 12, 20, 23, 29, 38, 40 Ом;
- для сетей 35 кВ – 20, 25, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 400 Ом.

При необходимости выбора резистора другого номинала и других классов напряжений следует руководствоваться рекомендациями завода-изготовителя.

При неправильной работе РЗА от ОЗЗ и/или отказе выключателей и при

условии, что режим ОЗЗ не устранен, для обеспечения термической стойкости низкоомного резистора должно быть предусмотрено отключение присоединения с резистором, если разрешается работа сети с изолированной нейтралью после отключения резистора с длительным удержанием ОЗЗ на время поиска присоединения с ОЗЗ, или ввод питания на секцию ПС, если не допускается работа сети в режиме изолированной нейтрали с неустраненным ОЗЗ.

Для дальнейшего поиска поврежденного присоединения с ОЗЗ могут быть использованы следующие устройства и способы:

- устройства контроля изоляции;
- устройства селективной сигнализации замыканий на «землю» для определения поврежденного присоединения (системы ОПФ);
- сигнализация, посредством которой определяется поврежденный участок линии (включая индикаторы протекания тока ОЗЗ и КЗ);
- переносные устройства и приборы для определения места повреждения на ВЛ и КЛ;
- поочередное отключение присоединений.

9.4 Реализация режима низкоомного резистивного заземления нейтрали должна сопровождаться проверкой на ненасыщение ТТНП при номинальном токе резистора (например, заводскими протоколами испытаний).

9.5 Резервирование потребителей при низкоомном заземлении нейтрали осуществляется с помощью настройки устройств АВР по стороне 6-35 кВ, а при наличии возможности – и по стороне 0,4 кВ.

9.6 Для обеспечения электробезопасности электроустановок путем ограничения напряжения на открытых частях электроустановки нормативными документами устанавливаются параметры заземляющего устройства (ЗУ) и нормируются предельные величины напряжения прикосновения $U_{ПР}$, установленные п.6.1.2 ГОСТ Р 12.1.038-2024 или нормируются величины напряжения повреждения, устанавливаемые ГОСТ Р 50571.4.44-2019.

9.7 Требования к сопротивлению ЗУ в сети с низкоомным заземлением нейтрали аналогичны регламентированным для сети с изолированной нейтралью п. 6.1 (формально низкоомное резистивное заземление не переводит сеть в режим эффективного заземления нейтрали, поскольку коэффициент замыкания при любых сопротивлениях в нейтрали трансформаторов более 1 Ом составляет не менее 1,73).

В качестве расчетного тока принимается полный ток замыкания на землю с учетом тока резистора:

$$I_{ОЗЗ} = \sqrt{I_C^2 + I_R^2}. \quad (9.4)$$

9.8 Для ОРУ напряжением 6-35 кВ на подстанциях с высшим напряжением 110 кВ, изначально спроектированных по нормам для электроустановок, принадлежащих сети с эффективно заземлённой нейтралью, $R_{ЗУ} \leq 0{,}5$ Ом.

9.9 В редких случаях при нахождении подстанции в районе с большим удельным сопротивлением грунта (например, песчаным) может возникнуть необходимость снижения сопротивления ЗУ на РП и ТП (РТП) относительно нормируемых для обеспечения условиях по электробезопасности.

9.10 При быстром отключения ОЗЗ в соответствии с ГОСТ Р 12.1.038-2024 можно принять повышенные значения напряжения прикосновения по сравнению с напряжением при длительном его воздействии. Это также применимо и к напряжению повреждению в соответствии с ГОСТ Р 50571.4.44-2019.

9.11 Электробезопасность в кабельной сети с низкоомным резистором обеспечивается быстрым отключением ОЗЗ и растеканием более 80% тока замыкания по оболочкам кабелей всей электрически связанной сети, ЗУ зданий и сооружений станции или подстанции [10]. До 20% тока ОЗЗ растекается по PEN-проводникам низковольтной сети, а на долю непосредственно ЗУ приходится не более 2 – 3% тока однофазного замыкания в сети среднего напряжения. В связи с этим, необходимо обязательно проводить техническое обслуживание кабельных оболочек и соединительных муфт, включая измерение их сопротивлений.

В сетях 6–10 кВ при ОЗЗ и сопротивлениях заземления ТП (с учетом оболочек кабельных линий), не превышающих 0,5 Ом напряжение прикосновения в сети до 1 кВ не превышает нормируемые значения и не представляет опасности для человека при токах однофазного замыкания на землю до 500 А и времени отключения не более 0,7 с [10, 14, 15].

9.12 При реализации низкоомного сопротивления нейтрали токи через ЗУ, необходимые для организации селективного отключения ОЗЗ, могут достигать величин до 1000 А. В случае невозможности выполнения ЗУ по нормам на допустимое сопротивление ЗУ оценка условий электробезопасности должна выполняться по величине напряжения повреждения, устанавливаемого ГОСТ Р 50571.4.44-2019.

Стандарт ГОСТ Р 50571.4.44-2019 позволяет оценивать условия обеспечения электробезопасности по величинам напряжения повреждения, возникающего на корпусе низковольтного электрооборудования при аварийных ситуациях в сети высокого напряжения.

9.13 При токах более 500 А проводится расчет напряжения повреждения при однофазном замыкании в сети 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали в специализированных программных комплексах (например, МАЭС, EMTP, Matlab Simulink, PS CAD) для:

- анализа обеспечения электробезопасности в электрической сети 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали;
- определения максимального времени отключения однофазного и короткого замыкания по критерию обеспечения электробезопасности;
- определения требований к сопротивлению заземления и конструктивным параметрам заземляющих устройств подстанций по условию обеспечения электробезопасности;
- формирования схемных решений, обеспечивающих выполнение нормативных требований по электробезопасности по установленным значениям напряжения повреждения.

9.14 В случае замыкания на землю на стороне высокого напряжения подстанции на низковольтную электроустановку воздействует перенапряжение повреждения промышленной частоты (U_f). Таким образом, в сетях с ТП/РТП 6(10)/0,4 кВ возможен вынос потенциала на корпуса электрооборудования в сети 0,4 кВ. На рисунке 9.1 приведена зависимость допустимых значений напряжения повреждения U_f согласно ГОСТ Р 50571.4.44-2019, которое возникает в низковольтной установке между открытыми проводящими частями и землей, в зависимости от длительности аварийного воздействия t. Расчетные значения напряжения повреждения для заданной продолжительности аварийного воздействия должны быть меньше или равны допустимым значениям.

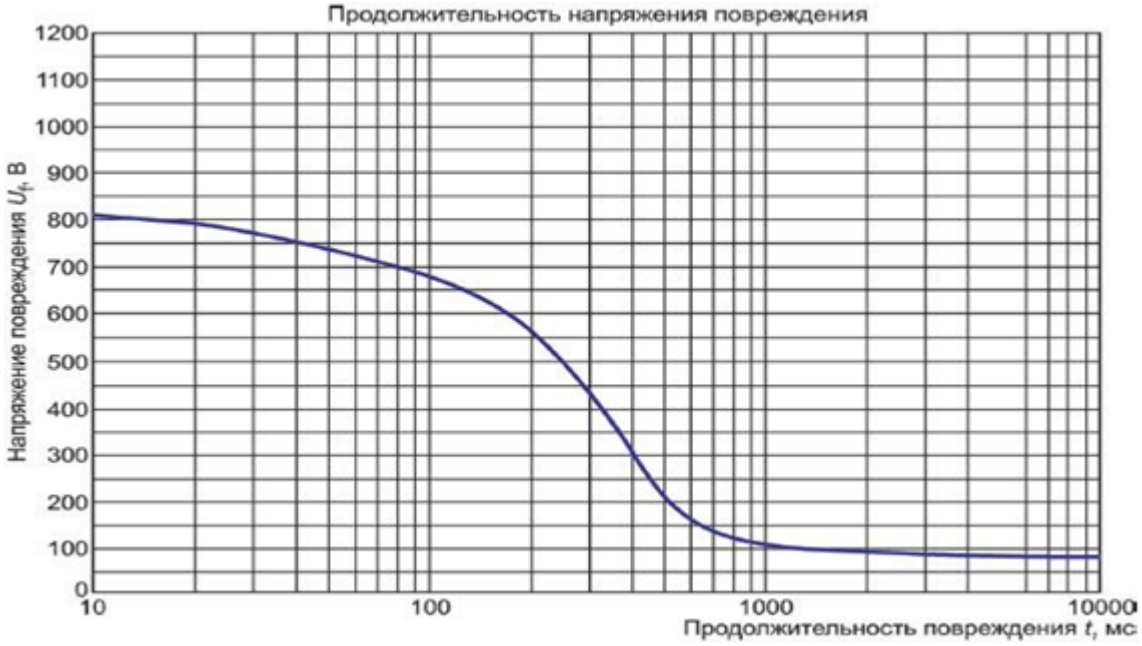


Рисунок 9.1 – Допустимое напряжение повреждения в низковольтной системе при замыкании на землю в высоковольтной системе

9.15 Если в электрической сети 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали уже существующие устройства релейной защиты и автоматики не могут обеспечить требуемого по условиям электробезопасности времени отключения возникающих повреждений, то в этом случае должны предусматриваться дополнительные мероприятия, обеспечивающие выполнение условий электробезопасности – конструкция электроустановок, технические способы и средства защиты, организационные и технические мероприятия согласно ГОСТ Р 50571.4.44-2019.

9.16 Для снижения напряжений повреждения до допустимых значений на территории ЭС или ПС могут применяться следующие мероприятия: уменьшение шага ячеек сетки заземлителей, местное выравнивание потенциала и использование высокоомных (гравий, щебень) или изоляционных (асфальт) покрытий.

9.17 Проектирование оборудования должно выполняться с использованием технических характеристик, полученных от завода-изготовителя данного оборудования.

10 Выбор нейтралеобразующих устройств

10.1 Для подключения высокоомных резисторов и ДГР

10.1.1 Для создания нейтральной точки для подключения резистора и/или ДГР в электроустановках 6-35 кВ используется сухой или масляный трансформатор заземления нейтрали 35(10,6)/0,4 со схемой соединения обмоток «$Y_н/\Delta$» (ТЗН) или фильтр нулевой последовательности без вторичной обмотки со схемой «зигзаг с нулем» (ФНП).

10.1.2 Расчет мощности ТЗН при высокоомном резистивном заземлении нейтрали производится по номинальной мощности резистора:

$$S_{\text{ТЗН}} \geq P_{R_N} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{3 \cdot R_N}, \text{ кВ·А} \qquad (10.1)$$

10.1.3 Выбор ФНП при высокоомном резистивном заземлении нейтрали производится по номинальному току резистора:

$$I_{\text{ФНП}} \geq \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot R_N} \qquad (10.2)$$

10.1.4 Нейтралеобразующий трансформатор со схемой соединения обмоток $Y_н/\Delta$, используемый для подключения высокоомного резистора, допус-

кает дополнительное присоединение трехфазной нагрузки к обмотке, соединенной в треугольник. Допустимая нагрузка трансформатора в этом случае определяется по формуле:

$$I_{\text{ДОП}} = \sqrt{(1{,}1 \cdot I_{\text{НОМ}})^2 - \left(\frac{I_R}{3}\right)^2} \quad (10.3)$$

где I_R – ток через резистор в режиме ОЗЗ, А;

$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}$ – номинальный ток ТЗН, А.

10.1.5 Выбор ТЗН при заземлении нейтрали через дугогасящий реактор производится по номинальной мощности ДГР:

$$S_{\text{ТЗН}} \geq S_{\text{ДГР}} \quad (10.4)$$

10.1.6 Выбор ФНП при заземлении нейтрали через дугогасящий реактор производится по номинальному току ДГР:

$$I_{\text{ФНП}} \geq I_{\text{ДГР}max} \quad (10.5)$$

10.1.7 Нейтралеобразующий трансформатор со схемой соединения обмоток $Y_н/\Delta$, используемый для подключения дугогасящего реактора, допускает дополнительное присоединение трехфазной нагрузки к обмотке, соединенной в треугольник. Допустимая нагрузка трансформатора в этом случае определяется по формуле:

$$I_{\text{ДОП}} = \sqrt{(1{,}1 \cdot I_{\text{НОМ}})^2 - \left(\frac{I_{\text{ДГР}}}{3}\right)^2}, \quad (10.6)$$

где $I_{ДГР}$ – ток компенсации ДГР, А;

$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}$ – номинальный ток ТЗН, А.

10.1.8 Выбор ТЗН при комбинированном заземлении нейтрали (параллельное включение ДГР и высокоомного резистора) производится по номинальной мощности подключаемых устройств:

$$S_{\text{ТЗН}} \geq \sqrt{\left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{3 \cdot R_N}\right)^2 + S_{\text{ДГР}}^2}. \quad (10.7)$$

10.1.9 Выбор ФНП при комбинированном заземлении нейтрали (параллельное включение ДГР и высокоомного резистора) производится по номинальному току подключаемых устройств:

$$I_{\text{ФНП}} \geq \sqrt{\left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot R_N}\right)^2 + I_{\text{ДГР}max}^2}. \quad (10.8)$$

10.1.10 При подключении высокоомного резистора и/или ДГР мощ-

ность ТЗН или ФНП может быть принята меньшей с учетом перегрузки по согласованию с производителем (например, при использовании существующего нейтралеобразующего устройства).

10.1.11 При заказе силового трансформатора (ТЗН), используемого в качестве нейтралеобразующего устройства, необходимо указать, что он должен быть выполнен с выведенной нейтралью обмотки ВН.

10.1.12 Проектирование оборудования должно выполняться с использованием технических характеристик, полученных от завода-изготовителя данного оборудования.

10.2 Для подключения низкоомных резисторов

10.2.1 Для создания нейтральной точки для подключения низкоомного резистора в сети 6-35 кВ необходим сухой или масляный ТЗН напряжением 35(10,6)/0,4 со схемой соединения обмоток «$Y_н/\Delta$» или ФНП без вторичной обмотки со схемой «зигзаг с нулем».

10.2.2 При установке низкоомных резисторов на ОРУ предпочтительным вариантом является использование масляных ТЗН или ФНП, размещаемых в непосредственной близости от резисторов с соблюдением допустимых по ПУЭ расстояний.

10.2.3 При установке низкоомных резисторов в закрытых помещениях предпочтительным вариантом является использование сухих пожаробезопасных ТЗН или ФНП, размещаемых как вместе с резисторами (в одном помещении), так и в разных помещениях с соблюдением допустимых по ПУЭ расстояний.

10.2.4 При протекании активного тока большой величины от низкоомного резистора допускается перегрузка ТЗН или ФНП относительно его номинальной мощности и номинального тока по высокой стороне при правильном выборе трансформатора с учетом его эксплуатации в режиме холостого хода при отсутствии ОЗЗ.

10.2.5 Расчет и выбор параметров ТЗН или ФНП для подключения низкоомного резистора должен быть выполнен с учетом допустимой (согласованной с производителем) перегрузки ТЗН или ФНП и обоснован в проекте.

Мощность нейтралеобразующего устройства (ТЗН или ФНП) определяется исходя из следующих двух условий:

1) В режиме ОЗЗ должна обеспечиваться термическая стойкость нейтралеобразующего устройства при протекании заданного тока в течение заданного времени (п.10.2.6, п.10.2.9).

2) В режиме ОЗЗ не должно быть значительного ограничения активного тока сопротивлением нейтралеобразующего устройства (п.10.2.8 – п.10.2.11).

Итоговый выбор параметров нейтралеобразующего устройства выполняется согласно п.10.2.6 или п.10.2.7, с учетом условия ограничения тока резистора по выражению (10.10).

10.2.6 Выбор ТЗН или ФНП для подключения низкоомного резистора осуществляться по номинальному току резистора, который не должен превышать допустимый кратковременный (10 с) ток в нейтрали ТЗН или ФНП.

$$I_{R(10c)} \leq I_{\text{доп}N(10c)}, \quad (10.9)$$

где $I_{R(10\text{ с})}$ – номинальный ток низкоомного резистора, А;

$I_{доп\ N(10c)}$ – допустимый десятисекундный ток нейтрали ТЗН или ФНП, А.

Максимальный допустимый кратковременный (10 с) ток в нейтрали следует запрашивать у производителей ТЗН или ФНП.

10.2.7 При отсутствии данных о допустимом десятисекундном токе нейтрали (п.10.2.6) мощность ТЗН или ФНП должна приниматься с учетом перегрузки относительно мощности низкоомного резистора не более чем 4-5 крат. Допустимость такой перегрузки ТЗН или ФНП необходимо согласовывать с заводом-изготовителем.

10.2.8 ТЗН или ФНП, в нейтраль которых подключается низкоомный резистор, обладают активным и индуктивным сопротивлениями по нулевой последовательности, поэтому активный ток от резистора в режиме ОЗЗ будет меньше номинального тока резистора I_R. Этот эффект заметно выражен при $I_R \geq 40 \div 50$ А. При выборе уставок токовых защит от замыканий на землю необходимо выполнить расчет тока ОЗЗ с учетом параметров выбранных ТЗН или ФНП и низкоомного резистора.

10.2.9 Ограничение тока резистора за счет сопротивления ТЗН или ФНП, в нейтраль которого он подключен, как правило, не должно превышать 10%. При этом выбор мощности ТЗН или ФНП технически целесообразно скорректировать с учетом условия допустимой перегрузки трансформатора, при котором его температура будет существенно меньше допустимой по условию нагревостойкости обмоток. Данное условие, как правило, соблюдается при превышении мощности резистора по отношению к мощности трансформатора не более чем в 4-5 раз.

10.2.10 Фактический ток от резистора в КНП, с учетом снижения его

номинального тока за счет сопротивления ТЗН или ФНП, определяется выражением:

$$I^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}{Z_{N0}}, \quad (10.10)$$

где Z_{N0} – полное сопротивление контура нулевой последовательности, в который входит резистор.

$$Z_{N0} = \sqrt{(R_{T0} + 3R_N)^2 + (X_{T0})^2} \quad (10.11)$$

где $X_{\text{Т0}}$ и $R_{\text{Т0}}$ – активное и индуктивное сопротивления ТЗН или ФНП. Активное и индуктивное сопротивления ТЗН или ФНП по нулевой последовательности допускается определять по следующим формулам:

$$Z_{T0} = Z_{T1} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{ТЗН(ФНП)}}}, \quad (10.12)$$

$$R_{T0} = R_{T1} = \Delta P_k \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{ТЗН(ФНП)}}^2}, \quad (10.13)$$

$$X_{T0} = X_{T1} = \sqrt{Z_{\text{Т0}}^2 - R_{T0}^2}, \quad (10.14)$$

где u_k – напряжение короткого замыкания ТЗН или ФНП;

$U_{НОМ}$ и $S_{ТЗН(ФНП)}$ – номинальное напряжение и мощность ТЗН или ФНП, определяемая исходя из его длительной работы в режиме ОЗЗ;

ΔP_k – потери короткого замыкания.

Значения сопротивления нулевой последовательности $X_{\text{Т0}}$ и $R_{\text{Т0}}$ трансформаторов со схемой соединения $Z_н$ или $Z_н/Y$ следует принимать по паспортным данным трансформатора.

10.2.11 При заказе силового трансформатора (ТЗН), используемого в качестве нейтралеобразующего устройства, необходимо обязательно указать, что он должен быть выполнен с выведенной нейтралью обмотки ВН. Сухой ТЗН должен иметь класс нагревостойкости изоляции «F».

10.2.12 Актуальные технические характеристики и чертежи с габаритными размерами ТЗН и ФНП необходимо уточнять в каталогах и на сайтах заводов-изготовителей.

11 Схемы включения дугогасящих реакторов и резисторов в нейтраль электроустановок

11.1 Заземление нейтралей сетей 6-35 кВ через резистор и/или ДГР необходимо выполнять на питающих ПС или шинах РУ электростанции. Оборудование для заземления нейтрали сети устанавливается на каждой секции шин 6-35 кВ.

11.2 Для подключения резистора и/или ДГР требуется нейтралеобразующее устройство (ТЗН или ФНП) и отдельная ячейка, укомплектованная силовым выключателем и стандартным набором релейных защит, за исключением случаев присоединения к нейтрали 20, 35 кВ питающего трансформатора 110-220 кВ.

11.3 Для подключения резистора в сетях 6-10 кВ применяется сухой или масляный ТЗН 10(6)/0,4 со схемой соединения обмоток «$Y_н/$□» или ФНП без вторичной обмотки со схемой «зигзаг с нулем».

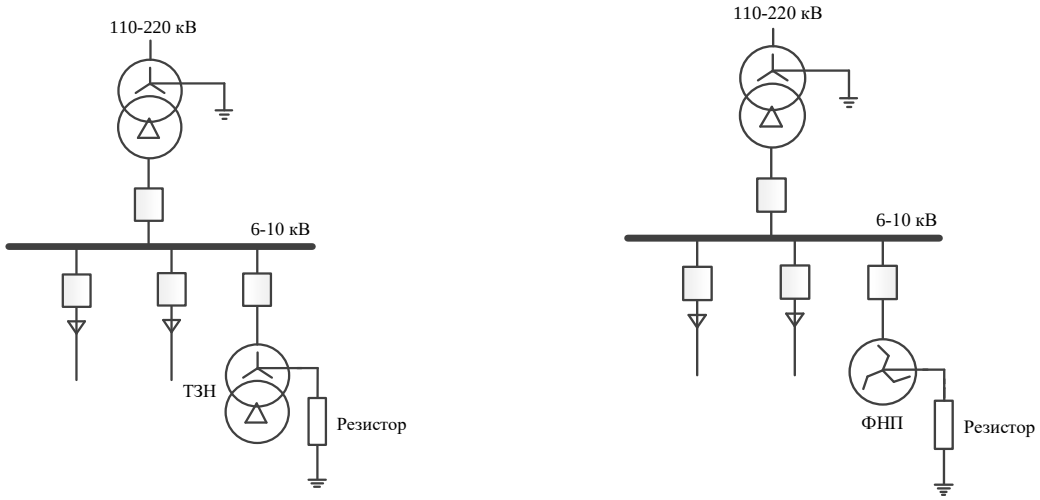
11.4 В сети 35 кВ резистор может подключаться в нейтраль обмотки 35 кВ силового трансформатора 110-220 кВ, в нейтраль 35 кВ блочного трансформатора блока генератор-трансформатор или в нейтраль отдельного ТЗН или ФНП.

11.5 В сетях 20 кВ резистор и/или ДГР могут подключаться в нейтраль обмотки 20 кВ силового трансформатора 220(110)/20 кВ со схемой соединения обмоток $Y_н/Y_н$ или в нейтраль отдельного ТЗН или ФНП.

11.6 В цепях 6-20 кВ блока генератор-трансформатор ДГР может подключаться в нейтраль статорных обмоток генератора или в нейтраль отдельного ТЗН или ФНП.

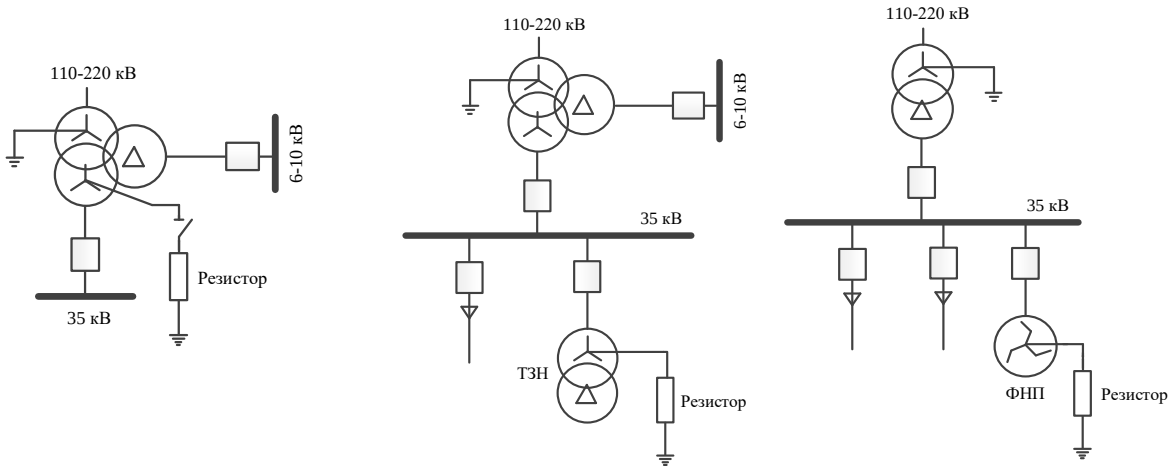
11.7 В сетях 6-20 кВ генераторного напряжения электрических станций при работе генератора на сборные шины не допускается подключение заземляющего резистора непосредственно в нейтраль генератора или на сборные шины.

11.8 Типовые схемы подключения высокоомных и низкоомных резисторов в сетях напряжением 6-35 кВ приведены на рисунках 11.1 – 11.3.



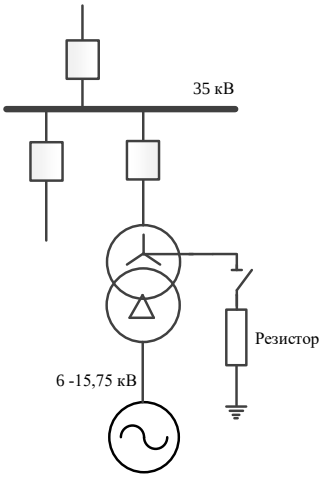
а) б)

Рисунок 11.1 – Схемы подключения резисторов в сети 6-10 кВ: а) в нейтраль обмотки высокого напряжения ТЗН; б) в нейтраль ФНП



а) б) в)

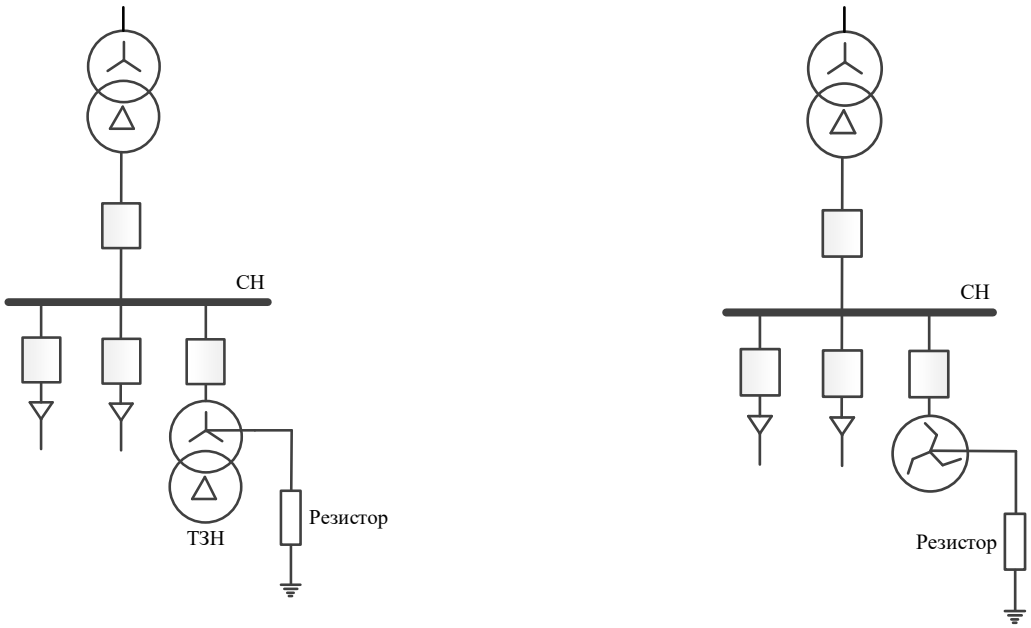
Рисунок 11.2 – Схемы подключения резисторов в сети 35 кВ: а) в нейтрали обмотки 35 кВ трехобмоточного питающего трансформатора; б) в нейтрали обмотки 35 кВ ТЗН; в) в нейтрали обмотки 35 кВ ФНП



а)

Рисунок 11.3 – Схемы подключения резисторов в нейтраль обмотки 35 кВ блочного трансформатора ЭС

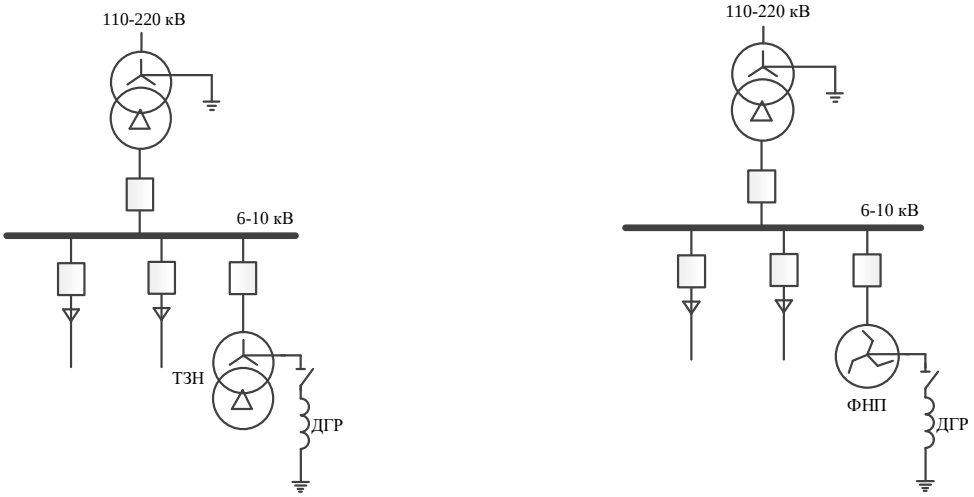
11.9 Типовые схемы подключения резисторов в сети 6, 10 СН приведены на рисунке 11.4.



а) б)

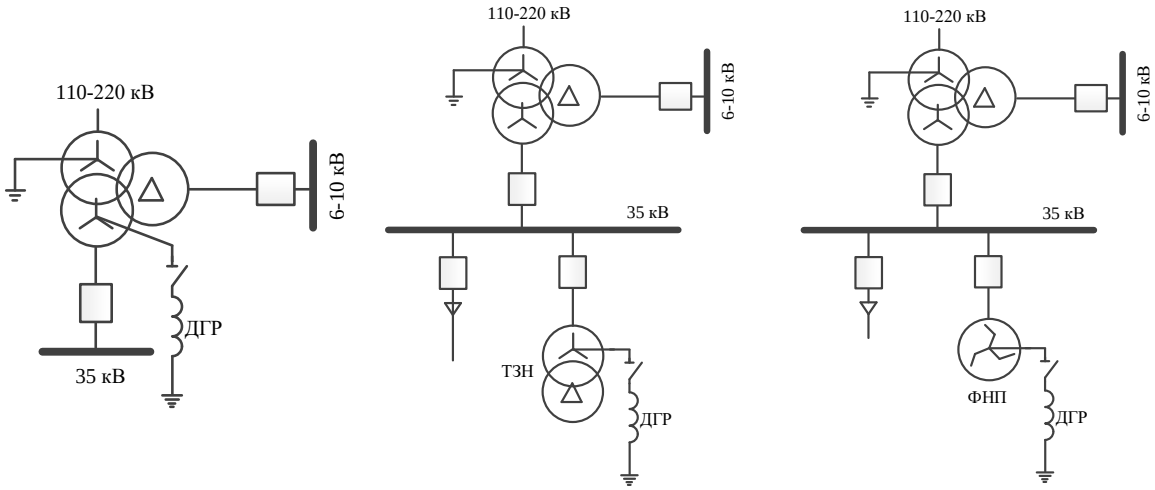
Рисунок 11.4 – Схемы подключения резистора в сети 6, 10 СН: а) к нейтрали ТЗН в сети секции СН; б) к нейтрали ФНП в сети секции СН

11.10 Типовые схемы подключения ДГР в сетях напряжением 6-35 кВ приведены на рисунках 11.5 – 11.6.



а) б)

Рисунок 11.5 – Схемы подключения ДГР в сети 6-10 кВ: а) в нейтраль обмотки высокого напряжения ТЗН; б) в нейтраль ФНП



а) б) в)

Рисунок 11.6 – Схемы подключения ДГР в сети 35 кВ: а) в нейтрали обмотки 35 кВ трехобмоточного питающего трансформатора; б) в нейтрали обмотки 35 кВ ТЗН; в) в нейтрали обмотки 35 кВ ФНП

11.11 При необходимости компенсации емкостных токов в схемах 6-20 кВ блока генератор-трансформатор ДГР может подключаться в нейтраль генератора или в нейтраль отдельного ТЗН или ФНП (рисунок 11.7).

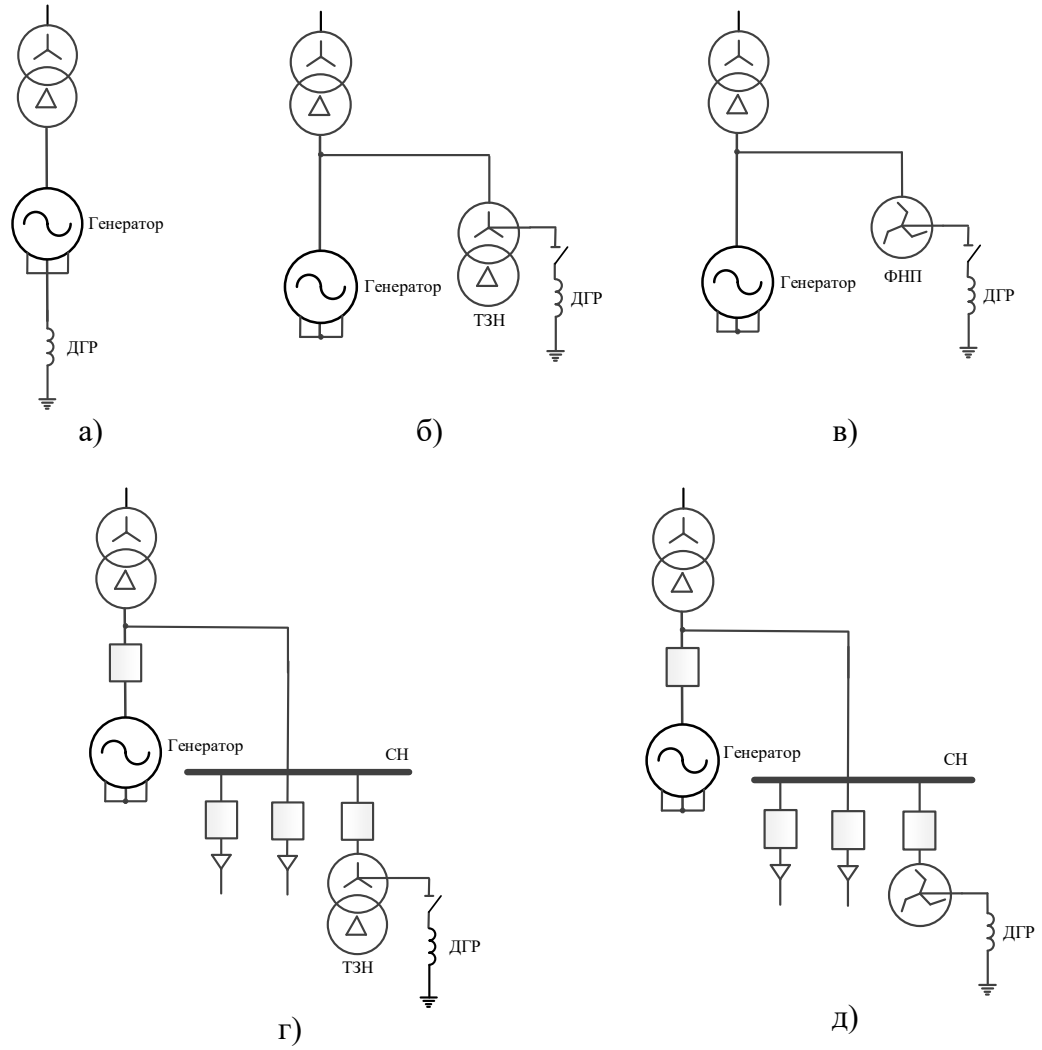
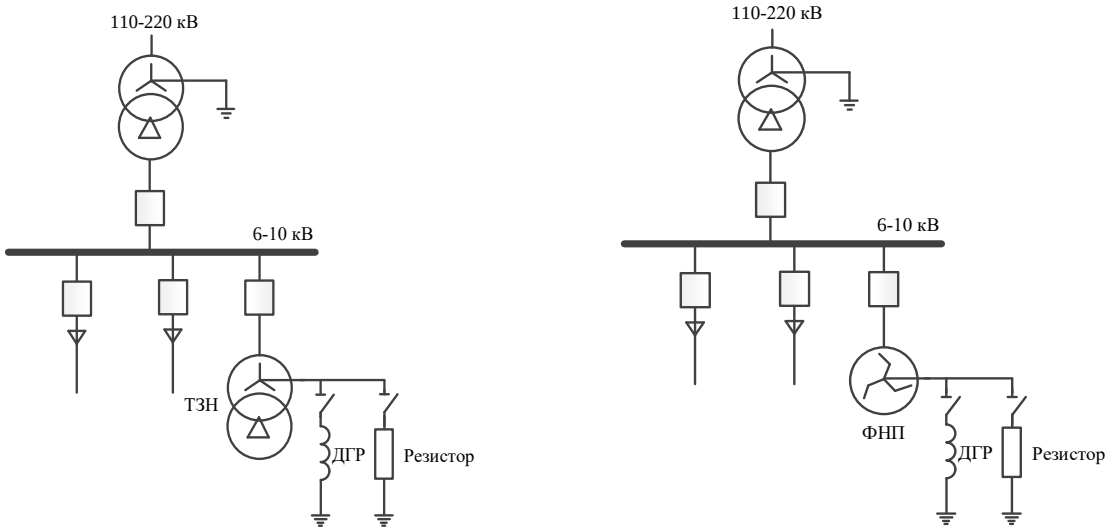


Рисунок 11.7 – Схемы подключения ДГР в схемах блока генератор-трансформатор: а) к нейтрали генератора; б) к нейтрали ТЗН на выводах генератора; в) к нейтрали ФНП на выводах генератора; г) к нейтрали ТЗН на секции СН; д) к нейтрали ФНП на секции СН

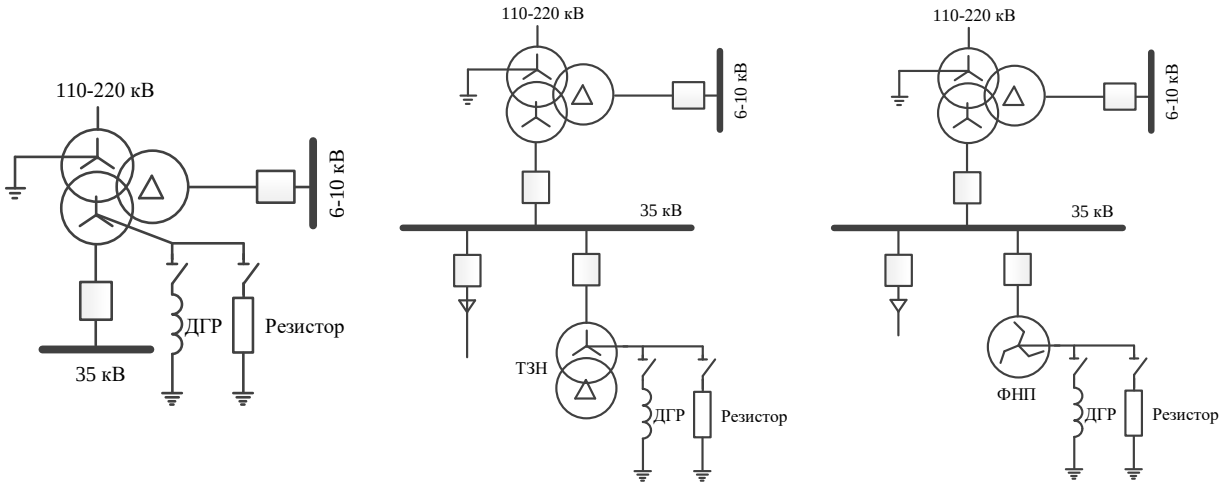
11.12 Для реализации комбинированного режима заземления нейтрали сети 6, 10 кВ (параллельного подключения ДГР и высокоомного резистора) применяются ТЗН (рисунок 11.8 а) или ФНП (рисунок 11.8 б).



а) б)

Рисунок 11.8 – Схемы параллельного подключения ДГР и резисторов к сети 6, 10 кВ: а) к нейтрали ТЗН; б) к нейтрали ФНП

11.13 В сетях 35 кВ реализация комбинированного заземления нейтрали через резисторы и ДГР выполняется, как правило, в нейтраль 35 кВ питающих трехобмоточных трансформаторов 110 – 220 кВ (рисунок 11.9 а). Также может использоваться отдельный ТЗН 35/0,4 кВ со схемой $Y_н/\Delta$ (рисунок 11.9 б) или ФНП со схемой $Z_н$ (рисунок 11.9 в).



а) б) в)

Рисунок 11.9 – Схема параллельного подключения ДГР и резисторов в сети 35 кВ: а) в нейтраль 35 кВ питающего трехобмоточного трансформатора 110-220 кВ; б) в нейтраль отдельного ТЗН 35 кВ; в) в нейтраль отдельного ФНП 35 кВ

11.14 Схема комбинированного заземления нейтрали может быть реализована с подключением к нейтрали сети параллельно ДГР коммутируемого низкоомного резистора (рисунок 11.11).

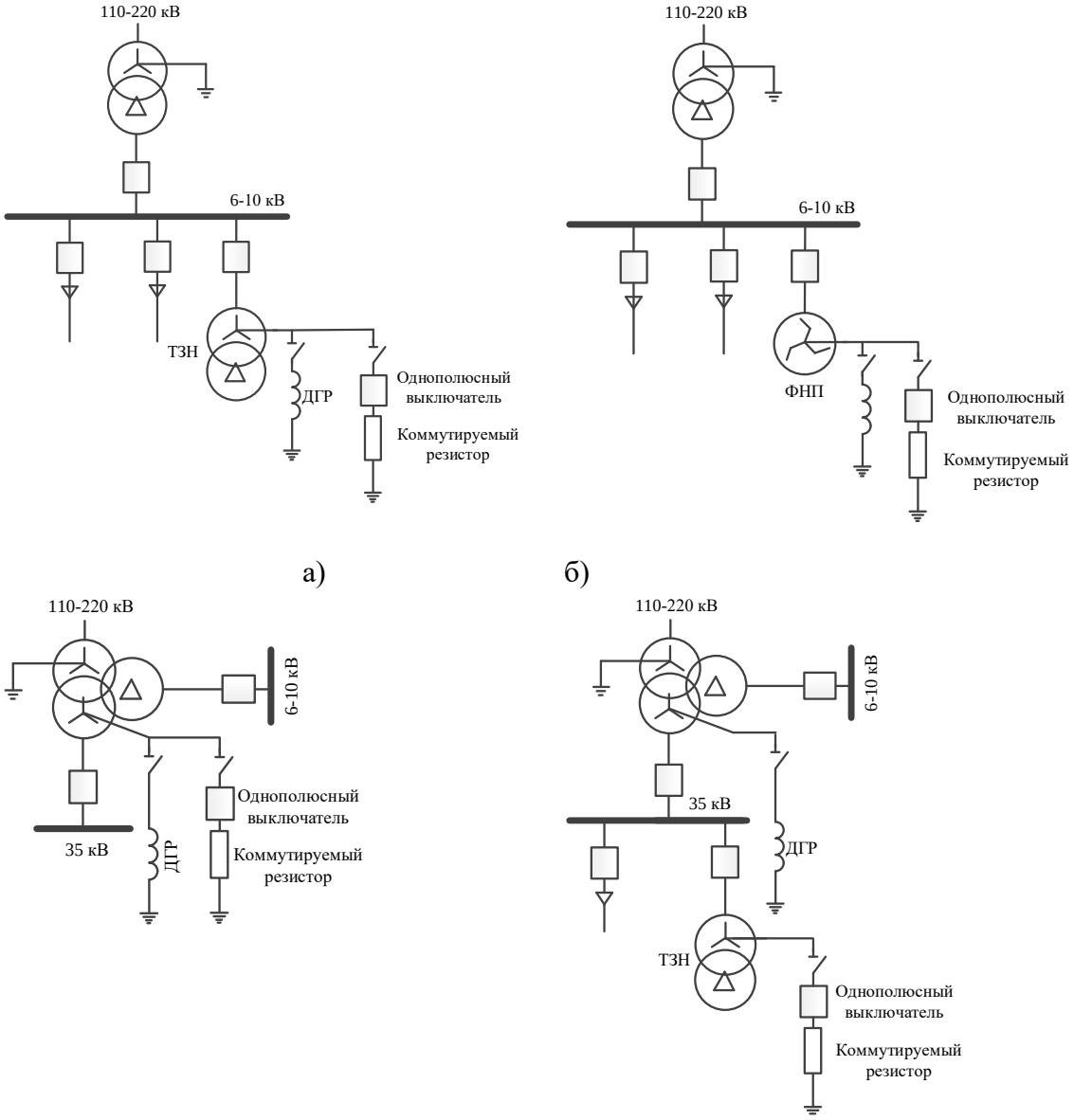
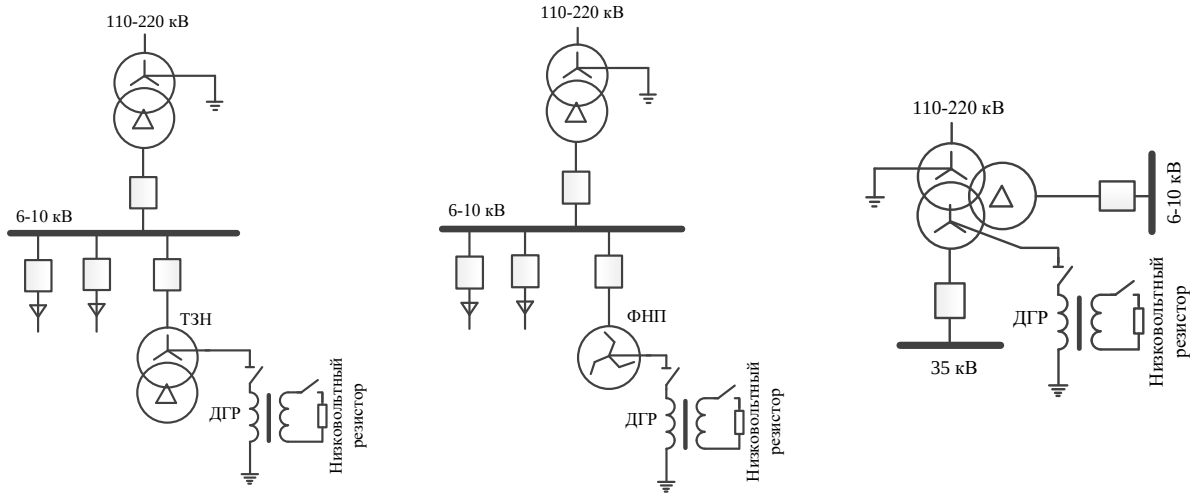


Рисунок 11.11 – Схемы комбинированного заземления нейтрали сети 6-35 кВ с коммутируемым высоковольтным резистором: а) к нейтрали ТСН 6-10 кВ; к нейтрали ФНП 6-10 кВ; в) к нейтрали 35 кВ питающего трехобмоточного трансформатора 110-220 кВ; г) к нейтрали 35 кВ питающего трехобмоточного трансформатора 110-220 кВ и отдельного ТЗН/ФНП

11.15 Схема комбинированного заземления нейтрали сети может быть реализована путем включения коммутируемого резистора во вторичную обмотку ДГР согласно разделу 8.2 (рисунок 11.10).



а) б) в)

Рисунок 11.10 – Варианты реализации комбинированного заземления нейтрали с включением коммутируемого резистора во вторичную обмотку ДГР: а) в сети 6-10 кВ к нейтрали ТЗН; б) в сети 6-10 кВ к нейтрали ФНП; в) в сети 35 кВ в нейтраль 35 кВ питающего трехобмоточного трансформатора 110-220 кВ

12 Технические требования к силовому оборудованию для заземления нейтрали и автоматике управления устройствами компенсации ёмкостного тока

12.1 Общие сведения

12.1.1 Технические требования к устройствам заземления нейтрали, при правильном выборе соответствующего оборудования (нейтралеобразующих устройств, резисторов, дугогасящих реакторов и автоматики управления реакторами) и корректной настройке защит от ОЗЗ, позволяют:

- выбирать и применять оптимальное по своим техническим характеристикам специализированное оборудование;
- организовывать максимально эффективную систему защиты от внутренних перенапряжений в электроустановках 6-35 кВ при однофазных замыканиях на землю;
- выполнить требования ПТЭ ЭСиС по компенсации емкостного тока и обеспечить высокую точность настройки ДГР в нормальных режимах эксплуатации, предшествующих ОЗЗ;
- обеспечивать селективное выявление фидера с ОЗЗ и снизить длительность неполнофазного режима до времени, соответствующего отключению поврежденного фидера релейной защитой (не более единиц секунд).

12.1.2 Методики и процедуры испытаний устройств заземления нейтрали должны основываться на руководствах заводов-производителей.

12.2 Технические требования к дугогасящим реакторам

12.2.1 В качестве устройств компенсации емкостного тока в электроустановках 6-35 кВ необходимо применять плавнорегулируемые дугогасящие реакторы, преимущественно с регулируемым зазором (плунжерного типа), с автоматическими регуляторами настройки тока компенсации и с ручным регулированием тока настройки.

12.2.2 Дугогасящие реакторы с плавным регулированием индуктивности должны отвечать следующим положениям:

- допустимое время работы реактора в режиме замыкания на землю при номинальном напряжении и наибольших предельных токах, а также при наибольшем рабочем напряжении при мощности не более номинальной, должно составлять не менее 6 часов;
- реакторы с регулируемым зазором (плунжерного типа) и реакторы с конденсаторным регулированием должны быть настроены на ток компенсации, равный емкостному току замыкания на землю на основной частоте 50 Гц, до возникновения замыкания на землю;
- управляемые подмагничиванием реакторы должны иметь автоматический выход на ток компенсации, равный емкостному току замыкания на землю на основной частоте 50 Гц, непосредственно после возникновения замыкания на землю;
- диапазон изменения значений тока должен составлять не менее 20…100%;
- конструкция ДГР и его механические характеристики должны обеспечивать возможность автоматической настройки с точностью не хуже 1%;
- регулировочная характеристика реактора должна быть линейной;
- отклонение вольтамперной характеристики реактора от линейной в диапазоне изменения тока (20…100%) должно составлять не более 1%;
- индуктивность реактора должна оставаться стабильной в течение всего времени существования замыкания на землю при неизменном емкостном токе сети;
- конструкция реактора должна гарантировать возможность его ручного регулирования при отказе или выводе из работы автоматики управления;
- суммарное содержание высших гармонических составляющих в токе реактора (гармонический ток искажения) не должно превышать 2%;
- возможность дистанционного управления без отключения от сети;

– сейсмостойкость ДГР должна быть не менее 6 баллов по шкале MSK-64.

12.2.3 Дугогасящие реакторы должны иметь встроенные трансформаторы тока.

12.2.4 ДГР должен иметь ручной режим управления для возможности настройки необходимого значения тока компенсации вручную при отказе автоматики. Все изменения режимов компенсируемой сети и работы устройства должны сохраняться в памяти устройства.

12.3 Технические требования к автоматике управления устройствами компенсации ёмкостного тока

12.3.1 Проектирование, монтаж, наладка и эксплуатация автоматических регуляторов для управления ДГР должны осуществляться с обеспечением требований по электромагнитной совместимости вторичных цепей на ЭС или ПС согласно отраслевым нормативным требованиям.

12.3.2 Устройство автоматики ДГР должно быть конструктивно совместимо с используемым ДГР.

12.3.3 В случае реконструкции ЭС и ПС 35-110 кВ:

– автоматика существующих ДГР должна быть заменена, если не соответствует пп. 12.3.4 настоящего Стандарта;
– ступенчатые ДГР необходимо заменять на плавнорегулируемые ДГР с автоматическими регуляторами в соответствии с пп.12.3.4 настоящего Стандарта.

12.3.4 Автоматические регуляторы для управления ДГР должны быть микропроцессорными и удовлетворять следующим требованиям:

– высокая точность поддержания резонансной настройки реактора (±5%) без применения устройств постоянного искусственного смещения нейтрали;
– погрешность определения емкостного тока до момента замыкания должна составлять не более 1%;
– автоматическое определение механических параметров ДГР для повышения точности регулирования (для ДГР плунжерного типа);
– возможность работы с прецизионным датчиком положения плунжера ДГР (для ДГР плунжерного типа);
– возможность согласованного управления несколькими реакторами, в том числе комбинацией ступенчатых и плавнорегулируемых, на разных секциях шин при включении и отключении межсекционных выключателей;

- правильное функционирование в различных режимах эксплуатации: нормальном, неполнофазном, при металлических и дуговых ОЗЗ, в том числе через высокое переходное сопротивление;
- устойчивая работа и автоматическая перенастройка в сетях с высокими значениями напряжения естественной несимметрии, изменяющейся фазой и амплитудой этого напряжения, в сетях с низкой добротностью (менее 10);
- измерение и непрерывная регистрация параметров сети, величины и знака степени расстройки за длительный период времени, передача текущих и накопленных данных в систему телемеханики;
- ведение и хранение журнала событий и осциллограмм однофазного замыкания на землю в памяти устройства;
- согласованная работа нескольких устройств при изменении конфигурации сети.

12.3.5 Автоматические регуляторы для управления ДГР должны иметь функцию удаленного доступа (с возможностью дистанционного управления без отключения от сети) и иметь возможность выдачи сигналов на центральную сигнализацию и верхний уровень. Все изменения режимов компенсируемой сети и работы устройства должны сохраняться в памяти устройства.

12.3.6 Система автоматической настройки и управления устройствами компенсации ёмкостного тока должна сохранять работоспособность при разных режимах эксплуатации сети и видах однофазного замыкания на землю, в т. ч. замыканиях через высокое переходное сопротивление, а также в сетях с низкой добротностью контура нулевой последовательности.

12.4 Технические требования к резисторам

12.4.1 Работоспособность резистора для заземления нейтрали в переходных режимах работы установки (нормальный и аварийный режим эксплуатации), независимо от его исполнения, а также эффективность защиты от перенапряжений при замыканиях на землю обеспечивается правильным выбором типа и номинала резистора и должна быть подтверждена расчетами.

12.4.2 Резисторы для заземления нейтрали должны соответствовать следующим требованиям:

- температурный коэффициент сопротивления резистивного материала не должен превышать 0,000263 1/°С (суммарный ток замыкания на землю должен иметь достаточную величину для корректного срабатывания устройств релейной защиты);

- конструкция высокоомного резистора должна обеспечивать его термическую стойкость в течение всего времени существования ОЗЗ;
- при длительном режиме работы в режиме замыкания на землю для высокоомных резисторов температура нагрева резистивных элементов не должна превышать наибольшую допустимую температуру нагрева в зависимости от класса нагревостойкости изоляционных материалов по ГОСТ 8865-93, находящихся в контакте с токоведущими частями (в соответствии с ГОСТ 8024-90);
- конструкция низкоомного резистора должна обеспечивать его термическую стойкость при номинальном токе и времени его протекания при наибольшем рабочем напряжении сети. Термическая стойкость низкоомного резистора также должна обеспечиваться условием превышения длительно-допустимого тока низкоомного резистора заземления нейтрали над возможной величиной длительно протекающего через резистор тока, вызванного несимметрией сети и высшими гармониками;
- при кратковременном режиме работы в режиме замыкания на землю для низкоомных резисторов температура нагрева резистивных элементов не должна превышать температуру предельного кратковременного нагрева заземляющих проводников электроустановок выше 1000 В при однофазном замыкании, равную 400 °С;
- активные части резистора (резистивные элементы) должны иметь степень защиты от внешних воздействий IP 54 по ГОСТ 14254-2015;
- резистор должен обладать минимальной индуктивностью;
- время работы в режиме замыкания на землю для высокоомных резисторов должно составлять не менее 6 ч (длительная работа);
- время работы в режиме замыкания на землю для низкоомных резисторов, рассчитанных на номинальное напряжение сети, должно быть достаточным для срабатывания устройств РЗА от ОЗЗ не менее 10 с.
- время работы в режиме замыкания на землю для низковольтных резисторов, рассчитанных на напряжение ниже номинального напряжения сети и подключаемых к нейтрали через вторичные обмотки трансформаторов и реакторов, должно быть достаточным для срабатывания устройств РЗА от ОЗЗ.
- сейсмостойкость резистора должна быть не менее 6 баллов по шкале MSK-64.

12.4.3 Совместно с резисторами для заземления нейтрали рекоменду-

ется использовать устройство мониторинга состояния резистора, которое будет контролировать отклонение номинального сопротивления и исправность резистора.

12.5 Технические требования к нейтралеобразующим устройствам

12.5.1 В качестве нейтралеобразующих устройств могут использоваться силовые трансформаторы со схемой соединения обмоток $Y_н/Y_н/\Delta$, $Y_н/Y_н$, $Y_н/\Delta$, $Z_н/\Delta$ и фильтры нулевой последовательности $Z_н$ (без вторичной обмотки).

12.5.2 Допускается применение нейтралеобразующих устройств с обмотками, выполненными из меди или алюминия, как с масляной, так и сухой изоляцией соответствующего класса нагревостойкости. Тип трансформатора и его мощность выбираются в зависимости от условий его эксплуатации с позиции минимизации габаритов и стоимости.

12.5.3 Нейтралеобразующие устройства (ТЗН и ФНП) должны удовлетворять следующим требованиям:

- конструктивно первичные обмотки трансформатора должны быть соединены в «звезду с выведенным нулем» (ТЗН) либо «зигзаг с выведенным нулем» (ФНП);
- трансформатор с литой изоляцией должен иметь класс нагревостойкости F;
- вторичные обмотки ТЗН, должны быть соединены в замкнутый треугольник, что обеспечивает малое сопротивление трансформатора токам нулевой последовательности;
- напряжение и потери КЗ для ТЗН или ФНП должны быть минимальными для устройства заданной мощности и обеспечивающими такое значение его сопротивления, которое приводит к ограничению активного тока резистора не более чем на 10%;
- ТЗН или ФНП, в нейтраль которого подключается низкоомный резистор, должен быть рассчитан на режимы эксплуатации с кратковременной перегрузкой. Время перегрузки соответствует длительности отключения однофазного повреждения релейной защитой, но не может быть ниже времени термической стойкости резистора – 10 с;
- сейсмостойкость ТЗН или ФНП должна быть не менее 6 баллов по шкале MSK-64.

13 Принципы организации релейной защиты от замыканий на землю в электрических сетях с различными режимами заземления нейтрали

13.1 Общие требования к релейной защите от ОЗЗ

13.1.1 Для построения надежной системы защиты от ОЗЗ и обеспечения селективного выделения поврежденного элемента релейная защита от замыканий на землю в сети организуется на всех присоединениях секций 6-35 кВ электростанций или питающей ПС, а также РП (РТП) с силовыми выключателями.

13.1.2 Защита от ОЗЗ, как правило, организуется на базе индивидуального терминала защиты отходящего присоединения, в котором предусмотрена соответствующая функция и вход для подключения ТТНП и напряжения нулевой последовательности ТН.

Защита от ОЗЗ также может быть реализована с использованием централизованного устройства РЗА. Централизованные защиты от замыканий на землю в ряде случаев могут оказаться более эффективными по принципу функционирования. Один комплект централизованной защиты охватывает сразу все присоединения секции или всей подстанции.

13.1.3 Тип устанавливаемой на отходящем присоединении защиты выбирается в зависимости от ряда факторов, в числе которых режим заземления нейтрали, схема сети, соотношение токов, требования к РЗА.

13.1.4 При выборе варианта реализации системы защиты от ОЗЗ в сети 6-35 кВ необходимо учитывать особенности следующих основных типов защит от ОЗЗ:

- неселективная защита (сигнализация) от ОЗЗ по напряжению НП $3U_0$ используется для организации сигнализации замыкания на землю в сети, а также как пусковой орган токовых защит от ОЗЗ при наличии двух и более присоединений. В случае, когда сеть состоит исключительно из одного присоединения, неселективная защита может выполняться на отключение этого присоединения при ОЗЗ.
- ненаправленные токовые защиты НП (код ANSI 50/51N) используются при уровнях токов ОЗЗ, достаточных для обеспечения требуемого коэффициента чувствительности, в том числе в случае низкоомного резистивного заземления нейтрали, а также в сетях с большим числом присоединений.

- направленная токовая защита НП (код ANSI 67N) используется при недостаточной чувствительности ненаправленных токовых защит НП в сетях с высокоомным резистивным заземлением нейтрали, с малыми значениями емкостных токов (десятые доли и единицы ампер) в сетях с изолированной нейтралью, а также в сетях с низкоомным резистивным заземлением нейтрали;
- защиты от ОЗЗ на высших гармониках для распределительных сетей 6-35 кВ с малыми емкостными токами (до 10–15 А) в общем случае не используются, их применение требует специального обоснования на основе исследования гармонического состава тока замыкания на землю в конкретной сети. Загрубление уставок защит на высших гармониках для их настройки в ходе эксплуатации может приводить к отказам в срабатывании при ОЗЗ на защищаемом присоединении и технически неоправданно;
- защиты, основанные на использовании переходных составляющих токов и напряжений НП, целесообразно применять исключительно в комплексе с токовыми направленными защитами: сигнал на отключение поступает только при одновременном срабатывании обоих типов защит.
- защиты, реагирующие на активную составляющую в токе нулевой последовательности. Для правильной работы такой защиты требуется искусственно увеличить активную составляющую тока нулевой последовательности. Защиты, реагирующие на активную составляющую в токе НП, наиболее эффективно применять в сетях с резистивным заземлением нейтрали.
- защиты, использующие замер низкочастотных гармонических составляющих в токе нулевой последовательности 3I0 и измерении наложенного на первичную сеть контрольного тока непромышленной частоты. При замыкании на землю наложенный ток протекает только по поврежденному присоединению. Данная защита может работать как на сигнал, так и на отключение.

13.1.5 Для локализации поврежденного участка при ОЗЗ в распределительных сетях 6-35 кВ с любым типом заземления нейтрали могут использоваться системы индикации короткого замыкания (ИКЗ).

13.1.6 Выбор уставок ненаправленных токовых защит от ОЗЗ приведен в Приложении В.1.

13.1.7 Согласование защит разных подстанций и РП прилегающей сети при использовании ненаправленных токовых защит необходимо производить путем установки разных выдержек времени срабатывания, если это допустимо по условиям электробезопасности, с шагом селективности 0,2-0,3 с (в

зависимости от рекомендаций производителя защит) для микропроцессорных терминалов или 0,5 с для электромеханических реле, при этом максимальная выдержка времени должна быть у защит от ОЗЗ питающей электростанции или ПС.

13.1.8 При недостаточном коэффициенте чувствительности ненаправленных токовых защит присоединений защиты от ОЗЗ этих присоединений следует выполнять направленными для сетей с изолированной нейтралью и нейтралью, заземленной через высокоомный резистор. Выбор уставок для направленных защит от ОЗЗ приведен в Приложении В.2.

13.1.9 Для режимов нейтрали с удержанием ОЗЗ возможно возникновение перемежающихся (прерывистых) дуг, характеризующихся паузами между погасаниями и повторными зажиганиями дуги. В этом случае защиты от ОЗЗ на ВЛ или смешанных линиях, имеющие стандартную схему обеспечения выдержки времени, могут отказать. Для бесперебойного функционирования защиты в рассматриваемом случае необходимо обеспечить «запоминание» на некоторое время факта запуска защиты. Если в течение установленного времени запоминания ток НП появится вновь, защита должна срабатывать.

13.1.10 Применение АПВ на кабельных линиях 6-35 кВ после отключения ОЗЗ следует исключить по причине возможного перехода ОЗЗ в междуфазные короткие замыкания. На кабельно-воздушных линиях 35 кВ допускается однократное АПВ. Выбор варианта АПВ (однократное, двукратное, отказ от АПВ) на кабельно-воздушных линиях 6–20 кВ осуществляется для конкретной сети по результатам анализа количества успешных и неуспешных АПВ в текущих условиях эксплуатации сети.

13.1.11 Для защиты кабельно-воздушных линий и ВЛ 6-35 кВ от ОЗЗ с высоким переходным сопротивлением при обрыве провода целесообразно использовать комбинации защит, работающие на разных принципах: направленная токовая защита НП в пределах своей чувствительности реагирует на ОЗЗ, токовая защита обратной последовательности отключает ВЛ при обрыве провода. Недостаточная чувствительность токовой защиты обратной последовательности может иметь место при малых токах нагрузки в нормальном режиме, при этом в качестве входного сигнала защиты можно использовать отношение токов обратной последовательности и прямой последовательности $I_2/I_1 \approx$ const в нормальном режиме.

13.1.12 В случаях, когда питание секции РП (РТП) осуществляется по двум линиям параллельного питания, следует использовать направленные защиты от ОЗЗ в вводных ячейках РП.

13.1.13 При малых емкостных токах (как правило, не более 3-5 А) в сетях собственных нужд электростанций с изолированной нейтралью ток в месте повреждения имеет перемежающийся характер, что не гарантирует надежное функционирование устройств релейной защиты от ОЗЗ, основанной на измерении тока основной гармоники. Даже при устойчивом замыкании на землю не на всех присоединениях обеспечивается чувствительность защит от ОЗЗ, особенно при возникновении ОЗЗ в обмотке электродвигателя. В этих случаях применяются защиты с наложенным током или на высших гармониках для распределительных сетей.

13.1.14 Для защиты генераторов от ОЗЗ в обмотке статора допустимо также применять защиты от однофазных замыканий по $3U_0$, напряжению третьей гармоники или защиты с наложенным током. Уставки защит от ОЗЗ выбираются в соответствии с требованием производителя устройств РЗА.

13.2 Сети с изолированной нейтралью

13.2.1 Защиты от ОЗЗ на отходящих присоединениях в сети с изолированной нейтралью обычно работают на сигнал. В целях сокращения области повреждения, снижения вероятности перехода ОЗЗ в КЗ и возникновения многоместных повреждений по решению технического руководства предприятия может быть реализовано действие релейной защиты от ОЗЗ на отключение.

13.2.2 На отходящих присоединениях в сетях с изолированной нейтралью требуемой чувствительности ненаправленных защит от ОЗЗ можно добиться только при условии достаточно равномерного распределения емкостных токов между присоединениями секций шин.

В случае, если ненаправленная токовая защита не удовлетворяет требованию по чувствительности, необходимо использовать направленную токовую защиту.

13.2.3 Если вышеперечисленные защиты не удовлетворяют требуемой чувствительности, то следует применять более сложные защиты, например, защиты, основанные на относительном замере токов НП промышленной частоты. Такая защита запускается при превышении уставки напряжения нулевой последовательности. Затем защита проводит опрос всех присоединений и выявляет повреждение путем сравнения значений токов. Присоединение, где значение тока – наибольшее, считается поврежденным.

13.3 Сети с компенсированной нейтралью (с компенсацией емкостного тока ОЗЗ)

13.3.1 В сетях с компенсацией емкостного тока ОЗЗ требуемой чувствительности защит от ОЗЗ невозможно добиться, используя ненаправленные

токовые защиты. При компенсации емкостного тока ОЗЗ, ток основной гармоники в месте повреждения имеет небольшое значение, что не позволяет обеспечить требуемую чувствительность защит.

13.3.2 В сетях с компенсацией емкостного тока также нецелесообразно использовать направленные токовые защиты. Такие сети могут работать в режиме недокомпенсации или перекомпенсации емкостного тока, в следствие чего меняется направление тока ОЗЗ, что может приводить к ложной работе защит от ОЗЗ.

13.3.3 В сетях с компенсацией емкостного тока ОЗЗ следует использовать специализированные защиты от ОЗЗ, работающие на других принципах:

- защиты, реагирующие на высшие гармоники в токе НП;
- защиты, основанные на использовании переходных составляющих токов и напряжений НП;
- защиты на наложенном токе (например, 25 Гц от специального генератора наложенного тока).

13.3.4 В сетях с компенсацией емкостного тока ОЗЗ рекомендуется использовать централизованные защиты от ОЗЗ, охватывающие сразу все присоединения секции или всей подстанции. Справочная информация по централизованным устройствам защиты от ОЗЗ (системам ОПФ) некоторых производителей и принципам их работы представлены в Приложении Г, допускается применение других аналогичных устройств.

13.4 Режим с резистивным заземлением нейтрали

13.4.1 На отходящих присоединениях устанавливается ненаправленная токовая защита НП с действием на отключение присоединений при низкоомном резистивном заземлении нейтрали и с действием на отключение или сигнал при высокоомном резистивном заземлении нейтрали. При недостаточной чувствительности ненаправленной токовой защиты от ОЗЗ в сетях с высокоомным заземлением нейтрали необходимо перейти на режим низкоомного заземления нейтрали или использовать более сложные виды защит.

13.4.2 При низкоомном резистивном заземлении релейная защита от ОЗЗ должна устанавливаться на всех присоединениях 6-35 кВ с обязательным действием на отключение этих присоединений. Активный ток резистора с большим запасом обеспечивает требуемые значения коэффициента чувствительности при ОЗЗ на защищаемых присоединениях.

13.4.3 Селективность по току защит НП присоединений определяется тем, что активная составляющая тока ОЗЗ от резистора в нейтрали протекает только через повреждённое присоединение. Через остальные присоединения протекают только собственные ёмкостные токи нулевой последовательности,

от которых защита должна быть надёжно отстроена. При наличии промежуточной подстанции между центром питания и тупиковой подстанцией селективность обеспечивается выдержками времени.

13.4.4 При резистивном заземлении нейтрали селективность может быть обеспечена при использовании ненаправленных токовых защит НП с разными выдержками времени (коды ANSI 50/51N) или направленных защит от ОЗЗ (коды ANSI 67/67N).

13.4.5 При выборе уставок токовых защит от замыканий на землю в сетях с низкоомным заземлением нейтрали расчет тока ОЗЗ необходимо выполнять с учетом параметров выбранного ТЗН или ФНП и фактического тока резистора, т.е. с учетом ограничения активного тока сопротивлением ТЗН или ФНП в соответствии с положениями раздела 10.2.

13.4.6 В сетях с резистивным заземлением нейтрали также существует возможность использования защит, работающих на других принципах:

- защиты, реагирующие на активную составляющую в токе НП;
- защиты, реагирующие на высшие гармоники в токе НП;
- защиты, основанные на использовании переходных составляющих токов и напряжений НП;
- защиты на наложенном токе.

13.4.7 При неотключении ОЗЗ в сети с низкоомным резистивным заземлением нейтрали (отказ выключателя или отказ релейной защиты поврежденного присоединения с ОЗЗ) должен отключаться следующий по ступени селективности выключатель РП – секционный или вводной. Если этого не происходит, соответствующий фидер должен отключиться с центра питания. Повышение выдержек по времени защит от замыканий на землю «от хвоста к голове» обеспечивает резервирование по отключению поврежденного присоединения с ОЗЗ.

13.4.8 При отказе защит по отключению повреждённого присоединения должно быть выполнено резервное действие защит от ОЗЗ по отключению присоединения с низкоомным резистором и, при необходимости – секции (ввода), к которой присоединено повреждённое присоединение, с целью защиты низкоомного резистора от термического повреждения и предотвращению работы сети в режиме ОЗЗ с большим током повреждения.

13.4.9 При ОЗЗ непосредственно на секции шин, к которой подключен низкоомный резистор, защита должна отключать секцию (ввод) с запретом АПВ и АВР.

13.4.10 При низкоомном резистивном заземлении нейтрали с использо-

ванием кабельных ТТНП для обеспечения селективности, как правило, используются ненаправленные/направленные токовые защиты НП с независимой время-токовой характеристикой.

13.4.11 Номинал резистора, в случае построения защиты на базе трехтрансформаторных фильтров тока НП, следует выбирать исходя из условия, чтобы активный ток ОЗЗ не превышал максимальный нагрузочный ток самого мощного присоединения на секции шин. Однако из-за высоких значений токов междуфазных КЗ защита от ОЗЗ может не удовлетворять требованиям чувствительности. В таком случае потребуется вводить выдержку времени, на ступень селективности, превышающую выдержки времени защиты от междуфазных КЗ, и отстраивать защиту НП от небаланса, вызванного максимальным нагрузочным током конкретного присоединения.

13.4.12 Эффективность защиты от замыканий на землю сети 6-35 кВ ПС с высокоомным резистивным заземлением нейтрали при объединении с сетью, в которой нейтраль изолирована или заземлена через дугогасящий реактор, снижается. В этом случае возможна неселективная работа релейных защит от ОЗЗ. Поэтому на смежных центрах питания, РП и ТП релейная защита от ОЗЗ должна быть выполнена таким образом, чтобы обеспечить возможность определения поврежденного присоединения как при резистивном заземлении, так и при переходе сети (в аварийных или ремонтных режимах) в режим изолированной нейтрали или заземления через ДГР.

13.5 Режим с комбинированным заземлением нейтрали

13.5.1 В сетях с комбинированным заземлением нейтрали нецелесообразно использовать направленные токовые защиты. Такие сети могут работать в режиме недокомпенсации или перекомпенсации емкостного тока, в следствие чего меняется направление тока ОЗЗ, что может приводить к ложной работе защит от ОЗЗ.

13.5.2 Применение ненаправленных токовых защит в сетях с комбинированным заземлением нейтрали возможно при условии точной компенсации емкостного тока в месте замыкания и достаточной величины активного тока резистора.

13.5.3 В прилегающей сети 6-35 кВ, в том числе на отходящих от РП фидерах, в случае относительно малого собственного емкостного тока при правильном выборе активного резистора возможно настроить токовую ненаправленную защиту НП. В этом случае предпочтительнее использовать микропроцессорные защиты, чем электромеханические реле (токовое реле, реле времени и указательное), так как первые более устойчивы к броску емкостного

тока в первый момент замыкания.

13.5.4 В качестве защит от ОЗЗ в сетях с комбинированным заземлением нейтрали целесообразно применять более сложные виды защит, например, защиту, реагирующую на активную составляющую тока нулевой последовательности. При наличии высокоомного резистора, такая защита будет селективно определять поврежденное присоединение. Защита по активной составляющей в сетях с комбинированным заземлением нейтрали может работать как на сигнал, так и на отключение.

13.5.5 Для сетей с комбинированным заземлением нейтрали для защиты от замыканий на землю также возможно использовать централизованные защиты от ОЗЗ, охватывающие сразу все присоединения секции или всей подстанции. Справочная информация по централизованным устройствам защиты от ОЗЗ (системам ОПФ) некоторых производителей и принципам их работы представлены в Приложении Г, допускается применение других аналогичных устройств.

13.6 Особенности применения трансформаторов тока нулевой последовательности

13.6.1 Для получения сигнала тока нулевой последовательности рекомендуется использовать неразъемные ТТНП (тип ТЗЛ, ТЗЛЭ, ТЗЛМ, ТЗЛК и др.). Если установка неразъемных ТТНП физически невозможна, допускается применять разъемные ТТНП. В этом случае предпочтение следует отдавать трансформаторам тока с вторичными обмотками в обеих разъемных частях.

13.6.2 На линиях параллельного питания РП ТТНП устанавливаются на каждом кабеле, их вторичные обмотки соединяются параллельно.

13.6.3 Наиболее распространенной является схема подключения реле тока к ТТНП, приведенная на рисунке 13.1.

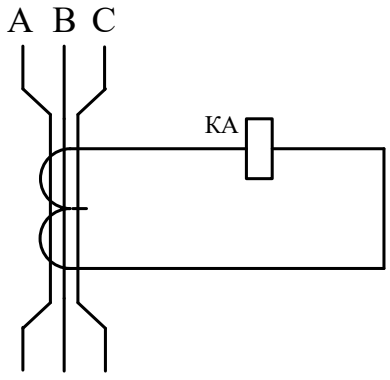
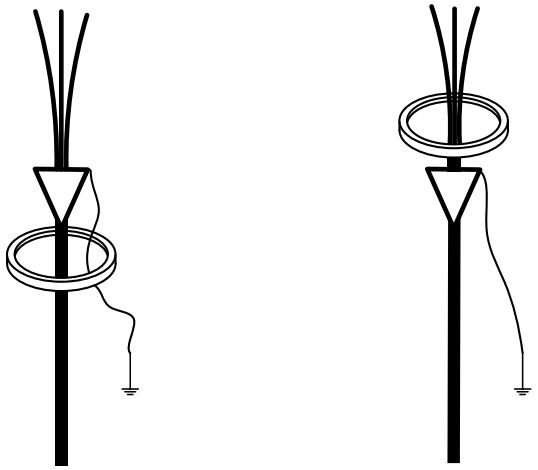


Рисунок 13.1 – Схема подключения реле тока: к ТТНП

Обязательным условием правильной работы защиты нулевой последовательности является пропускание заземляющего шлейфа экрана и

оболочки кабеля через ТТНП, если ТТНП устанавливается ниже кабельной разделки, как показано на рисунке 13.2 а. Если ТТНП устанавливается выше кабельной разделки, пропускать заземляющий шлейф экрана и оболочки кабеля через ТТНП не следует (рисунок 13.2 б).



а б

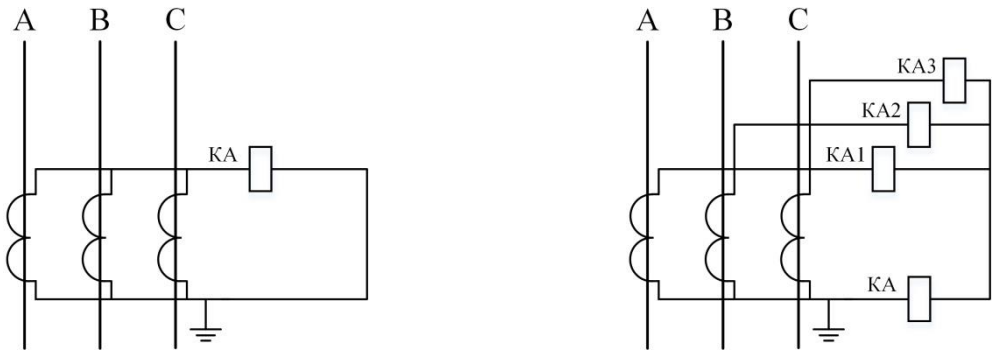
Рисунок 13.2 – Схема заземления экрана и оболочки кабеля

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

13.6.4 При отсутствии ТТНП на присоединениях 6-35 кВ и наличии терминалов РЗ с функцией вычисления значения $3I_0$, подключённых к группе из трех трансформаторов тока, для организации защиты от ОЗЗ использовать вычисленное значение $3I_0$. Применение данного решения возможно при сочетании необходимых и достаточных параметров:

- тока замыкания на землю;
- коэффициента трансформации трансформаторов тока;
- диапазона регулирования тока срабатывания защиты.

13.6.5 В случае невозможности установить ТТНП на КЛ, выполненной однофазными СПЭ-кабелями большого сечения, допускается использовать фильтр тока НП, собранный на трех фазных ТТ (рисунок 13.3). Достоинствами этих схем являются простота и относительно невысокая стоимость. Недостатком этих схем является низкая чувствительность, связанная с необходимостью отстройки защит от небалансов фильтра, собранного на фазных ТТ, которые характеризуются высокими, относительно емкостного тока ОЗЗ, значениями первичных токов.



а) б)

Рисунок 13.3 – Схема подключения реле тока: а) через фильтр НП на трех фазных ТТ; б) на фильтре тока НП по четырехрелейной схеме

Приложение А
(справочное)
Способы определения тока замыкания на землю в электроустановках 6-35 кВ

А.1 Общие сведения

Измерения емкостного тока регламентированы п. 571, п. 621 ПТЭ ЭСиС.

Согласно п.621 ПТЭ ЭСиС *измерение емкостных токов, токов дугогасящих реакторов, токов замыкания на землю и напряжений смещения нейтрали в сетях с компенсацией емкостного тока должно проводиться при вводе в эксплуатацию дугогасящих реакторов и значительных изменениях режимов сети, но не реже 1 раза в 6 лет, а также для сетей сложной конфигурации, когда расчетным путем точные значения емкостных токов получить невозможно*.

Выбор метода измерения и способа проведения испытаний осуществляется на основании требований заказчика в части объема необходимых результатов с учетом условий безопасности и сохранения бесперебойного электроснабжения.

Из методов измерения или определения емкостного тока ОЗЗ на практике в основном применяются следующие:

- прямой метод – создание искусственного «металлического» ОЗЗ;
- создание искусственной несимметрии фазных напряжений посредством подключения дополнительной проводимости к фазе сети (косвенный метод);
- по «резонансной» кривой зависимости напряжения смещения нейтрали от тока ДГР (косвенный метод).

А.2 Косвенные методы определения емкостного тока ОЗЗ

«Косвенные» методы определения емкостного тока ОЗЗ подробно описаны в [8] и приведены далее в подразделах А.2.1 – А.2.5.

А.2.1 Емкостный ток может быть определен по результатам измерений напряжения на нейтрали U_N по кривой зависимости напряжения смещения нейтрали от тока ДГР. Значение емкостного тока I_C, А, определяется по формуле:

$$I_C = \frac{I_{2k} - \frac{U_{01}}{U_{02}} \cdot I_{1k}}{1 - \frac{U_{01}}{U_{02}}}, \quad (А.1)$$

где I_{1k} и I_{2k} – значения установленных токов компенсации, А;

U_{01} и U_{02} – возникшие при этих значениях напряжения смещения нейтрали, В.

Для подсчета значения емкостного тока необходимо брать вышеуказанные значения либо на непрерывно возрастающем участке, либо на непрерывно убывающем участке полученной кривой зависимости напряжения смещения нейтрали от тока ДГР.

Точность данного метода в большей степени зависит от соответствия положения плунжера/ответвления/ступени реактора реальному индуктивному току и от количества измерений.

А.2.2 Емкостный ток может быть определен по результатам измерения тока, протекающего через реактор со ступенчатым регулированием при двух его настройках. Значение емкостного тока I_C, А, определяется по формуле:

$$I_C = \frac{I_{2ИЗМ} - I_{1ИЗМ}}{\frac{I_{2ИЗМ}}{I_{2k}} - \frac{I_{1ИЗМ}}{I_{1k}}}, \quad (А.2)$$

где I_{1k} и I_{2k} – значения установленных токов компенсации, А;

$I_{2ИЗМ}$ и $I_{1ИЗМ}$ – фактические значения протекающих через реактор токов при двух его настройках, А.

А.2.3 При применении плавнорегулируемого реактора емкостный ток сети определяется по значению тока реактора, настроенного в резонанс с емкостью сети. Реактор тогда настроен в резонанс, когда на нейтрали сети появляется наибольшее напряжение смещения нейтрали. Емкостный ток сети I_C, А, определяется по формуле:

$$I_C = I_{ДГР_{изм}} \cdot \frac{U_Ф}{U_{0МАКС}}, \quad (А.3)$$

где $I_{ДГР_изм}$ – ток, протекающий через реактор при наибольшем смещении нейтрали, А;

$U_{0_МАКС}$ – значение наибольшего смещения нейтрали, В.

Для достижения необходимой точности измерения значение $U_{0_МАКС}$ должно составлять 5÷15% $U_ф$. При необходимости несимметрия сети может быть увеличена путем подключения к одной из фаз емкости 0,5÷1% суммарной емкости сети.

А.2.4 Определить емкостный ток в кабельной сети без ДГР можно с помощью создания искусственной несимметрии при подключении дополнительной емкости, например, косинусного конденсатора, к одной из фаз сети. Дополнительная емкость должна составлять 10÷15% предполагаемой суммарной емкости всех фаз сети. Емкостный ток сети I_C, А, при этом определяется по формуле:

$$I_C = 314 U_ф \Delta C \left(\frac{U_Ф}{U_{НС}} - 1\right) 10^{-6}, \quad (А.4)$$

где ΔC – дополнительная емкость, мкФ;

$U_{НС}$ – напряжение несимметрии при подключении дополнительной емкости, кВ.

При отсутствии или недоступности нейтрали сети определение емкостного тока I_C можно выполнить расчетом по формуле:

$$I_C = 314 \cdot U_Ф \Delta C \left(\frac{1}{\frac{U_{1Ф}\sqrt{3}}{U_{1Л}} - \frac{U_{2Ф}\sqrt{3}}{U_{2Л}}}\right) 10^{-6} (А), \quad (А.5)$$

где $U_{1Ф}$ и $U_{2Ф}$ – напряжения какой-либо фазы сети относительно земли до и после подключения дополнительной емкости, измеренное на вторичной стороне трансформатора напряжения контроля изоляции, В;

$U_{1Л}$ и $U_{2Л}$ – линейные напряжения сети до и после подключения дополнительной емкости, В.

Эта формула применима как в кабельной, так и в воздушной сети.

А.2.5 Емкостный ток сети и ток ДГР могут быть определены методом искусственного смещения нейтрали от дополнительного источника напряжения. Это единственный из «косвенных» методов, позволяющий вычислить первые гармонические составляющие емкостного тока и тока реактора. Однако он слишком трудоемкий, поскольку требует использования большого количества оборудования, вследствие чего и не нашел применения на практике:

- несколько ячеек РУ с выключателями, включая ячейку с ДГР;
- три трансформатора тока;
- дополнительный источник напряжения (его напряжение выбирается равным примерно 30%$U_Ф$ для воздушной сети и 10%$U_Ф$ – для кабельной), устанавливаемый за отдельным выключателем, который должен быть оборудован токовой отсечкой;
- два вольтметра, амперметр и ваттметр.

А.3 Прямой метод измерения тока ОЗЗ

Прямым методом измерения значения емкостного тока сети является метод искусственного замыкания фазы сети на землю. Особенности данного метода в общей постановке рассмотрены в [8], которые в недостаточной мере отражают современное развитие техники и технологий, опыт эксплуатации и практику проведения таких измерений.

Метод измерения тока ОЗЗ с помощью искусственного «металлического» замыкания фазы сети на землю является наиболее информативным и позволяет с высокой точностью оценить необходимые параметры переходного и установившегося тока ОЗЗ, а также фазных напряжений по результатам осциллографирования. Рассмотренные выше способы являются косвенными и позволяют найти требуемые параметры сети в результате пересчетов с некоторой погрешностью (ошибкой), которая может достигать десятков % относительно фактических значений (в том числе емкостного тока), в зависимости от текущей схемы сети, параметров основного оборудования, вида и погрешностей измерительных датчиков и аппаратуры.

Во время опытов искусственного «металлического» замыкания фазы сети на землю выполняется осциллографирование тока замыкания на землю с последующим вычислением составляющей промышленной частоты и высших гармоник. Для получения наиболее полной информации о переходных процессах при ОЗЗ выполняется осциллографирование фазных напряжений.

Для сетей с оборудованием, испытанным в соответствии с нормативными требованиями, как показывает опыт многочисленных подобных экспериментов, данный вид воздействий не представляет опасности для изоляции оборудования.

При проведении измерений оборудование размещается на резервных или рабочих присоединениях *(которые можно вывести из работы на время подключения измерительного оборудования)*.

Для создания искусственного «металлического» замыкания на землю используется выключатель резервного или рабочего присоединения.

Согласно методике, изложенной в [8], с двух полюсов этого выключателя со стороны питания снимается ошиновка, все три полюса соединяются последовательно с помощью «закоротки», которая должна быть рассчитана на ток КЗ. *При гарантии срабатывания вы-*

ключателя перешиновку полюсов можно не производить. Защита данного выключателя (токовая отсечка) настраивается на ток срабатывания, равный пятикратному значению ёмкостного тока сети.

Для измерения тока замыкания на землю одна из фаз сети за выключателем соединяется через «закоротку» с землей, в цепи закоротки устанавливается трансформатор тока (ТТ) классом точности не ниже 1,0. Его номинальное напряжение может быть любым. Сопротивление вторичных цепей не должно превышать значение, допустимое для работы ТТ в классе точности 1,0.

Включение и отключение выключателя должно осуществляться дистанционно *(по телеуправлению с главного щита управления или с помощью выносной кнопки)*. Включение производится по команде ответственного за проведение экспериментов, отключение – через 1–2 секунды.

Количество замыканий на землю при проведении измерений должно быть минимальным, но достаточным для получения стабильного результата (1–3 опыта).

Все работы по замерам токов ОЗЗ должны выполняться в соответствии с разработанной программой, по оперативной заявке и наряду на производство работ в электроустановках.

В сетях с компенсацией емкостных токов измерения тока реакторов производятся одновременно с измерением тока замыкания на землю. В конце испытаний для контроля результатов измерений целесообразно измерить полный емкостный ток сети при отключенных дугогасящих реакторах.

Место установки измерительных приборов должно выбираться на безопасном удалении от выключателя, используемого для создания ОЗЗ (на ОРУ не менее 8 м, в ЗРУ не менее 4 м). Для питания измерительного оборудования должно быть подведено напряжение 220 В 50 Гц.

Для осциллографирования тока замыкания на землю сигнал снимается с ТТ через активный шунт на цифровой осциллограф.

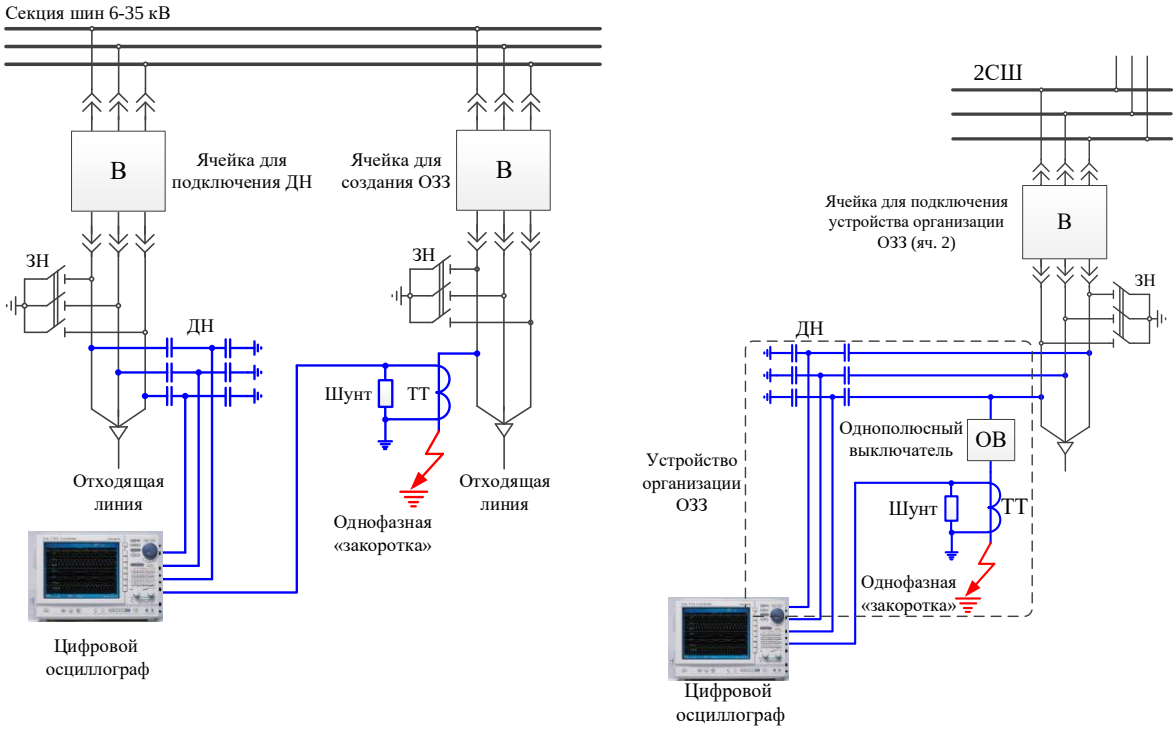
Регистрацию фазных напряжений рекомендуется производить с помощью высоковольтных ёмкостных делителей напряжения (ДН), с низкого плеча которых сигнал снимается на вход цифрового осциллографа. Устанавливаются ДН за отдельным выключателем в сторону отходящей линии, подключаются к фазным проводам (шинам) при помощи высоковольтных проводов. К ДН со стороны низкого напряжения при помощи измерительных кабелей длиной до 20 м подключаются измерительные приборы.

Перед каждым опытом искусственного ОЗЗ необходимо проверять отсутствие в сети замыкания на землю по показаниям шинных ТН.

Между всеми участниками экспериментов должна быть обеспечена устойчивая связь.

На рисунке А.2,а приведена общая схема подключения оборудования для регистрации тока ОЗЗ и фазных напряжений при использовании двух присоединений.

При проведении измерений тока ОЗЗ прямым методом возможно использовать устройство организации ОЗЗ, оснащенное компактным однополюсным вакуумным выключателем с дистанционным управлением, высоковольтными делителями напряжения и трансформатором тока. В этом случае задействуется только одно присоединение на секции шин (рисунок А.2,б).



а) б)

Рисунок А.2 – Общая схема подключения оборудования для регистрации тока ОЗЗ и фазных напряжений при использовании: а) двух присоединений; б) одного присоединения

Требования к настройке релейной защиты:

– вывести из работы АВР секционных выключателей 10 кВ и АПВ соответствующих вводных выключателей 10 кВ секций, на которых будут проводиться измерения тока ОЗЗ. Это делается для обеспечения невозможности повторной подачи напряжения при возникновении замыканий на оборудовании, участвующем в эксперименте.;

– уменьшить уставки защит по току и по времени (выдержки по времени – нулевые либо минимальные) выключателей, используемых для подключения однофазной закоротки и ДН (для скорейшего устранения искусственного замыкания на «землю» в случае возникновения второго ОЗЗ в сети 10 кВ с возможностью повреждения высоковольтного и измерительного оборудования).

Приложение Б
(справочное)
Методика расчета тока замыкания на землю в электроустановках 6-35 кВ

Емкостный ток однофазного замыкания на землю определяется по формуле:

$$I_C = 3 \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot \text{C}_\text{ф} \cdot 10^{-3}, \text{ А} \quad \text{(Б.1)}$$

где – номинальное напряжение, кВ;

ω – угловая частота, рад;

C_ϕ – суммарная емкость одной фазы электроустановок на землю, мкФ.

При расчете ёмкостных токов в сетях электрических станций при работе генератора на сборные шины генераторного напряжения, сетях собственных нужд электрических станций блочного типа и распределительных сетях 6-35 кВ не учитывается емкость силовых трансформаторов, ячеек, коммутационных аппаратов, опорных изоляторов, шин, токопроводов, трансформаторов напряжения, ОПН. В расчете емкостных токов необходимо учитывать емкость кабелей, воздушных линий, генераторов, двигателей, RC-цепочек.

Емкость кабеля и ВЛ определяется погонной емкостью на землю и длиной. Если линия выполнена двумя или более параллельными КЛ/ВЛ, то длина умножается на количество параллельных линий.

Удельная емкость кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, этиленпропиленовой резины, поливинилхлоридной изоляцией принимается по данным каталогов производителей.

В таблицах Б.1 – Б.4 приведены погонные емкости КЛ и ВЛ, Б

Емкость одной фазы обмотки статора по отношению к земле турбогенератора, неявнополюсных синхронных и асинхронных электродвигателей при отсутствии паспортных данных определяется по формуле:

$$\text{C}_\Gamma = \frac{k \cdot S}{1.2 \cdot \sqrt{U_{\text{ном}}(1+0{,}08 \cdot U_{\text{ном}})}}, \text{ мкФ/фазу} \quad \text{(Б.2)}$$

где S – номинальная мощность генератора (двигателя), МВА;

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

κ = 0,0187 при 15-20 ˚С.

Емкость одной фазы обмотки статора по отношению к земле гидрогенератора и явнополюсных синхронных электродвигателей при отсутствии паспортных данных определяется по формуле:

$$\text{C}_\Gamma = \frac{k \cdot S^{\frac{3}{4}}}{3 \cdot (U_{\text{ном}}+3600) \cdot n^{\frac{1}{3}}}, \text{ мкФ/фазу} \quad \text{(Б.2)}$$

где S – номинальная мощность генератора, кВА;

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

κ – коэффициент, зависящий от класса изоляции (для класса Б при 25 ˚С равен 40);

n – скорость вращения, об/мин.

Ток замыкания на землю в схемах 6 - 20 кВ блока генератор-трансформатор определяется суммарной емкостью на землю оборудования:

- генератор;

- конденсаторов для защиты от перенапряжений и снижения скорости восстановления напряжения на контактах генераторного выключателя;

- повышающего блочного трансформатора;
- трансформатора питания собственных нужд;
- токопровода подключения генератора к повышающему блочному трансформатору и трансформатору собственных нужд.

Наибольший вклад в емкость на землю вносят генераторы и конденсаторы для защиты от перенапряжений и снижения скорости восстановления напряжения на контактах генераторного выключателя. Суммарная емкость остального оборудования составляет порядка 6%.

Таблица Б.1 – Емкость кабеля с изоляций из сшитого полиэтилена и этиленпропиленовой резины

Сечение жилы, мм^2	Емкость кабеля, мкФ/км				
	Напряжение сети, кВ				
	6	10	15	20	35
35	0,29	–	–	–	–
50	0,32	0,25	0,21	0,17	0,14
70	0,37	0,29	0,23	0,19	0,16
95	0,41	0,32	0,26	0,21	0,18
120	0,45	0,35	0,28	0,23	0,19
150	0,50	0,38	0,30	0,26	0,20
185	0,54	0,42	0,33	0,27	0,22
240	0,59	0,46	0,37	0,29	0,24
300	0,60	0,51	0,41	0,32	0,26
400	0,64	0,57	0,46	0,35	0,29
500	0,66	0,63	0,50	0,39	0,32
630	0,73	0,70	0,55	0,43	0,35
800	0,82	0,77	0,61	0,49	0,40
1000	–	0,87	0,67	0,57	0,39

Таблица Б.2 – Расчетные емкости C_0 для трехжильных кабелей с поясной изоляцией и секторными жилами по ГОСТ 18410-73, мкФ/км, на различные напряжения, кВ

Сечение жилы, мм^2	Емкость кабеля C_0, мкФ/км		
	Напряжение сети, кВ		
	3	6	10
25	0,186	0,137	0,109
35	0,217	0,158	0,124
50	0,253	0,183	0,142
70	0,295	0,214	0,165
95	0,342	0,247	0,192
120	0,387	0,278	0,215
150	0,435	0,311	0,238
185	0,485	0,343	0,262
240	0,552	0,383	0,292

Таблица Б.3 – Удельные емкости и емкостные токи замыкания на землю кабелей ОСБ, А/км

Сечение жилы, мм^2	Кабели 20 кВ		Кабели 35 кВ	
	Емкость кабеля, мкФ/км	Ток ОЗЗ, А/км	Емкость кабеля, мкФ/км	Ток ОЗЗ, А/км
25	0,184	2,0		-
35	0,202	2,2		-
50	0,230	2,5		-
70	0,257	2,8	0,194	3,7
95	0,285	3,1	0,215	4,1
120	0,313	3,4	0,231	4,4
150	0,340	3,7	0,252	4,8
185	0,368	4,0	0,273	5,2

Таблица Б.4 – Удельные емкости для воздушных сетей, мкФ/км (усредненные значения)

Тип линии	Емкость ВЛ, мкФ/км			
	Номинальное напряжение сети, кВ			
	6	10	20	35
Одноцепная без троса	0,0052	0,0050	0,0050	0,0050
Одноцепная с тросом	0,0061	0,0061	0,0062	0,0058
Двухцепная	0,0043	0,0042	0,0041	0,0041

Приложение В
(рекомендуемое)
Выбор уставок токовых защит от ОЗЗ

В.1 Выбор уставок ненаправленных токовых защит от ОЗЗ

В.1.1 Защиты отходящих присоединений

Входным сигналом для данной защиты является ток нулевой последовательности ТТНП, установленного на отходящем присоединении.

1) Выбор тока срабатывания защиты по условию несрабатывания защиты при внешнем ОЗЗ

Защита отстраивается от максимального собственного емкостного тока защищаемого присоединения.

Ток срабатывания защиты при наличии кабельного ТТНП определяется по выражению:

$$I_{\text{СЗ}} \geq K_{\text{Н}} \cdot K_{\text{бр}} \cdot I_{C\text{защ}}, \quad \text{(В.1)}$$

где $K_{\text{Н}}$ – коэффициент надежности, принимается равным 1,2;

$K_{\text{бр}}$ – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока (принимается для электромеханических реле типа РТ-40 равным 3-5, для реле РТЗ-51 равным 2-3, для реле РТЗ-50 равным 3-4, для микропроцессорных терминалов равным 1,2 , при времени срабатывания защиты более 0,3 с для всех типов реле равным 1);

$I_{C\text{защ}}$ – максимальное значение собственного емкостного тока защищаемого присоединения при внешнем ОЗЗ.

При выборе уставок срабатывания необходимо руководствоваться рекомендациями разработчика и изготовителя защиты.

При использовании на отходящем присоединении трехтрансформаторного фильтра тока НП ток срабатывания защиты определяется как:

$$I_{\text{СЗ}} \geq K_{\text{Н}} \cdot \left(K_{\text{бр}} \cdot I_{C\text{защ}} + \text{К}_{\text{ПЕР}} \cdot I_{\text{НБ}}\right). \quad \text{(В.2)}$$

где $\text{К}_{\text{ПЕР}}$ - коэффициент, учитывающий увеличение тока небаланса в переходном режиме, принимается равным: 2 — при выдержке времени рассматриваемой ступени до 0,1 с; 1,5 — при выдержке времени до 0,3 с; 1 — при выдержке времени выше 0,5 — 0,6 с.

Ток небаланса трехтрансформаторного фильтра $I_{НБ}$, определяется как:

$$I_{\text{НБ}} = k_{\text{ОДН}} \cdot \varepsilon \cdot I_{\text{КЗ}max}, \quad \text{(В.3)}$$

где $k_{\text{ОДН}}$= 0,5÷1,0 – коэффициент однотипности трансформаторов тока;

ε = 0,1 – предельная погрешность трансформаторов тока;

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

Именно большие токи междуфазных КЗ приводят к появлению в трехтрансформаторных фильтрах тока НП значительных токов небаланса, от которых необходимо отстраивать защиту, если это не выполнено соответствующим выбором выдержки времени.

2) Проверка чувствительности защиты при расчетном токе срабатывания при ОЗЗ на защищаемом присоединении (требуемая чувствительность)

Проверка чувствительности защиты при расчетном токе срабатывания при ОЗЗ на

защищаемом присоединении выполняется по условию:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{ОЗЗ}}}{I_{\text{СЗ}}} \geq k_{\text{Чнорм}}, \quad \text{(В.4)}$$

где $I_{\text{ОЗЗ}}$ – полный ток ОЗЗ в сети промышленной частоты (геометрическая сумма емкостных токов, тока ДГР и тока резистора в зависимости от режима заземления нейтрали), протекающий через трансформатор тока нулевой последовательности присоединения, за исключением собственного емкостного тока присоединения;

$I_{\text{СЗ}}$ – ток срабатывания защиты;

$k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности.

Коэффициент чувствительности определяется для нормального режима работы сети и должен быть не менее:

$K_{\text{Чнорм}}$ =1,25 для защит КЛ, реагирующих на ток основной частоты;

$K_{\text{Чнорм}}$ =1,5 для защит КЛ, реагирующих на ток повышенной частоты;

$K_{\text{Чнорм}}$ =1,5 для защит ВЛ;

$K_{\text{Чнорм}}$ =1,5 для защит в сетях с резистивным заземлением нейтрали (при неисправности резистора в цепи заземления нейтрали или работа такой сети в режиме изолированной нейтрали $K_{\text{Чнорм}}$=1,2);

Вышеперечисленные значения коэффициента чувствительности соответствуют нормируемым значениям согласно п.22 – 23 Требований к РЗА.

В сетях с изолированной нейтралью: $I_{\text{ОЗЗ}} = I^{I}_{C\Sigma}$, (В.5)

где $I^{I}_{C\Sigma}$ – суммарный ёмкостный ток сети за вычетом ёмкостного тока защищаемого присоединения;

В сетях с резистивным заземлением нейтрали полный ток ОЗЗ определяется по выражению:

$$I_{\text{ОЗЗ}} = \sqrt{(I^{I}_{C\Sigma})^2 + (I_R)^2}, \quad \text{(В.6)}$$

где $I^{I}_{C\Sigma}$ – суммарный ёмкостный ток сети за вычетом ёмкостного тока защищаемого присоединения;

I_R – ток заземляющего резистора, протекающий по защите повреждённого присоединения.

В сетях с комбинированным заземлением нейтрали полный ток ОЗЗ определяется по выражению:

$$I_{\text{ОЗЗ}} = \sqrt{(I^{I}_{C\Sigma} - I_L)^2 + (I_R)^2} \quad \text{(В.7)}$$

Для сети с изолированной нейтралью в случае невыполнения условия по обеспечению коэффициента чувствительности для ненаправленной токовой защиты присоединения необходимо использовать защиту, основанную на другом принципе обеспечивающим требуемую селективность, либо реализовать резистивное заземление нейтрали.

При реализации резистивного заземления нейтрали и комбинированного заземления нейтрали нужный коэффициент чувствительности обеспечивается за счёт правильно выбранного номинала резистора, создающего дополнительный активный ток в присоединении с ОЗЗ (разделы 7 и 8). В случае, если величины активного тока, создаваемого высокоомным резистором, недостаточно для обеспечения требуемого коэффициента чувствительности,

следует применять защиты, основанные на других принципах или перевод сети на низкоомное заземление нейтрали.

При низкоомном заземлении нейтрали в месте повреждения определяется в основном активной составляющей, создаваемой резистором, коэффициент чувствительности защит может быть рассчитан по упрощенной формуле:

$$k_{\text{Ч}} = \frac{I_R}{I_{\text{СЗ}}}, \quad \text{(В.8)}$$

В.1.2 Защиты присоединения с резистором и секции шин

Входным сигналом для данной защиты является ток с трансформатора тока, установленного в цепи резистора.

Эта защита обеспечивает отключение источника питания (вводного и секционного выключателей) при ОЗЗ на шинах и присоединении резистора, а также обеспечивает дальнее резервирование в случаях отказа выключателей или защит отходящих присоединений. Функционально данная защита, как правило, входит в состав защит вводного и секционного выключателей. Эта защита также может воздействовать на выключатель присоединения с резистором.

Уставка срабатывания защиты по току определяется по выражению:

$$I_{\text{СЗ}} = \frac{I_{\text{ЗАЩ}min}}{k_{\text{Ч}}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}\cdot k_{\text{Ч}}\cdot Z_{N0}}, \quad \text{(В.9)}$$

где $I_{\text{ЗАЩmin}}$ – минимальный ток, протекающий через фильтр тока при ОЗЗ на защищаемом присоединении. Ток, протекающий через защиту при ОЗЗ на защищаемом присоединении, будет минимален, если через нее протекает только активный ток, обусловленный наличием резистора в нейтрали;

Z_{N0} – полное сопротивление в контуре нулевой последовательности, в который входит резистор:

$$Z_{N0} = \sqrt{(R_{T0} + 3R_N)^2 + (X_{T0})^2}, \quad \text{(В.10)}$$

где $X_{\text{Т0}}$ и $R_{\text{Т0}}$ – активное и индуктивное сопротивления ТЗН или ФНП,

R_N – сопротивление резистора в нейтрали.

Проверка данной защиты по условию отстройки по току не требуется.

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

$$t_{\text{СЗ}-\text{СЕКЦ}} = t_{\text{СЗ}max} + \Delta t, \quad \text{(В.11)}$$

где Δt – ступень селективности.

Рекомендуемые значения:

Δt=0,5 с при согласовании защиты с защитами отходящих присоединений, выполненными на электромеханических и полупроводниковых реле;

Δt=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:

$$t_{\text{СЗ}-\text{ВВОДА}} = t_{\text{СЗ}-\text{СЕКЦ}} + \Delta t. \quad \text{(В.12)}$$

Целесообразно иметь два набора уставок по времени на вводном выключателе. В нормальном режиме (при отключенном секционном выключателе) время срабатывания защиты вводного выключателя аналогично (В.9) должно быть равным:

$$t_{\text{СЗ}-\text{ВВОДА}} = t_{\text{СЗ}max} + \Delta t, \quad \text{(В.13)}$$

при этом должна обеспечивается термическая стойкость низкоомного резистора в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя.

В.1.3 Защиты высоковольтных электродвигателей для сетей с резистивным заземлением нейтрали

Главной целью резистивного заземления нейтрали в сетях с электродвигателями является быстрое отключение ОЗЗ релейной защитой для предотвращения выгорания активной стали статора и максимальный охват обмоток электрических машин защитой от ОЗЗ. При этом также обеспечивается подавление перенапряжений и феррорезонансных явлений.

Сопротивление резистора выбирают по условию обеспечения селективного срабатывания защит на отключение ОЗЗ (см. Раздел 9). Выбранный по этому условию резистор, как правило, создает активный ток, существенно превышающий емкостный.

Число витков обмотки, защищенной от ОЗЗ W, %, вычисляют по формуле

$$W = \left(1 - \frac{I_{\text{СЗ}}}{I_R}\right) \cdot 100, \quad \text{(В.14)}$$

где $I_{СЗ}$ – ток срабатывания защиты от ОЗЗ, А;

I_R - ток в заземляющем резисторе, А.

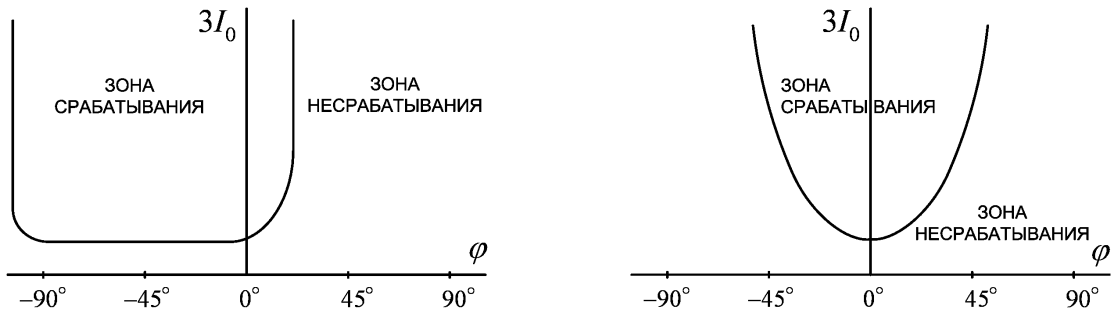
Увеличить зону защиты витков обмотки статора от ОЗЗ можно, увеличивая активный ток резистора, либо снижая ток срабатывания защиты в пределах допустимых значений, вычисляемых коэффициентом чувствительности защит.

В.2 Выбор уставок направленных токовых защит нулевой последовательности

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

В.2.1 Выбор уставок направленных защит по току

Направленные токовые защиты, реагирующие на составляющую промышленной частоты тока нулевой последовательности, с фазовыми характеристиками двух типов, изображены на рисунке В.1.



а) характеристика первого типа б) характеристика второго типа

Рисунок В.1 – Фазовые характеристики направленных токовых защит от ОЗЗ, применяемых в сети с резистивным заземлением нейтрали

Фазовой характеристикой первого типа (рисунок В.1,а) обладает ряд защит по коду ANSI 67N/67NS. Такие защиты реагируют как на активную, так и на ёмкостную составляющие токов ОЗЗ.

Фазовой характеристикой второго типа (рисунок В.1,б) обладают защиты, реагирующие только на активную составляющую тока нулевой последовательности. Далее рассматривается выбор уставок применительно к характеристике на рисунке В.1,а.

При выборе типа защиты следует иметь в виду следующее:

- характеристика первого типа обеспечивает работоспособность защиты от ОЗЗ при наличии в сети заземляющего резистора и при работе сети в режиме изолированной нейтрали;
- характеристика второго типа обеспечивает работоспособность защиты от ОЗЗ только при использования заземляющего резистора. При выходе заземляющего резистора из строя сеть остаётся без защиты от ОЗЗ. Защиты такого рода рекомендуется применять с неразъемными кабельными ТТНП по согласованию с производителями терминалов защит.

На рисунке В.2 представлена характеристика реле защиты, соответствующая изображённой на рисунке В.1,а.

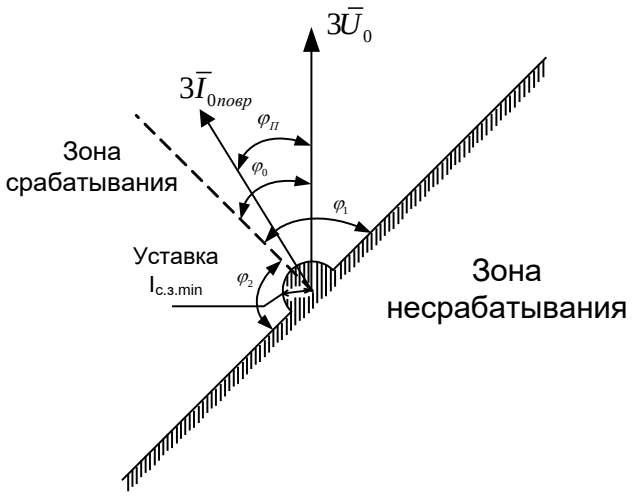


Рисунок В.2 – Характеристика реле направленной защиты от ОЗЗ с фазовой характеристикой первого типа

Выбор уставки по току срабатывания защиты выполняется следующим образом. Минимальный ток срабатывания направленных токовых защит не требуется отстраивать от

ёмкостного тока защищаемого присоединения $I_{0повр}$ при внешнем ОЗЗ (см. рисунок В.2). Его надо отстраивать от суммарного максимального тока небаланса $I_{НБ\Sigma}$, который может протекать по рассматриваемому устройству защиты при внешнем ОЗЗ и вектор которого может располагаться в пределах зоны срабатывания защиты:

$$I_{С3min} = k_Н I_{НБ\Sigma}, \quad (В.15)$$

где k_H – коэффициент надежности, значение которого равно 1,2 (для микропроцессорных терминалов допускается =1,1÷1,15);

$I_{НБ\Sigma}$ – суммарный максимальный ток небаланса, рассчитанный согласно формуле (В.3).

В сетях резистивным заземлением нейтрали для обеспечения необходимой чувствительности уставку защиты присоединения определяют по следующей формуле:

$$I_{С3min} = \frac{I_R}{k_{Чнорм}}, \quad (В.16)$$

где I_R – ток заземляющего резистора при металлическом ОЗЗ;

$k_{Чнорм}$ – нормируемый коэффициент чувствительности (принимается равным 1,5).

Для обеспечения необходимой чувствительности защиты при выходе из строя заземляющего резистора следует дополнительно к (В.15) обеспечить справедливость условия

$$I_{С3min} = \frac{I^I_{C\Sigma}}{k_{Чнорм}}, \quad (В.17)$$

где $I^I_{C\Sigma}$ – суммарный минимальный ёмкостный ток сети за вычетом ёмкостного тока защищаемого присоединения.

Из двух полученных по (В.15) и (В.16) значений $I_{С3min}$ необходимо принять меньшее.

В.2.2 Выбор уставок направленных защит по напряжению и времени срабатывания

По напряжению. Небаланс по напряжению нулевой последовательности как правило не превышает значение 2,5 В. Поэтому напряжение срабатывания защиты необходимо принимать $U_{С3min}$ = от 5 до 7,5 В. Рассматриваемое устройство защиты от ОЗЗ будет чувствительнее стандартных устройств сигнализации по $3U_0$, имеющих уставку порядка 15…20 В.

По времени. Время срабатывания защиты присоединения $t_{С3-ПР}$ определяется несколькими факторами: видом силовой установки, наличием распределительных пунктов или подстанций, питающихся от шин и т.д.

Варьируется выдержка времени срабатывания защиты:

- постоянная выдержка времени, не зависящая от входных сигналов защиты;
- «токозависимая» выдержка времени.

Направленные защиты от ОЗЗ, не имеющие выдержки времени, или с выдержкой времени Δt=0,1÷0,2 с в бóльшей степени подвержены действию помех в переходных режимах, чем защиты с выдержкой времени Δt=0,5÷2,0 с.

На рисунке В.3 изображена токозависимая выдержка времени, повышающая селективность защиты. При ОЗЗ по повреждённому присоединению протекает сумма ёмкостных токов всех присоединений и ток заземляющего резистора $3I^{II}_0$. Если на защитах всех присоединений установлена одинаковая токозависимая характеристика, то защита повреждённого присоединения с большим током ОЗЗ сработает раньше (с выдержкой времени t_2) и

подействует на его отключение, в то время как защита других, неповреждённых присоединений (с выдержкой времени t_1) работать не будет.

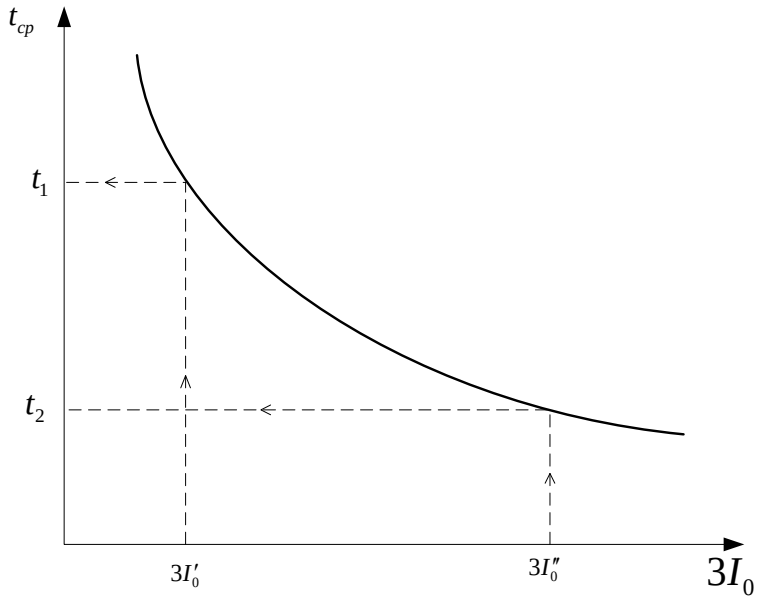


Рисунок В.3 – Обратно зависимая характеристика выдержки времени $t_{СЗ}$ защиты от тока ОЗЗ

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

$$t_{СЗ} = t_{СЗ-РПmax} + \Delta t, \quad (В.18)$$

где $t_{СЗ-РПmax}$ – максимальное время срабатывания защит от ОЗЗ присоединений, отходящих от шин питаемого РП;

Δt – ступень селективности, рекомендуемые значения:

- Δt=0,5 с при согласовании защиты с защитами отходящих присоединений, выполненными на электромеханических и полупроводниковых реле;
- Δt=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 по времени может быть принята равной нулю. Однако может быть целесообразным введение небольшой выдержки времени порядка 0,3÷1,0 с для отстройки от переходных процессов и небалансов и повышения чувствительности защиты по току.

В.2.3 Особенности настройки направленных защит от ОЗЗ

В связи с невозможностью проведения окончательной проверки правильности подключения органа направления мощности защиты от ОЗЗ при новом включении, реконструкции цепей тока и напряжения и т.п. в соответствии с РД 153-34.3-35.613-00 предлагается применять в качестве защиты от ОЗЗ микропроцессорный терминал с функциями регистрации и осциллографирования токов и напряжений при аварийных режимах. В случае возникновения и регистрации ОЗЗ на одной из параллельных питающих РП линий проводится

анализ правильности работы направленной защиты от ОЗЗ на основании снятых осциллограмм, подтверждающих рассматриваемое аварийное событие. Первый случай неправильной работы направленной защиты от ОЗЗ (по направлению) после ее нового включения, реконструкции цепей тока и напряжения и т.п. считать основанием для изменения фазировки токовых цепей, отнести его к процессу завершения окончательной настройки и проверки защиты и не рассматривать как неправильное действие. Об этом необходимо сделать запись в протоколе наладки направленной защиты от ОЗЗ данного присоединения и журнале по РЗА.

Приложение Г
(справочное)
Централизованные устройства защиты от ОЗЗ (системы ОПФ)

Г.1 Общие сведения

Защита от ОЗЗ может быть реализована с использованием централизованного устройства (системы) РЗА. Один комплект централизованной защиты охватывает сразу все присоединения секции или всей подстанции.

13.7 Централизованные устройства защиты, предусматривают специальные алгоритмы определения поврежденного фидера, такие как:

- анализ составляющих переходного процесса (фиксация полярностей первых полуволн высокочастотных составляющих $3I_0$ и $3U_0$);
- относительное сопоставление уровней тока нулевой последовательности во всех присоединениях и их высших гармонических составляющих;
- относительное сопоставление измеряемых величин с учетом активной составляющей тока;
- замер низкочастотных гармонических составляющих в токе нулевой последовательности 3I0 и измерении наложенного на первичную сеть контрольного тока непромышленной частоты;
- комбинация нескольких алгоритмов определения поврежденного присоединения с ОЗЗ.

При малых собственных токах ОЗЗ отдельных присоединений вторичные токи при больших коэффициентах трансформации существующих ТТНП также будут иметь малые значения, что может вызывать сложности с чувствительностью к таким токам алгоритмов централизованных защит от ОЗЗ, поэтому с производителями конкретных защит должен быть решен вопрос работоспособности их оборудования с ТТНП, характеризующимися большим коэффициентом преобразования первичного сигнала.

Г.2 Система ОПФ с приборами ПЗЗМ-3 разработки ООО ВП «НТБЭ»

Данная система ОПФ состоит из 4-х канальных микропроцессорных приборов ПЗЗМ-3 разработки ООО ВП «НТБЭ». Действие прибора основано на фиксации полярностей первых полуволн высокочастотных составляющих тока и напряжения нулевой последовательности 3U0 и 3I0, возникающих при ОЗЗ, с последующей обработкой по специальному алгоритму. Данная система ОПФ может применяться в сетях 3-35 кВ с изолированной, резистивной, резонансно-заземлённой и полностью компенсированной нейтралью.

Система ОПФ состоит из терминала ОПФ, устанавливаемого в КРУ-10 кВ, и сенсорной панели оператора с контроллером приема-передачи и отображения информации. Терминал ОПФ представляет из себя шкаф, в котором смонтированы приборы ПЗЗМ-3 и контроллер сбора и передачи информации, объединенные в единую сеть интерфейсом CAN. Количество приборов ПЗЗМ-3 выбирается исходя из количества контролируемых присоединений.

Система ОПФ с приборами ПЗЗМ-3 используется совместно с измерительными трансформаторами напряжения (НТМИ, НАМИ и т.п.) и трансформаторами тока нулевой последовательности (ТЗРЛ, ТЗЛМ и т.п.).

Для работы системы ОПФ используется 2 сигнала для определения поврежденного фидера: 3I0 с ТТНП контролируемого присоединения и 3U0 с ТН секции шин.

Система ОПФ с приборами ПЗЗМ-3 может применяться в качестве устройства защиты. По усмотрению эксплуатирующей организации система ОПФ может выдавать звуковое оповещение, сигнал на отключение поврежденного присоединения, сигнал в центральную сигнализацию и АСУ ТП.

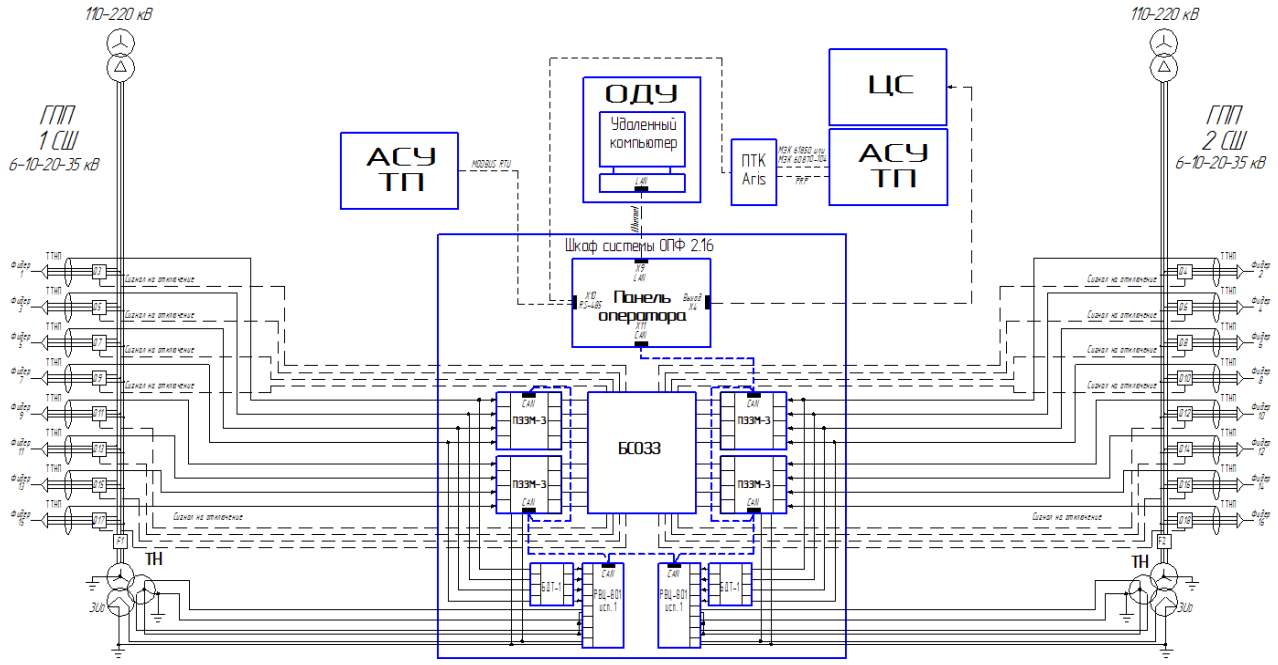
Внешний вид микропроцессорного прибора ПЗЗМ-3 представлен на рисунке Г.1.



а) б)

Рисунок Г.1 – Внешний вид микропроцессорного прибора ПЗЗМ-3 (а) и панель оператора системы ОПФ (б)

Структурная схема подключения системы ОПФ с приборами ПЗЗМ-3 представлена на рисунке Г.2.



ГПП – *главная понизительная подстанция;*
Панель оператора – *панель оператора системы ОПФ (пр-во НТБЗ);*
ПЗЗМ-3 – *4х канальный цифровой прибор сигнализации замыкания на землю (пр-во НТБЗ);*
РВЦ-801 – *8и канальный высокочастотный цифровой регистратор для фиксации аварийных процессов в электрической сети (пр-во НТБЗ);*
БДТ-1 – *блок датчиков тока (пр-во НТБЗ);*
БСОЗЗ – *блок сигнализации ОЗЗ (пр-во НТБЗ);*
ТН – *трансформатор напряжения;*
ТТНП – *трансформатор тока нулевой последовательности;*
ЗРУ – *закрытое распределительное устройство;*
ОДУ – *оперативно диспетчерское управление;*
АСУ ТП – *автоматизированная система управления технологическим процессом.*

Рисунок Г.2 – Структурная схема подключения системы ОПФ с приборами ПЗЗМ-3 для двухсекционной подстанции

Данный вид централизованной защиты от ОЗЗ использует метод измерения и сопоставления переходных процессов при ОЗЗ. К преимуществам данного метода можно отнести:

- независимость от режима заземления нейтрали (изолированная, компенсированная, резистивная, комбинированная, полная компенсация);
- большие значения амплитуд переходных токов, упрощающие отстройку от токов небаланса и обеспечивающие высокую помехоустойчивость и чувствительность защиты;
- отсутствие необходимости дополнительного воздействия на нейтраль (инжекции тока).

Г.3 Система ОПФ типа МКЗЗП-6-35 разработки ООО НПП «ЭСТРА»

Защита типа МКЗЗП-6-35 разработки ООО НПП «ЭСТРА» по принципу действия является централизованной токовой ненаправленной и использует принцип относительного сопоставления уровней тока нулевой последовательности (НП) во всех присоединениях секции в момент срабатывания пускового органа. При этом поврежденное присоединение определяется по наибольшему значению измеренного тока.

Пусковой орган подключается к трансформатору напряжения секции шин (сигнал 3U0), а защита – к трансформаторам тока нулевой последовательности (ТТНП), установленных на кабельных присоединениях (сигнал 3I0). Устройство не требует отстройки от бросков переходных токов, обусловленных собственными емкостями присоединений, что позволяет обеспечить селективность и чувствительность при ОЗЗ в сетях с различным уровнем токов НП.

Для сетей с изолированной нейтралью разработана модификация МКЗЗП-6-35-И, для сетей с компенсированной нейтралью – МКЗЗП-6-35-К.

Для сетей с компенсированной нейтралью принцип относительного сопоставления токов нулевой последовательности по основной гармонике непригоден, поскольку ток в поврежденном присоединении образуется как сумма разнонаправленных емкостных токов и индуктивного тока ДГР. Величина этого тока может оказаться меньше, чем в неповрежденном присоединении, а характер может быть как емкостный, так и индуктивный – в зависимости от настройки реактора. Для селективного определения поврежденного присоединения в таких сетях используется не только принцип относительного сопоставления сигналов, но и их высших гармонических составляющих.

Один блок защиты МКЗЗП-6-35-К позволяет охватить до 16 присоединений. При количестве присоединений больше 16 устанавливается два и более блоков защиты, которые объединяются между собой по CAN интерфейсу. Максимальное количество объединенных блоков – 5 (до 80-ти присоединений). В состав защиты входит устройство сопряжения с объектом (УСО-I), имеющее датчик тока для измерения тока нулевой последовательности и выходное реле, действующее на отключение поврежденного присоединения. Максимальное число УСО равно 16.

Внешний вид Микроконтроллерного устройства для защиты присоединений секции сборных шин от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ с компенсированной нейтралью типа МКЗЗП-6-35-К приведен на рисунке Г.3.



Рисунок Г.3 – Внешний вид МКЗЗП-6-35-К

Структурная схема централизованной защиты от ОЗЗ типа МКЗЗП-6-35-К представлена на рисунке Г.4.

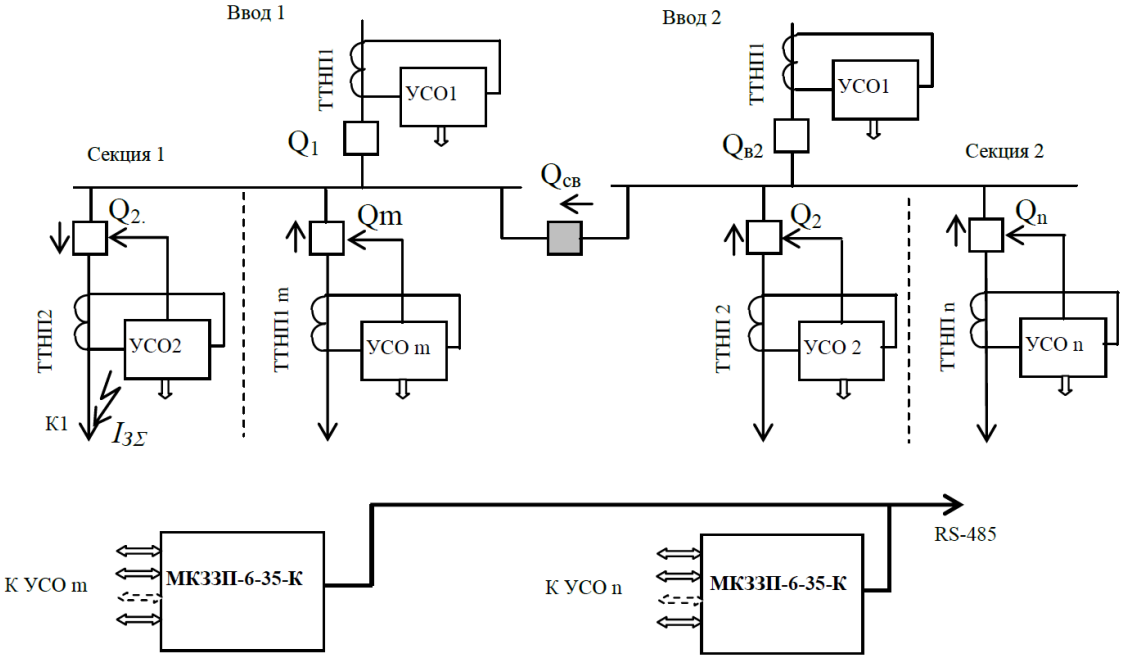


Рисунок Г.4 – Структурная схема централизованной защиты от ОЗЗ типа МКЗЗП-6-35-К

Недостатком системы НПП «Эстра» является использование единственного, хотя и достаточно эффективного, принципа выявления присоединения с ОЗЗ, что формально не отвечает критерию резервирования РЗА. С другой стороны, надежность системы обеспечивается самим принципом ее работы, на основе метода относительного замера.

Г.4 Система ОПФ на базе терминалов ЭКРА 217 разработки ООО НПП «ЭКРА»

Централизованная защита (система ОПФ) на базе терминалов ЭКРА 217 разработки ООО НПП «ЭКРА» использует относительный замер измеряемых величин, когда поврежденный фидер определяется центральным устройством на основе анализа поступивших к нему измерений от всех подключенных к нему фидерных датчиков тока.

Внешний вид терминала ЭКРА 217 приведен на рисунке Г.5.

При реализации данной централизованной защиты от ОЗЗ производится оборудование релейных отсеков ячеек 6-35 кВ дополнительными фидерными датчиками тока на базе устройства ЭКРА 050 1603. Этот фидерный датчик выполняет функции защиты от замыкания на землю в сетях с любым режимом заземления нейтрали. Для работы защиты от ОЗЗ к нему подключаются цепи тока и напряжения нулевой последовательности. Набор защит и используемые алгоритмы защиты от ОЗЗ аналогичны используемым в терминале ЭКРА 217.

Стандартные функции микропроцессорного терминала ЭКРА 217 в части выполнения ОПФ и защиты от однофазного замыкания на землю включают следующее:

- фиксация и сигнализация возникновения ОЗЗ, регистрация событий;
- определение поврежденного фидера;
- отключение поврежденного фидера при ОЗЗ (выбирается пользователем).



Рисунок Г.5 – Внешний вид терминала ЭКРА 217

Для определения поврежденного фидера и работы защиты от ОЗЗ используются основные алгоритмы:

- для сети с изолированной нейтралью и резистивными заземлением нейтрали:
- по величине измеряемого тока промышленной частоты;
- по направлению мощности нулевой последовательности;
- для сети с компенсированной нейтралью:
- по активной составляющей тока, обусловленной подключенным к нейтрали сети дополнительным заземляющим резистором;

– по высшим гармоническим составляющим тока в нулевой последовательности при ОЗЗ;
– по величине наложенного на сеть контрольного тока непромышленной частоты от специального источника контрольного тока, например, тока частоты 25 Гц.

Конструктивно возможны несколько вариантов изготовления фидерного датчика тока: с подключением к одному фидеру; с подключением сразу к трем фидерам; с подключением сразу к семи фидерам. Производителем рекомендуется располагать фидерные датчики тока по возможности ближе к ТТНП, к которым они подключаются по цепям тока нулевой последовательности по условию минимизации нагрузки во вторичных цепях ТТНП.

Пример подключения фидерного датчика ЭКРА 050 1603 на ток нулевой последовательности от семи отходящих фидеров приведен на рисунке Г.6

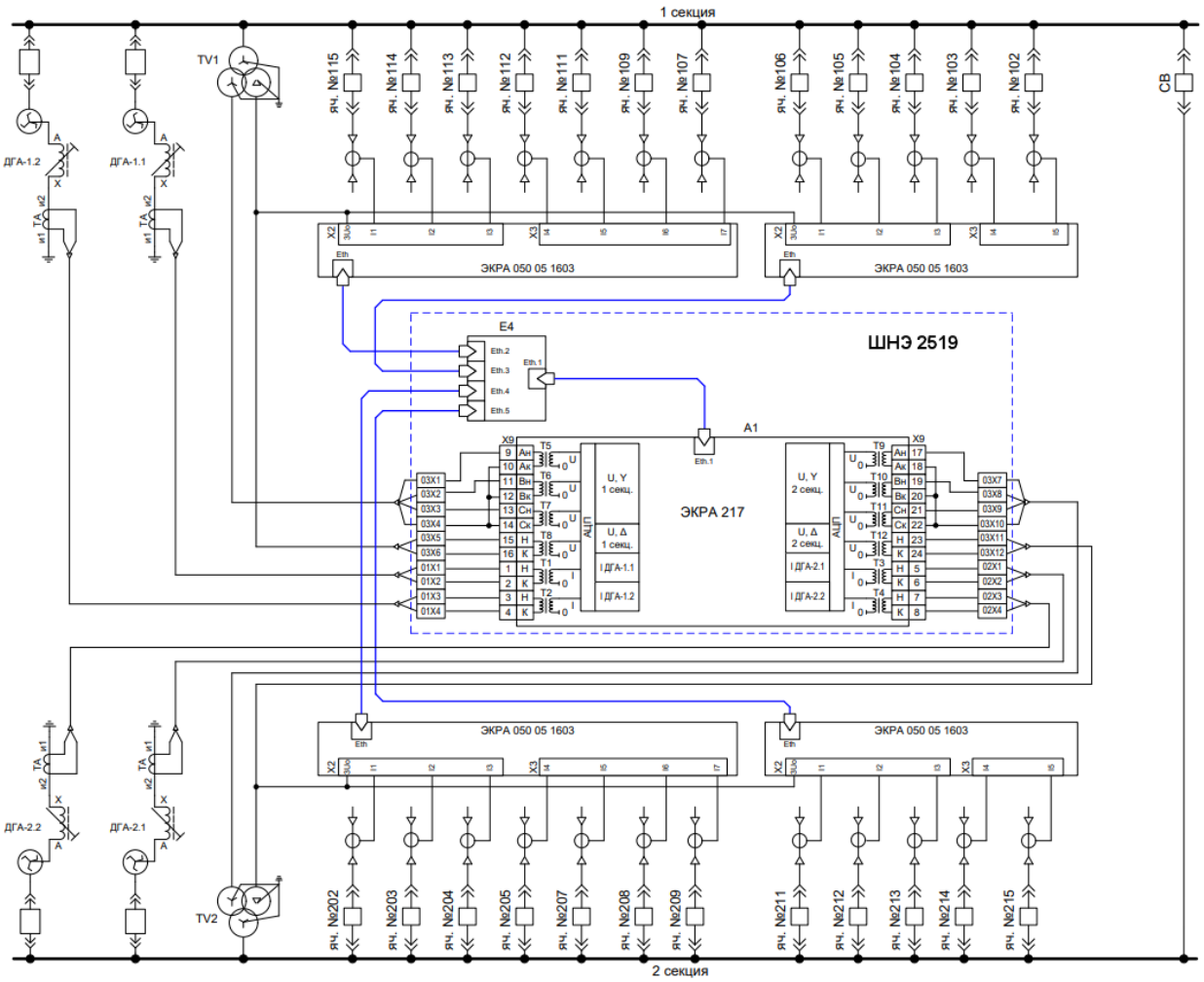


Рисунок Г.6 – Пример структурной схемы централизованной защиты от ОЗЗ на базе терминала ЭКРА 217 с использованием фидерных датчиков ЭКРА 050 1603

Центральный терминал ЭКРА 217 в шкафу ШНЭ2519 выполняет функции сбора и обработки сигналов от всех фидерных датчиков тока. Поврежденный фидер с ОЗЗ отображается с использованием светодиодной индикации на лицевой плите. Также доступна ре-

гистрация и запись осциллограммы с параметрами возникшего режима ОЗЗ: время возникновения, напряжение и ток нулевой последовательности, напряжение на поврежденной фазе сети и на неповрежденных фазах, ток дугогасящего реактора и другие функции для анализа событий.

Преимуществом защиты от ОЗЗ НПП «ЭКРА» является использование нескольких алгоритмов определения поврежденного фидера и работы защит от ОЗЗ, что обеспечивает резервирование отказа срабатывания любого из алгоритмов. Среди стандартных алгоритмов особое внимание следует обратить на наличие в защите от ОЗЗ алгоритма по активной составляющей тока при использовании в сети резисторов заземления нейтрали, что обеспечивает в этом случае надежное выявление поврежденного фидера, так как активный ток от резистора при ОЗЗ протекает только в поврежденном присоединении.

Г.5 Система ОПФ разработки ООО «НПП Бреслер»

Централизованная защита от ОЗЗ разработки ООО «НПП Бреслер» представляет собой Шкаф ОПФ, имеющий в составе микропроцессорный терминал ОПФ распределенного исполнения «Бреслер-0107.081». Согласно руководству по эксплуатации, предоставленному производителем, определение поврежденного фидера производится на основе следующих алгоритмов:

- токовая ненаправленная защита от ОЗЗ по основной гармонике промышленной частоты;
- токовая направленная защита от ОЗЗ по основной гармонике промышленной частоты;
- токовая направленная защита от ОЗЗ по переходному процессу;
- токовая ненаправленная защита от ОЗЗ по сумме высших гармоник;
- по наложенному сигналу не промышленной частоты.

Все реализованные алгоритмы устройства ОПФ используют принцип относительного сопоставления электрических величин нулевой последовательности (принцип относительного замера). Поэтому расчет уставок срабатывания защит не требуется. Предусмотрена возможность работы устройства защиты с действием как на сигнал, так и на отключение. Защита предназначена для работы в электрических сетях с разными режимами нейтрали:

- с изолированной нейтралью;
- с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор (с компенсированной нейтралью);
- с нейтралью, заземленной через активное сопротивление;
- при комбинированном заземлении нейтрали через активно-индуктивное сопротивление.

Виды замыканий, выявляемых защитой:

- одиночные пробои изоляции на землю (клевки);
- устойчивые однофазные замыкания на землю;
- перемежающиеся дуговые замыкания на землю.

Количество секций шин подстанции или распределительного пункта, на которой устанавливается защита при их подключении к одному терминалу – до 4. Количество контролируемых присоединений (фидеров) для одного устройства – до 254.

Внешний вид головного устройства и фидерного терминала ОПФ распределенной структуры представлен на рисунке Г.7.

Микропроцессорная распределенная защита от ОЗЗ с функцией ОПФ для сетей 6-35 кВ «Бреслер-0107.081» непрерывно измеряет напряжение 3U0 измерительного трансформатора напряжения (трансформатор напряжения с вторичными обмотками, соединенными по схеме «разомкнутый треугольник»), который установлен на контролируемой секции шин, или напряжение дополнительной (сигнальной) обмотки дугогасящего реактора. При превышении измеряемого напряжения уставки пускового органа по 3U0, через заданную выдержку времени срабатывания пускового органа фиксируется факт ОЗЗ, начинается процедура ОПФ. Фидерные терминалы непрерывно регистрируют токи и напряжения нулевой последовательности каждого присоединения. Мгновенные значения сигналов 3U0 и I0 непрерывно сохраняются в памяти терминалов. С момента фиксации ОЗЗ центральный терминал рассылает по каналу связи фидерным терминалам широковещательную команду формирования буфера мгновенных значений заданной длины, после чего фидерные терминалы выполняют обработку сигналов и отправляют центральному терминалу результаты. Центральное устройство на основании алгоритмов ОПФ выявляет поврежденное присоединение.



(а) (б)

Рисунок Г.7 – Внешний вид головного устройства распределенной структуры «Бреслер-0107.081» (а) и фидерного терминала «Бреслер-0107.085» (б)

Следует отметить, что, согласно руководству по эксплуатации производителя, единого алгоритма выявления присоединения с ОЗЗ, пригодного для всего разнообразия сетей, способов заземления нейтрали и случаев ОЗЗ, нет. Решение о том, какой фидер поврежден, принимается на основе анализа данных, получаемых по всем алгоритмам с учетом всей доступной информации. По мере эксплуатации защиты, накопления и анализа осциллограмм ОЗЗ, возможно расширение спектра программ и введение в него алгоритмов, наиболее приспособленных к конкретной сети.

Структурная схема подключения шкафа ОПФ распределенной структуры представлена на рисунке Г.8.

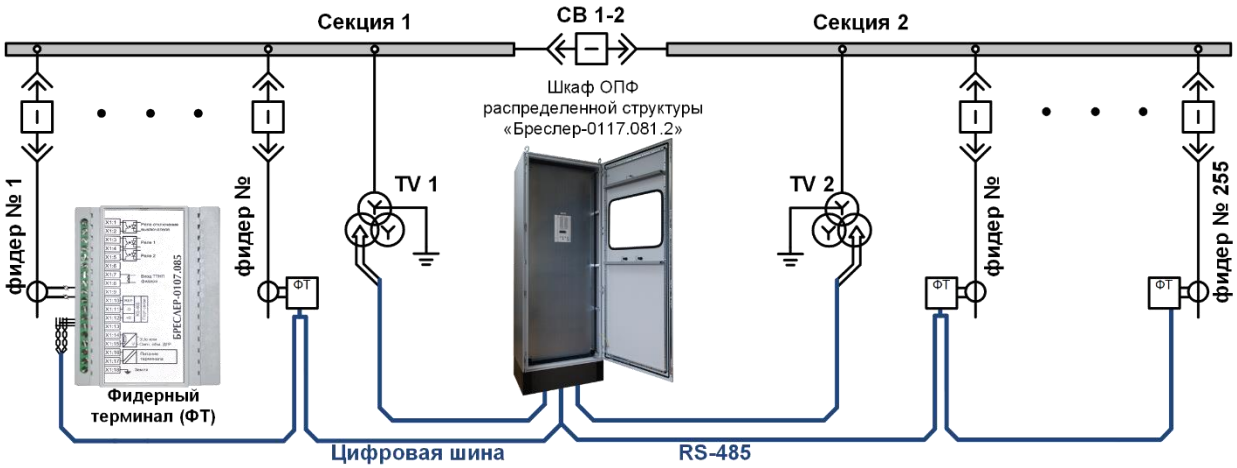


Рисунок Г.8 – Схема подключения шкафа ОПФ распределенной структуры для двухсекционной подстанции

Библиография

[1] Ширковец А.И., Козлачков М.А, Сазонов В.Н и др. Комбинированное заземление нейтрали. Фактор повышения эксплуатационной надежности сетей 6-35 кВ // Новости ЭлектроТехники. – 2016. – №5(101), №6(102).

[2] Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах/ Пер. с англ. под ред. Д.В. Разевига. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.

[3] Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов – М.: Энергия, 1971. – 152 с.

[4] Сарин Л. И., Ширковец А. И., Ильиных М. В. Опыт применения резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ// Энергетик, 2009. №4. – с. 13–14.

[5] Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Резистивное заземление нейтрали сетей 6–10 кВ. – СПб: Изд-во Терция, 2009. – 264 с.

[6] РД 34.45-51.300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования / под ред. Б.А. Алексеева. Ф.Л. Когана. Л.Г. Мамиконянца. – 6-е изд. - М.: НЦ ЭНАС, 1998. – 256 с.;

[7] Валов В.Н., Ширковец А.И., Кудряшов Д.С. Организация релейной защиты при переводе городских сетей 6-10 кВ с компенсацией емкостного тока на низкоомное резистивное заземление нейтрали // Энергетик. – 2016. - №9. – С. 13 – 16.

[8] РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87) Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ.

[9] Беляков Н.Н. Перенапряжения от заземляющих дуг в сетях с активным сопротивлением в нейтрали// Труды ВНИИЭ. 1961. Вып. 11. – с. 84–101.

[10] Болотин В.А., Челазнов А.А., Ширковец А.И. Обеспечение электробезопасности при комбинированном и резистивном заземлении нейтрали в кабельной сети 10 кВ // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – №3. – С. 88 – 93.

[11] Ширковец А. И. Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – № 4. – С. 54 – 59.

[12] Ширковец А.И. Особенности развития дуговых замыканий на землю в кабельной изоляции сети с резистором в нейтрали // Энергетик. – 2016. – №9. – С. 36 – 40.

[13] Ширковец А.И. Герасимов В.Е. Стратегия сбережения ресурса электрооборудования на основе локализации однофазных замыканий в кабельных сетях среднего напряжения // Энергия единой сети, 2025. – № 2 (77). – С. 24–36.

[14] Майоров А.В., Львов М.Ю., Челазнов А.А., Никитина С.Д. Нормирование условий обеспечения электробезопасности в распределительных городских электрических сетях напряжением 10-20 кВ с низкоомным заземлением нейтрали // Энергия единой сети. – 2023. – №2 (69). – С. 14 – 23.

[15] Кужеков С.Л. Кратковременное низкоомное заземление нейтрали в сетях 6-10 кВ. Электробезопасность обеспечена в полном объеме // Новости электротехники. – 2013. – №2 (80). [Электронный ресурс: http://news.elteh.ru/arh/2013/80/08.php]

УДК ОКС

Ключевые слова: заземление нейтрали, резистор, дугогасящий реактор, электрические сети 6–35 кВ, перенапряжения, однофазное замыкание на землю, электробезопасность, релейная защита от замыканий на землю

Руководитель организации - разработчика:

ООО «Болид»
Наименование организации

Директор Должность	_____ Подпись	Сарин Л.И. Ф.И.О.
Руководитель разработки, Начальник отдела международных отношений и инжиниринга Должность	_____ Подпись	Телегин А.В. Ф.И.О.
Исполнитель, Ведущий научный сотрудник Должность	_____ Подпись	Ильиных М.В. Ф.И.О.
Исполнитель, Ведущий инженер по расчетам Должность	_____ Подпись	Дрожжина И.Л. Ф.И.О.
Исполнитель, Инженер Должность	_____ Подпись	Гусева А.В. Ф.И.О.
Исполнитель, Инженер РЗА Должность	_____ _ Подпись	Зубов В.А. Ф.И.О.